

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MECHANIKY, BIOMECHANIKY A MECHATRONIKY



Aktivní ochranná kabina CNC obráběcího stroje

CNC Machine Tool Active Protective Cabin

Bakalářská práce

Vypracoval: Vojtěch Barnat

Vedoucí práce: Ing. Jan Pelikán, Ph.D.

Rok: 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Barnat** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **465349**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Aktivní ochranná kabina CNC obráběcího stroje

Název bakalářské práce anglicky:

CNC machine tool active protective cabin

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se obecně s problematikou používaných způsobů krytování CNC obráběcích strojů
- 2) Zpracujte přehled bezpečnostních požadavků na provedení krytování pracovního prostoru CNC obráběcích strojů
- 3) Navrhněte koncept aktivní ochranné kabiny CNC obráběcího stroje
- 4) Sestavte simulační model stroje s aktivní ochrannou kabinou a proveďte simulaci pracovního cyklu stroje
- 5) Porovnejte koncept stroje s aktivní ochrannou kabinou se strojem s tradiční ochrannou kabinou z hlediska ekonomického, energetického,...

Seznam doporučené literatury:

- [1] J. Marek a kol., Konstrukce CNC obráběcích strojů, MM publishing s.r.o., 2010
- [2] J. Slavík, V. Stejskal, V. Zeman, Základy dynamiky strojů, Vydavatelství ČVUT v Praze, 1997
- [3] V. Stejskal, M. Okrouhlík, Kmitání s Matlabem, Vydavatelství ČVUT v Praze, 2002

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Pelikán, Ph.D., odbor mechaniky a mechatroniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **25.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16.08.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jan Pelikán, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Milan Růžička, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

30.4.2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil pouze podklady uvedené v příloženém seznamu literatury.

V Praze dne 10. 8. 2019



Vojtěch Barnat

Poděkování

Děkuji Ing. Janu Pelikánovi Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, cenné rady, odborné připomínky a veškerý mi věnovaný čas. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu během mého dosavadního studia. Můj obrovský dík patří mé přítelkyni za její podporu a trpělivost při zpracování této práce a po celou dobu mého dosavadního studia.

Název práce: Aktivní ochranná kabina CNC obráběcího stroje
Jméno autora: Vojtěch Barnat
Druh práce: Bakalářská práce
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Pelikán, Ph.D.

Abstrakt:

Tato práce se zabývá zlepšením dynamických vlastností CNC obráběcího stroje Scorpion výrobce Houfek a.s. pomocí oddělené aktivní ochranné kabiny. Nejprve je zpracován obecný přehled krytování obráběcích strojů a také je popsán způsob jejich normalizace. Dále je sestaven simulační model stroje s využitím programovacího prostředí MATLAB Simulink a jsou provedeny simulace pracovního cyklu stroje. Poté jsou porovnány dosažené výsledky. Na závěr je zpracován koncepční návrh aktivní ochranné kabiny.

Klíčová slova:

CNC obráběcí stroj, portálová frézka, nesting, ochranné krytování CNC obráběcích strojů, aktivní ochranná kabina CNC obráběcího stroje, bezpečnostní normy

Title: CNC Machine Tool Active Protective Cabin
Author: Vojtěch Barnat
Thesis type: Bachelor's thesis
Supervisor: Ing. Jan Pelikán, Ph.D.

Abstract:

This thesis deals with improving dynamic properties of the CNC machine tool Scorpion by Houfek a.s. using separate active protective cabin. First, a general overview of machine tool guarding is elaborated upon which the way of their standardization is described. Simulation model of the machine is created using the MATLAB Simulink programming environment and simulations of a work cycle are performed. Then the results are then compared and finally, the conceptual design of the active protective cabin is described.

Keywords:

Nesting machine, CNC machine tool guarding, active protective cabin, safety standards

Obsah

1	Úvod	7
2	Cíle práce.....	8
3	Krytování CNC obráběcích strojů.....	9
3.1	Vnitřní krytování CNC obráběcích strojů	9
3.1.1	Teleskopické kryty	9
3.1.2	Rolovací krytování a zástěny.....	10
3.1.3	Krycí měchy.....	11
3.2	Vnější krytování CNC obráběcích strojů.....	12
3.2.1	Stacionární krytování	13
3.2.2	Vezené kabiny.....	14
3.2.3	Průhledy	16
3.3	Bezpečnostních požadavky na krytování CNC obráběcích strojů	17
3.3.1	Základní rozdělení bezpečnostních požadavků dle ČSN EN ISO 14120.....	17
3.3.2	Ověření a validace metod dle ČSN EN ISO 14120	19
3.3.3	Praktická zkouška odolnosti proti průrazu	20
4	Praktická část – simulační experimenty stroje s aktivní kabinou	23
4.1	Uvažovaný obráběcí stroj	23
4.2	Popis simulačního experimentu	24
4.3	Tradiční ochranná kabina.....	26
4.4	Pasivní oddělená kabina	28
4.5	Aktivní oddělená kabina	33
4.6	Trajektorie při obrábění.....	34
4.7	Energetické zhodnocení.....	37
4.8	Shrnutí.....	39
5	Koncepční návrh aktivní kabiny.....	40
5.1	Funkční struktura konceptu stroje s aktivní kabinou.....	40
5.2	Základní návrh konstrukčního provedení	41
6	Závěr.....	44
	Seznam použité literatury	45

1 Úvod

Pokud chce výrobce obráběcích strojů v dnešní době uspět se svým výrobkem na trhu, je nezbytně nutné stále inovovat svojí produkci tak, aby držel náskok před konkurencí. Ochranné kryty tvoří nedílnou součást všech moderních obráběcích strojů, a má proto smysl se jejich zdokonalováním náležitě zabývat. Kryty jsou nezbytné z hlediska legislativního, podílí se na plynulosti provozu stroje, chrání obsluhu a stroj před různým vlivy třískového obrábění a v neposlední řadě jejich design utváří celkový dojem z výrobku. Kryty mohou však mít na obráběcí stroj i negativní vlivy. Ovlivňovat mohou například jeho ergonomii, ale také obráběcí proces samotný.

Stacionární vnější kryty, které obestavují celý obráběcí stroj, mohou být u rozměrově větších obráběcích strojů velmi nákladné nebo jejich užití není vůbec možné z důvodu nutnosti ukládání rozměrných polotovarů do pracovního prostoru stroje. Krytování tedy může být navrženo formou vezené kabiny, která je pevnou součástí portálu a pohybuje se s ním v jedné či více osách. Je zřejmé již z pojmenování, že vezená kabina využívá k pohybu přímo pohon osy obráběcího stroje a může přímo svojí hmotností, která bývá nezanedbatelná, negativně ovlivňovat dynamické vlastnosti obráběcího stroje. Vzniká tak myšlenka ochrannou kabinu oddělit od portálu stroje, a to pružným spojením nebo instalací nezávislého pohonu kabiny, která by se tak stala aktivní.

2 Cíle práce

Cílem této práce je provést a kvalitativně zhodnotit návrh na oddělení ochranné kabiny dřevoobráběcího stroje Scorpion výrobce Houfek a.s. od jeho portálu a instalaci nezávislého pohonu kabiny.

Cíle pak mohou být rozděleny do těchto bodů:

- Seznámení se obecně s problematikou používaných způsobů krytování CNC obráběcích strojů
- Zpracování přehledu bezpečnostních požadavků na provedení krytování pracovního prostoru CNC obráběcích strojů
- Sestavení simulačního model stroje s aktivní ochrannou kabinou a provedení simulace pracovního cyklu stroje
- Návrh konceptu aktivní ochranné kabiny CNC obráběcího stroje
- Porovnání konceptu stroje s aktivní ochrannou kabinou se strojem s tradiční ochrannou kabinou z hlediska ekonomického, energetického...

3 Krytování CNC obráběcích strojů

Třískové obrábění je velmi intenzivní proces, jehož vedlejším produktem jsou mimo vznikajícího tepla právě odletující třísky, které mají v mnohých případech velmi vysokou kinetickou energii. Nejen kvůli tomu je nutné oddělit pracovní prostor stroje od okolního prostředí, ale také od útrob stroje samotného. K tomu slouží právě ochranné kryty, které můžeme rozdělit podle již zmíněných funkcí na kryty vnitřní, které chrání stroj jako takový, a kryty vnější, které tvoří rozhraní mezi pracovním prostorem stroje a okolním prostředím. [1]

Jak již bylo zmíněno v úvodu, předmětem této práce je kabina portálového obráběcího stroje, tedy jeho vnější pohyblivý kryt. Vnitřní krytování je však neméně důležitým prvkem obráběcích strojů, a proto bude vypracována stručná rešerše i této tematiky pro lepší obecný přehled.

3.1 Vnitřní krytování CNC obráběcích strojů

Vnitřní krytování plní funkce jako odvod chladicí kapaliny z pracovního prostoru a zachycení třísek před vniknutím do pohybového ústrojí a chrání tak při provozu obráběcí stroj samotný. Při tom je velmi důležité, aby umožňovalo bezproblémový pohyb pohyblivých částí stroje při zachování pokud možno co nejnižších pasivních odporů. [2]

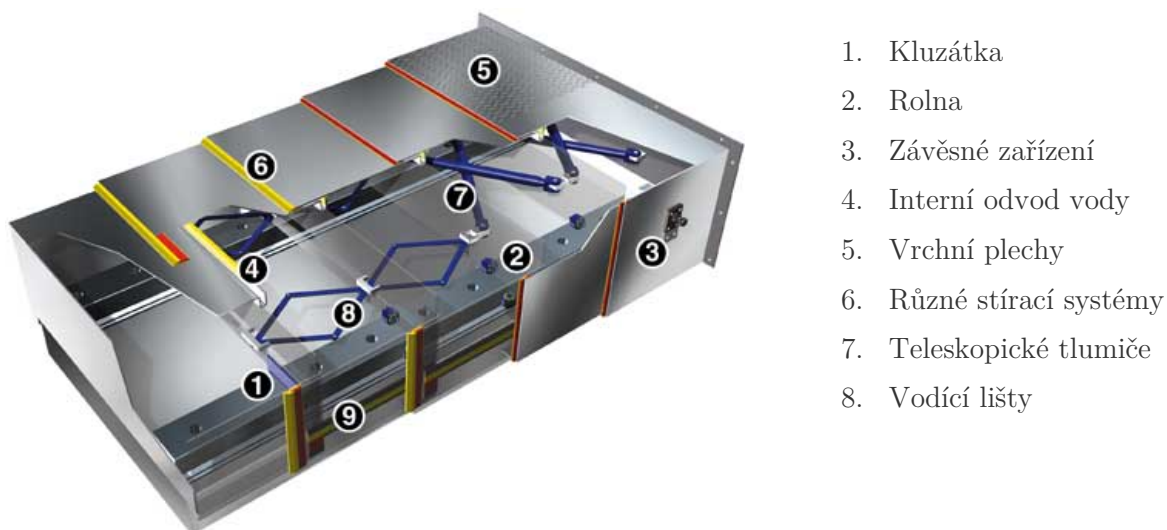
Vnitřní krytování lze rozdělit podle charakteru pohybu součásti, kterou chrání, na jednoosé a dvouosé. Zaměříme se na jednoosé kryty, které dále budeme dělit podle konstrukčního řešení na teleskopické kryty, zástěny, rolety a měchy. [3]

3.1.1 Teleskopické kryty

Nejpoužívanějším typem vnitřního krytování je teleskopický kryt. Jeho konstrukce je založená na množství plechových segmentů, které se po sobě mohou volně smýkat, a kopírují tak pohyb stroje v jedné nebo dvou osách. Používají se k ochraně součástí jako jsou kuličkové šrouby, odměřovací zařízení, hadice apod. jejichž ochrana nemá často jiné řešení vzhledem k jejich relativnímu pohybu vůči rámu stroje. [1]

Pro správnou funkčnost těchto krytů jsou pak klíčové takzvané stěrače, které zamezují průniku nežádoucích elementů mezerami mezi jednotlivými segmenty. Dalším důležitým konstrukčním prvkem jsou teleskopické tlumiče, nejčastěji ve formě nůžkového mechanismu, bez kterých by docházelo k rázům při dosedání koncových dorazů segmentů. Není potom problém s nejnepříjemnějšími teleskopickými kryty dosahovat

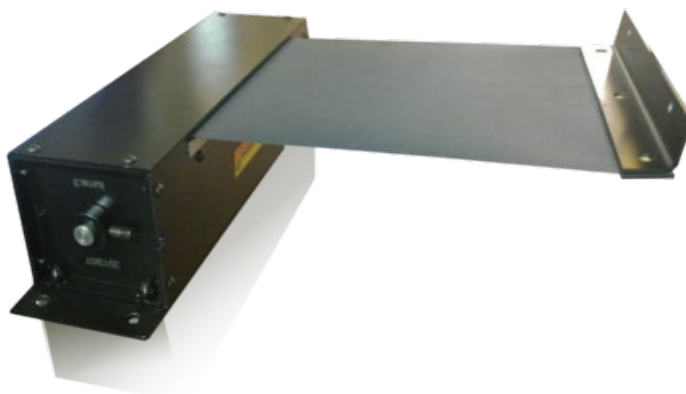
extrémní rychlosti 150 až 200 $m \cdot min^{-1}$. [3] Popis jednotlivých konstrukčních prvků teleskopických krytů je uveden na Obrázku 1.



Obrázek 1 - Řez teleskopickým krytem od výrobce HENNING s.r.o. [24]

3.1.2 Rolovací krytování a zástěny

Rolety jsou dalším běžným způsobem krytování pohyblivých komponent obráběcích strojů. Kryt je v tomto případě tvořen pásem, který je na jednom konci pevně spojen s pohyblivou částí stroje a na druhém je navinut na buben. Při pojezdu jedním či druhým směrem je pás volně odvíjen nebo naopak navíjen na buben. Napnutí pásu při navíjení pak zajišťuje torzní pružina.



Obrázek 2 - Roleta od výrobní divize Lin-Tech společnosti HENNLICH s.r.o. [4]

Pás samotný může být vyroben z celé řady materiálů s různou teplotní, mechanickou a chemickou odolností. Nejčastějšími materiály jsou syntetické tkaniny (typicky polyester), pryž nebo nerezový plech. [4] Díky nízké hmotnosti těchto krytů jsou vhodné pro aplikace s vysokými pojezdovými rychlostmi. Další výhodou pak mohou být kompaktní rozměry a jednoduchá instalace. Tento způsob krytování má však nízkou

mechanickou odolnost, a proto je vhodný k použití pouze ve svislé poloze tak, aby se na pásu nehromadily třísky. [5]

Výrazně lepší mechanickou odolnost mají článkové zástěny. Tato robustnější varianta rolovacího krytování je tvořena tuhými segmenty, které jsou připevněny na pás a spojeny klouby nebo jinak pružně spojeny. Segmenty jsou pak vyrobeny převážně jako hliníkové tvarované lišty. Na rozdíl od rolet nemusí být článková zástěna navíjena na bubnu, ale její konec volně visí, nebo je připevněn k rámu stroje.



Obrázek 3 - článková zástěna od výrobce SHAVER INDUSTRIES Inc. [25]

Vyšší robustnost a pevnost článkových zástěn umožňuje krytování širších prostor a na rozdíl od rolet není problém jejich vodorovná orientace. Následkem je však vyšší hmotnost, která znemožňuje použití v aplikacích s vysokými posuvovými rychlostmi. Běžně se dá počítat s dosažením rychlostí 80 až 120 $m \cdot min^{-1}$. [3]

3.1.3 Krycí měchy

Jedním z dalších typů vnitřního krytování jsou skládané měchy. Vyrobeny jsou z tkaniny a vodících profilů, které určují tvar měchu. Při pojezdu stroje je měch stlačován či rozpínán podobně jako tahací harmonika. Měchy mohou být uzavřené, ve tvaru U, pouze rovinné nebo jinak na zakázku vyrobené. Profily jsou nejčastěji vyrobeny z PVC, tkaniny pak mohou být z celé řady materiálů například z polyesteru, skelného či kevlarového vlákna. Pokud je z důvodu odletujících žhavých třísek požadována teplotní odolnost vyšší než 200 °C, bývají měchy opatřeny ocelovými lamelami. [6] [7]

Podobně jako rolety jsou měchy díky své nízké hmotnosti vhodné v aplikacích s vysokými pojezdovými rychlostmi. Běžně dosažitelné rychlosti se pohybují okolo 90 $m \cdot min^{-1}$ [7]. Dále mohou být podobně jako teleskopické kryty opatřeny nůžkovým mechanismem pro zlepšení plynulosti skládání měchu. Typicky můžeme krycí měchy vidět použity k ochraně Y os portálových frézek (viz Obrázek 4 na následující straně).



Obrázek 4 - Portálová frézka FZ30 výrobce ZIMMERMANN s osou Y krytou pomocí měchu [26]

3.2 Vnější krytování CNC obráběcích strojů

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, vnější kryty tvoří rozhraní mezi pracovním prostorem stroje a vnějším okolím. Jejich nejdůležitější funkcí je chránit především obsluhu stroje, která se vyskytuje v nejbližším okolí. Ochranou je myšleno nejen omezení dlouhodobě škodlivých vlivů na zdraví jako prach, aerosolové mlhy a hluk, ale také ochrana při mechanické či elektrické poruše stroje. Je evidentní, že zmíněné důvody krytování jsou velmi závažné a jejich absence či nesprávná konstrukce může mít i fatální následky. Existují proto směrnice a z nich vplývající harmonizované normy, které definují přesné bezpečnostní požadavky, kterými se budeme podrobněji zabývat v jiné kapitole. [2]

Plnění zmíněných ochranných funkcí musí však jít ruku v ruce s výrobním procesem. Ochranný kryt se vlastně stává prostředníkem mezi strojem a jeho uživatelem a celkově tak svojí konstrukcí, uspořádáním a tvarem ovlivňuje psychologii práce a v důsledku tedy celkovou výkonnost. Obecně tuto problematiku nazýváme design. V poslední době výrobci právě u krytování obráběcích strojů stále více uplatňují komplexní řešení designu nejen ze zmíněných důvodů, ale také za účelem odlišení své produkce a prosazení svých výrobků na dnešním přesyceném trhu. [8]

3.2.1 Stacionární krytování

Většina konvenčních CNC obráběcích center je krytována tzv. kapotáží. Jde o samonosné sestavné panely většinou z ocelových plechů, které částečně nebo úplně obklopují pracovní prostor. Kapotáž může být přímo součástí stroje, přepravována se strojem jako jeden celek nebo uchycena na vlastním betonovém základu, převážena a montována jako samostatná jednotka. Samostatně stojící kapotáž je používána spíše u obráběcích center větších rozměrů a její konstrukce bývá otevřená. Může být dodávána k obráběcímu stroji přímo výrobcem nebo ji vyhotoví specializovaní výrobci až po instalaci samotného obráběcího stroje na pracovišti. [1]

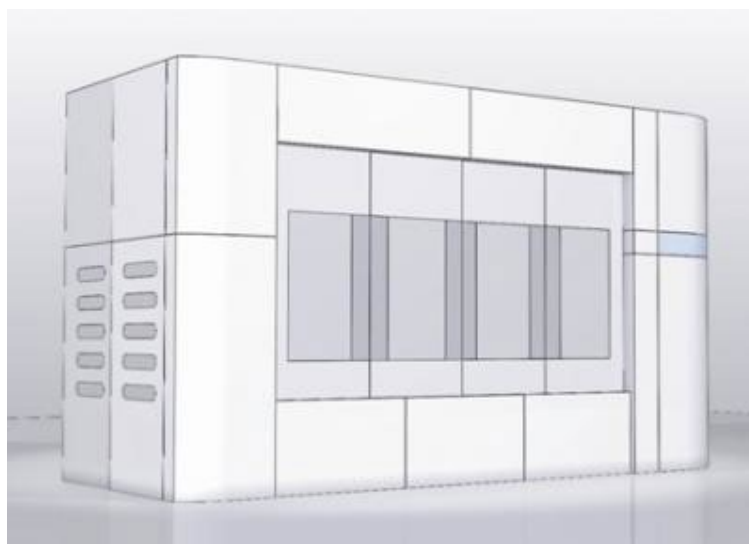


Obrázek 5 - Open-top kapotáž stroje od výrobce TOSHULIN, a.s. [27]

Otevřená (tzv. open-top) kapotáž je ve většině případů konstrukcí podobná uzavřené, ale nemá zastřešení. Tato kapotáž částečně chrání obsluhu a okolí stroje před produkty třískového obrábění a může částečně redukovat hluk. Bývá použita v aplikacích, kde je zastavení celého pracovního prostoru příliš nákladné nebo není vůbec možné z důvodu notnosti manipulace s velkými obrobky. Při konstrukci otevřené kapotáže je důležité, aby byly dodrženy minimální bezpečné vzdálenosti, které udává norma ČSN EN ISO 13857 *Bezpečnost strojních zařízení – Bezpečné vzdálenosti k zamezení dosahu do nebezpečných prostor horními a dolními končetinami*, kapitola 4.2.2 *Dosah přes ochranné konstrukce*. V této normě se dle výšky nebezpečného prostoru a výšky ochranné konstrukce určí minimální vodorovná bezpečná vzdálenost k nebezpečnému prostoru. Pokud je nebezpečný prostor ve výšce větší než 2,7 m je považován v bezpečné vzdálenosti. Jinak řečeno otevřený kryt vyšší než 2,7 m, bez ohledu na další uspořádání stroje za krytováním, je považován za bezpečný, nižší kryt musí zakrývat nebezpečné prvky s určitým vodorovným odstupem. [1] [9]

Zcela uzavřená kapotáž je bezpečnějším, robustnějším a celkově lepším řešením krytování pracovního prostoru obráběcího stroje, a je proto používána ve většině moderních provozů. Úplným uzavřením pracovního prostoru je dosažena výrazně lepší ochrana před únikem aerosolových mlh a prachu a je také značně redukován hluk. Obecně je minimalizováno riziko průniku jakýchkoliv nežádoucích elementů mezi pracovním prostorem obráběcího stroje a jeho okolím. Tím je dosaženo čistší a modernější pracovní prostředí nezbytné pro vznik výrobků nejvyšší kvality.

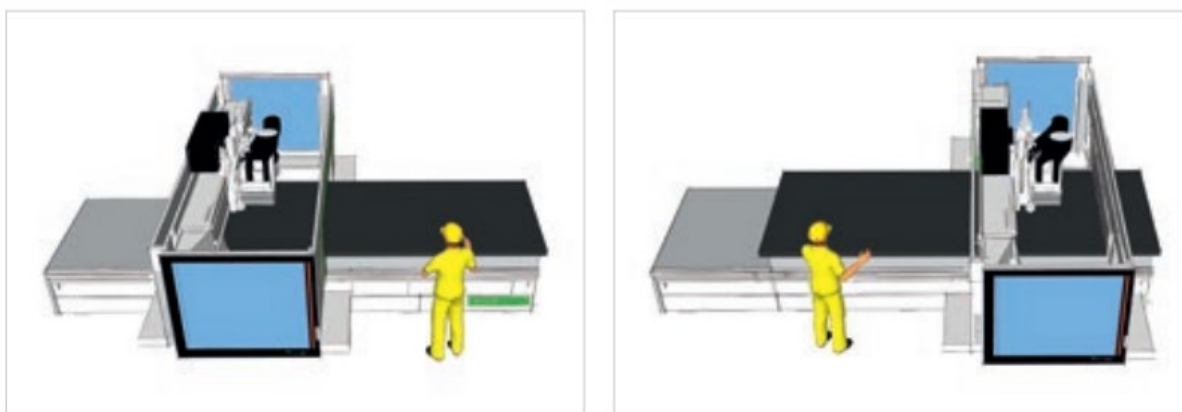
Mezi přední specializované výrobce kapotáží obráběcích strojů patří česká firma Hestego, která ve spolupráci s Výzkumným centrem pro strojírenskou výrobní techniku a technologii ČVUT v Praze vyvíjí modulární systém krytování. Toto řešení má výrazně snížit náklady na výrobu při zachování variability nejen rozměrů, ale i tvaru a zakřivení kapotáží. Zvolenou kombinací těchto prvků by tak měla být zachována myšlenka charakteristického firemního designu výrobců obráběcích strojů bez nutnosti vlastní nebo zakázkové výroby krytování. Více o této perspektivní technologii v [8] a [10].



Obrázek 6 – Modulární krytování od výrobce HESTEGO a.s. [8]

3.2.2 Vezené kabiny

Další variantou řešení vnějšího krytování portálových obráběcích strojů je vezené krytování. Tento způsob krytování využívá pohyblivé kabiny, která je pevně spojena s portálem a vezena na saních stroje, a kopíruje tak pohyb portálu ve směru osy x. Používá se v aplikacích, které vyžadují ukládání rozlehlých polotovarů nejčastěji ve formě desek. V těchto případech by uzavřená kapotáž kolem celého obráběcího stroje byla nejen velmi nákladná, ale výrazně by zhoršovala efektivitu výroby. Výhodou tohoto řešení je možnost přístupu obsluhy ke stolu obráběcího stroje i za jeho provozu, při zachování bezpečnosti srovnatelné s krytovaním uzavřenou kapotáží. Základní skupinou strojů využívající tuto konstrukci krytování jsou CNC stroje pro výrobu nábytkových dílů z dřevěných desek technologií nesting.



Obrázek 7 – Přístup ke stolu obráběcího stroje s vezeným krytováním výrobce BIESSE [28]

Samotná kabina je konstruována podobně jako klasická stacionární kapotáž. Základem jsou ocelové plechy případně doplněné o průhledové panely, navíc však pohyblivá kabina těchto strojů využívá bezpečnostních konstrukčních prvků přesně definovaných dle normy ČSN EN ISO 19085-3 *Dřevozpracující stroje – Bezpečnostní požadavky – Část 3: Číslíkově řízené (NC) vyvrtávačky a horní frézky*. Mezi ty patří nárazníky citlivé na tlak, které v případě kontaktu zastaví pohyb kabiny a zamezí tak zranění obsluhy nebo poškození stroje.



Obrázek 8 - Ochranné nárazníky a zástěrky obráběcího stroje Scorpion výrobce Houfek a.s. [28]

Dalším důležitým konstrukčním prvkem jsou ochranné zástěry (z anglického „curtains“). Ty jsou nezbytné k zakrytí otvorů mezi stolem a kabinou, které svojí výškou určují maximální tloušťku obráběného polotovaru. Otvory nesmí být širší než 600 mm a musí být kompletně zakryty těmito zástěrami, aby zamezily průniku částí stroje, nástroje či obrobku. Zástěry musí být vyhotoveny z minimálně šesti vrstev pruhů o šířce alespoň 80 mm překrývající se do poloviny šířky a jsou testovány balistickými zkouškami podobně jako kapotáž viz kapitola 3.3. [11]

3.2.3 Průhledy

Monitorování obráběcího procesu je v dnešní době rozsáhlou problematikou a je to činnost, při které se snažíme naměřit a vyhodnotit data z různých obráběcích charakteristik, jako například působící síly, vibrace, tvar a teplota třísek a další. K tomu složí propracované monitorovací systémy implementující prvky jako vysokorychlostní kamery, termokamery, dynamometry, akcelerometry aj. Základním prvkem sledování obráběcího procesu však stále zůstává vizuální kontrola, která je u krytovaných strojů zprostředkována průhledovými panely, které také bezpochyby přispívají atraktivnímu designu moderních obráběcích strojů. [12] [1]



Obrázek 9 - Pohled průhledovým panelem obráběcího stroje Rover K od výrobce BIESSE [28]

Výchozím materiálem průhledových panelů je nejčastěji polykarbonát, který je při poruše schopen pojmout vysokou nárazovou energii a zároveň se netříští. Není však odolný vůči otěru a podléhá degradaci vlivem chladicí kapaliny a z toho důvodu je z jedné nebo obou stran opatřen odolnou vrstvou například ze skla. Takto sestavený „sendvič“ bezpečnostního skla je potom montován do ochranných krytů v ocelovém rámečku s patřičným přesazením, aby bylo při poruše zabráněno případnému vypadnutí prosklení z rámečku. Průhledové panely se i přes konstrukci z bezpečnostního skla stávají nejzranitelnějším místem vnějšího krytování vůči vymrštěným částem stroje či obrobku při mechanické poruše. Právě na nich jsou proto prováděny praktické zkoušky odolnosti vůči průrazu blíže popsané v kapitole 3.3.3. V současné době se stále více uplatňuje technologie sledování obráběcího procesu kamerovým systémem, která eliminuje potřebu průhledových panelů a praktických zkoušek na nich prováděných a celkově tak snižuje náklady na výrobu. [2]

3.3 Bezpečnostních požadavky na krytování CNC obráběcích strojů

Každý obráběcí stroj musí před jeho uvedením na trh v Evropské unii splňovat bezpečnostní kritéria, která jsou určena směrnicemi Evropského parlamentu. Směrnice však určují pouze výsledek, kterého má být dosaženo nikoliv konkrétní požadavek např. na konstrukci. Kvůli specifikaci konkrétních požadavků a způsobů dosažení požadovaných výsledků tedy vznikají tzv. harmonizované normy¹. [13]

Normy týkající se bezpečnosti strojních zařízení se rozdělují do 3 skupin:

- A) Základní bezpečnostní normy
- B) Skupinové bezpečnostní normy
- C) Bezpečnostní normy pro stroje

Základní normou v oblasti bezpečnosti strojního zařízení obecně je ČSN EN ISO 12100 - *Bezpečnost strojních zařízení – Všeobecné zásady pro konstrukci – Posouzení a snižování rizika*. Tato norma typu A definuje základní pojmy, zásady a metody pro dosažení bezpečnosti a eliminaci rizik a jejím primárním účelem je sloužit jako základ při tvorbě bezpečnostních norem typu B a C. Normy typu B jsou použitelné pro širokou skupinu strojů, ale zabývají se jedním bezpečnostním hlediskem nebo typem bezpečnostního zařízení. Skupinovou normou pro krytování obráběcích strojů je norma ČSN EN ISO 14120 – *Bezpečnost strojních zařízení – Ochranné kryty – Obecné požadavky pro konstrukci a výrobu pevných a pohyblivých ochranných krytů*. Nejvyšší prioritu při návrhu potom mají normy typu C, které se zabývají konkrétním typem stroje jako například ČSN EN ISO 16090-1 *Bezpečnost obráběcích strojů – Obráběcí centra, frézky, postupové stroje – Část 1: Bezpečnostní požadavky*. [14] [15] [16] [2]

3.3.1 Základní rozdělení bezpečnostních požadavků dle ČSN EN ISO 14120

Tato norma dělí bezpečnostní požadavky mezi hlavní trojici aspektů uvedených a dále rozdělených na následující straně. Každý bezpečnostní požadavek norma stručně vysvětluje a případně odkazuje na další normu, kterou je požadavek upravován.

¹ Proces harmonizace právního předpisu znamená vytvoření podobné právní úpravy např. mezi jednotlivými státy. Například norma ČSN se stane harmonizovanou, pokud přejme plně požadavky stanovené normou EN. [29]

Aspekty stroje

- Přístup do nebezpečných prostor (nastavení, mazání, údržba)
- Zachycení vymrštěných částí
- Zachycení nebezpečných látek
- Hluk
- Záření
- Výbušná atmosféra

Aspekty člověka

- Bezpečné vzdálenosti
- Kontrola přístupu do nebezpečného prostoru
- Viditelnost
- Ergonomie
 - Velikost, hmotnost a konstrukce
 - Ovládací síla
 - Silově ovládané ochranné kryty (uzavírací síla)
- Předpokládané používání (je bráno v úvahu pravidelné nesprávné použití)

Aspekty návrhu a konstrukce ochranného krytu

- Místa stlačení nebo zachycení (ISO 13854)
- Životnost
- Hygiena (zbytky potravin, hnojící kapaliny...)
- Čištění (potravinářství a farmacie)
- Zamezení kontaminace
- Ostré hrany
- Neporušenost spojů
- Odstranění pevných ochranných krytů
- Montáž odstranitelných pevných ochr. krytů
- Nastavitelné ochranné kryty
- Pohyblivé ochranné kryty
- Uzavřená poloha pohyblivých ochranných krytů
- Ochranný kryt s blokováním a se spouštěcí funkcí

Obrázek 10 - Struktura rozdělení bezpečnostních požadavků dle ČSN EN ISO 14120, kapitola 5

Některé další dále nedělitelné bezpečnostní požadavky dle ČSN EN ISO 14120 jsou:

- Materiály
- Odolnost proti korozi
- Odolnost proti mikroorganismům
- Netoxičita
- Průzory stoje
- Průhlednost
- Stíny a stroboskopické efekty
- Elektrostatické vlastnosti
- Ochranné kryty s elektricky vodivými částmi
- Tepelná vodivost
- Oheň a hořlavost
- Snižování hluku a vibrací
- Ochrana proti záření
- Odolnost proti vibracím
- Výstražné značky
- Barva
- Vzhled

3.3.2 Ověření a validace metod dle ČSN EN ISO 14120

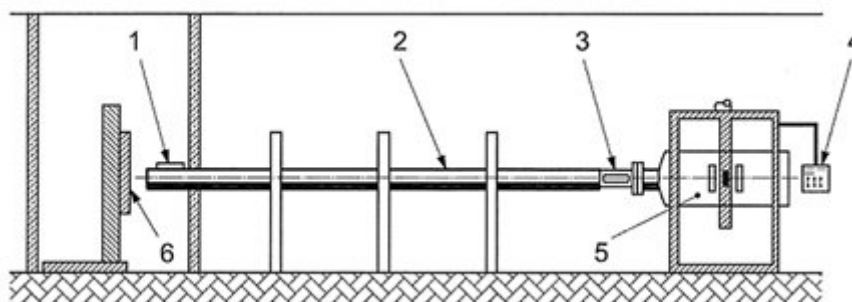
Norma striktně stanovuje, jakými metodami musí být zmíněné bezpečnostní požadavky ověřovány. Mezi ověřovací metody patří:

- A) Vizuální kontrola
- B) Praktické zkoušky
- C) Měření
- D) Sledování během provozu
- E) Přezkoumání hodnocení rizik založených na úlohách
- F) Přezkoumání specifikací, dispozice a dokumentace

Ověření požadavků je nejčastěji požadováno kombinací více metod, přičemž naprostá většina bezpečnostních požadavků musí být ověřována metodami E a F. Použití zbylých metod je pak různé dle charakteru bezpečnostního požadavku. Na příklad požadavky na absenci ostrých hran a výčnělků, na materiály zajišťující možnost sledování obráběcího procesu, zvýraznění nebezpečí vhodnými barvami při otevření či odstavení ochranného krytu aj. jsou ověřovány vizuálně (A), měřitelné parametry jako jsou bezpečné vzdálenosti, hluk, ovládací síla aj. jsou měřeny (C) a nejdůležitější neměřitelné požadavky jako je zachycení vymrštěných částí a látek jsou potom ověřovány praktickými zkouškami (B). [15]

3.3.3 Praktická zkouška odolnosti proti průrazu

Jedním z životu nejvíce nebezpečných poruchových stavů, který může nastat u obráběcích strojů s rotačními obrobky či nástroji, je vymrštění obrobku, nástroje či jejich částí při mechanickém poškození stroje. Aby bylo zaručeno, že ochranný kryt odolá nárazu a zabrání průniku vymrštěných částí mimo pracovní prostor jsou nejslabší místa ochranného krytování, typicky polykarbonátové průhledové panely, zkoušena praktickými zkouškami. Přesná kritéria těchto zkoušek jsou informativně uvedena v příloze B normy ČSN EN ISO 14120 a normativně² jsou pak tyto zkoušky stanoveny podle typu stroje v ČSN EN ISO 23125, příloha A pro soustružnická centra a v ČSN EN ISO 16090-1, příloha A pro obráběcí centra, frézky a postupové stroje. [15]



Obrázek 11 - Schéma uspořádání zkoušky nárazem dle ČSN EN ISO 14120 [2]

Samotná praktická zkouška spočívá ve vystřelení projektilu o přesně stanovených parametrech pokud možno kolmo proti zkoušenému objektu (6), kterým může být kryt samotný nebo pouze vzorek materiálu, ze kterého je kryt vyroben. Vystřelovací zařízení akceleruje projektil (3) v hlavní (2) uvolněním přetlaku z tlakové nádoby (5) na požadovanou rychlost, která je měřena rychloměrem (1). Určující veličinou balistické odolnosti materiálu je kinetická energie dopadající částice. Ta je určena rovnicí

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_i^2 [J] \quad (1)$$

kde $v_i [m \cdot s^{-1}]$ je rychlost nárazu a $m [kg]$ je hmotnost projektilu. Požadovaná rychlost nárazu se dle ČSN EN ISO 14120 stanoví jako maximální obvodová rychlost všech rotačních elementů (nástrojů nebo obrobku) dle následující rovnice:

$$v_c = B \cdot \pi \cdot n [m \cdot s^{-1}] \quad (2)$$

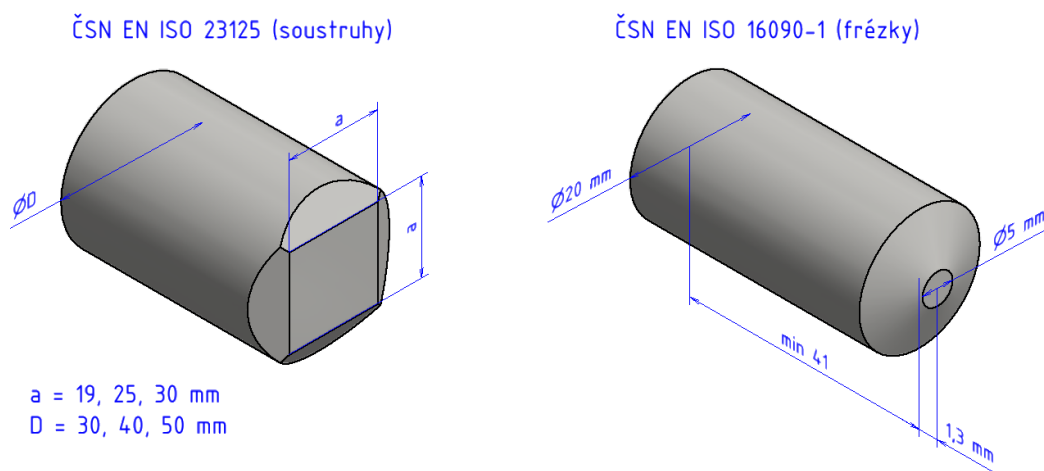
kde $B [m]$ je maximální průměr rotačního elementu a $n [s^{-1}]$ je frekvence otáčení. V případě frézovacích strojů, kde je rotujícím elementem pouze nástroj, je dle ČSN EN ISO 16090-1 maximální obvodová rychlost stanovena jako maximální řezná rychlost v_c

² Přílohy v technických normách rozdělujeme podle závaznosti na informativní a normativní. Normativní příloha je závazná a informativní příloha není, ale pokud je použita, musí být dodržena v úplném znění. [30] [15]

a zřejmě z toho důvodu přejímá i norma ČSN EN ISO 14120 značení v_c (cutting) pro obvodovou nikoliv řeznou rychlost.

Projektily používané k těmto zkouškám se tvarově a rozměrově liší pro zkoušky krytů soustružnických a frézovacích strojů viz Obrázek 12. V obou případech však musí splňovat tato kritéria:

- | | |
|-----------------------------|---|
| • Pevnost v tahu | $R = 560 - 690 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ |
| • Mez kluzu | $R_{0,2} = 560 - 690 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ |
| • Prodloužení při přetržení | $A = 20\%$ |
| • Tvrdost | 56_{-0}^{+4} HRC v hloubce minimálně 0,5 mm |

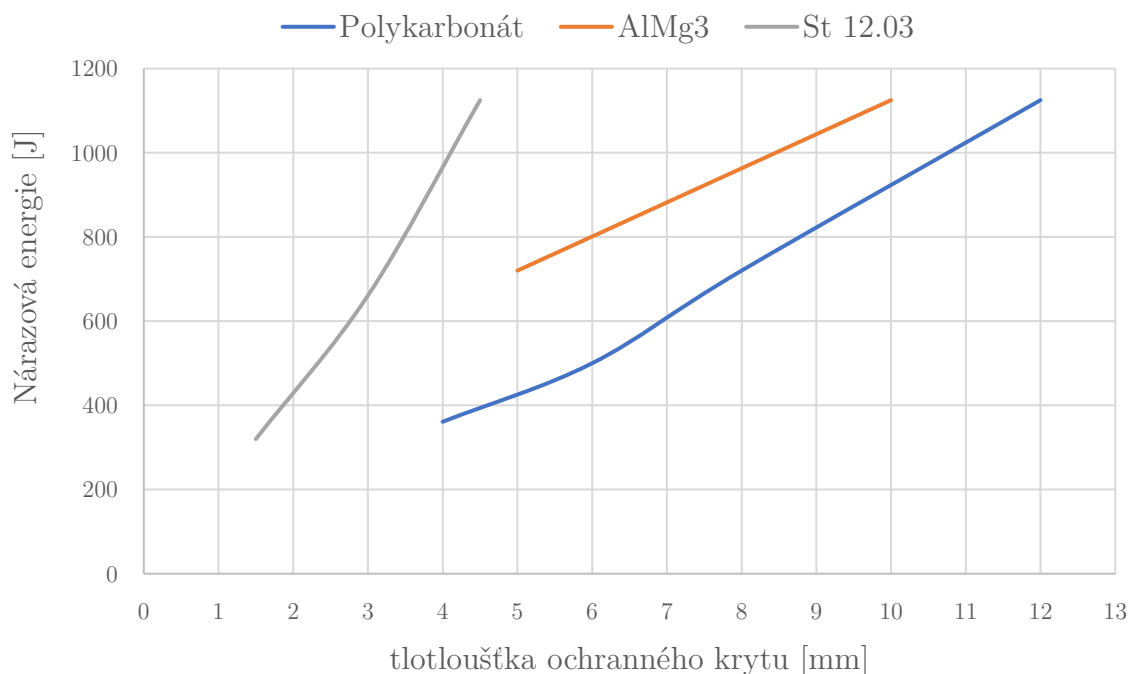


Obrázek 12 - - Projektily používané ke zkouškám průrazu

Nejzásadnějším parametrem projektilu je jeho hmotnost, která je v případě zkoušení krytů frézovacích strojů 0,1 kg. V případě zkoušek krytů soustružnických strojů existují třídy odolnosti (A, B a C), podle kterých jsou rozměry projektilu různé viz Obrázek 12 a hmotnost se vždy zdvojnásobuje - 0,625 kg, 1,25 kg a 2,5 kg. Každá třída odolnosti má 3 podtřídy (např. A₁, B₃), které udávají rychlost nárazu projektilu. Každá z 9 tříd tedy odpovídá určité kinetické energii nárazu.

Vyhodnocování zkoušky má přesně definovaná kritéria, která se klasifikují podle vzhladu. Zkouška je vyhovující, pokud je ochranný kryt plasticky deformován bez prasklin nebo dojde k povrchovému prasknutí (viditelné jen na jednom povrchu). Ochranný kryt zkoušce nevyhoví, pokud dojde k jakémukoliv poškození, při kterém prošel projektil skrz zkoušený objekt. Dále nesmí dojít k uvolnění průhledového okna z upevnění, uvolnění celého ochranného krytu z opěry nebo odletu jakýchkoliv vnějších částí krytu. Po vyhodnocení výsledků musí být vyhotoven protokol o zkoušce obsahující mimo všechny patřičně formality také údaje o projektilu (hmotnost, rozměry, rychlost a nárazovou energii) a zkoušeném objektu (materiál, rozměry a upnutí). [15] [17] [18]

Z výsledků těchto zkoušek vyplývá, že energie nárazu, které je schopné krytování odolat, je přímo úměrná jeho tloušťce. Při nárůstu rozměrů obráběcího stroje je proto důležité vzít v úvahu nárůst hmotnosti krytování způsobený nejen větší plochou krytu, ale také požadavkem na jeho tloušťku v souvislosti s potenciálně vyšší nárazovou energií rotujících částí.



Obrázek 13 - Graf závislosti maximální přípustné nárazové energie na tloušťce materiálu dle tabulky orientačních výsledků praktických zkoušek v příloze B, ČSN EN ISO 16090-1

Konstrukci vnějšího krytování obráběcích strojů nelze podceňovat a při jeho dimenzování je nutné se příslušnými normami řídit. Konstrukce vyhovující těmto požadavkům tak může způsobovat značnou hmotnost krytování, která se nepříznivě projeví v případě vezeného krytování a může zhoršovat dynamické vlastnosti celého stroje.

4 Praktická část – simulační experimenty stroje s aktivní kabinou

Předmětem řešení je pohyb ochranné kabiny obráběcího stroje a nejprve je tedy zapotřebí se s tímto obráběcím strojem blíže seznámit. Jeho nepříznivými vlastnostmi jsou vysoká hmotnost pohyblivých částí ve směru osy x a tím způsobený přenos setrvačných sil do obráběcího procesu. Jsou proto kladeny požadavky na zlepšení dynamiky stroje při obrábění a zvýšení přesnosti a kvality obráběného povrchu.

4.1 Uvažovaný obráběcí stroj

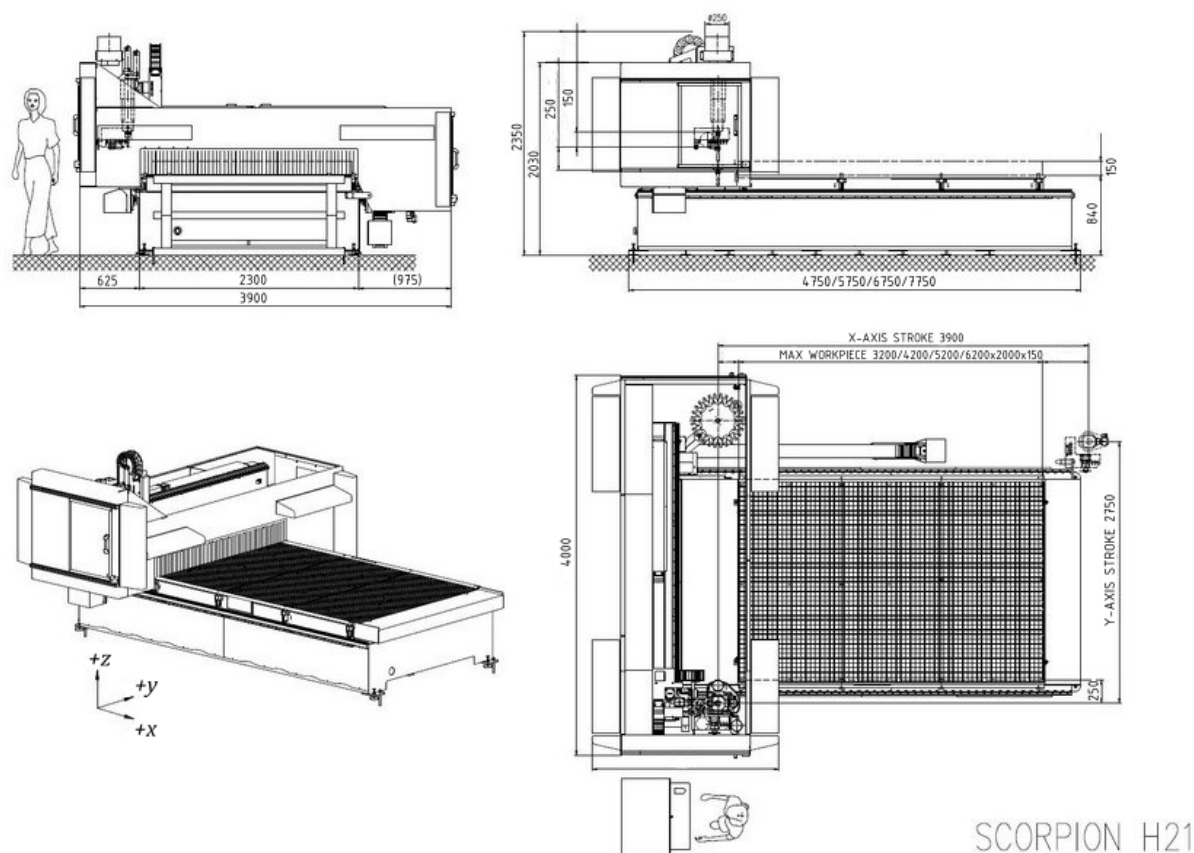
Uvažovaným obráběcím strojem je tříosé CNC dřvoobráběcí centrum s portálovou konstrukcí a rastrovým stolem určené pro výrobu nábytkových dílů a formátování deskových materiálů (tzv. nesting machine). Základní konstrukce stroje je tvořena svařenci z plechových výpalků, které jsou žíhané a následně obrobené.



Obrázek 14 - CNC obráběcí centrum Scorpion od výrobce Houfek a.s. [19]

Vnější ochranné krytování je zajištěno vezenou kabinou pevně spojenou s portálem s průhledy z bezpečnostního skla. Uchycení obrobku zajišťuje vakuová pumpa s maximálním průtokem $250 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$, která tvoří podtlak mezi rastrovým stolem a obráběnou deskou a přisává tak obrobek ke stolu. Stroj je schopný obrábět polotovary do výšky 150 mm a je nabízen v různých variantách velikosti rastrového stolu uvedených společně s dalšími základními rozměry na následující straně viz Obrázek 15. Na základě hmotnosti celého stroje 4000 kg, kterou orientačně uvádí výrobce, byla odhadnuta hmotnost samotné portálové konstrukce na 800 kg a hmotnost kabiny na 600 kg.

Dalším důležitým parametrem je maximální rychlost posuvů jednotlivých os, která činí $35 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pro osu z a $70 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pro osy x a y. Osa x je poháněna servomotorem na jedné straně portálu o výkonu 1,5 kW, jehož rotační pohyb je převáděn na translační pomocí kombinace pastorku a ozubeného hřebenu. Řízení stroje zajišťuje profesionální řídicí systém, jehož pracovní prostředí je zobrazováno na LCD monitoru umístěném ve skříni rozvaděče a ovládání je zajištěno pomocí přenosného ručního ovladače. Stroj disponuje automatickou výměnou nástrojů s rotačním zásobníkem, který má 7 pozic, a je vybaven 6 vertikálními vřeteny pro vrtací a frézovací nástroje a 2 horizontálními vřeteny pro pilové kotouče. Vřetena mohou být o výkonech 4,6 kW nebo 12 kW a volitelně jsou také nabízena jako plovoucí. Mezi další volitelnou výbavu stroje patří příprava na osu C či automatické nakládání a vykládání obrobku. [19]



Obrázek 15 - Základní rozměry a směry jednotlivých os CNC obráběcího centra Scorpion [19]

4.2 Popis simulačního experimentu

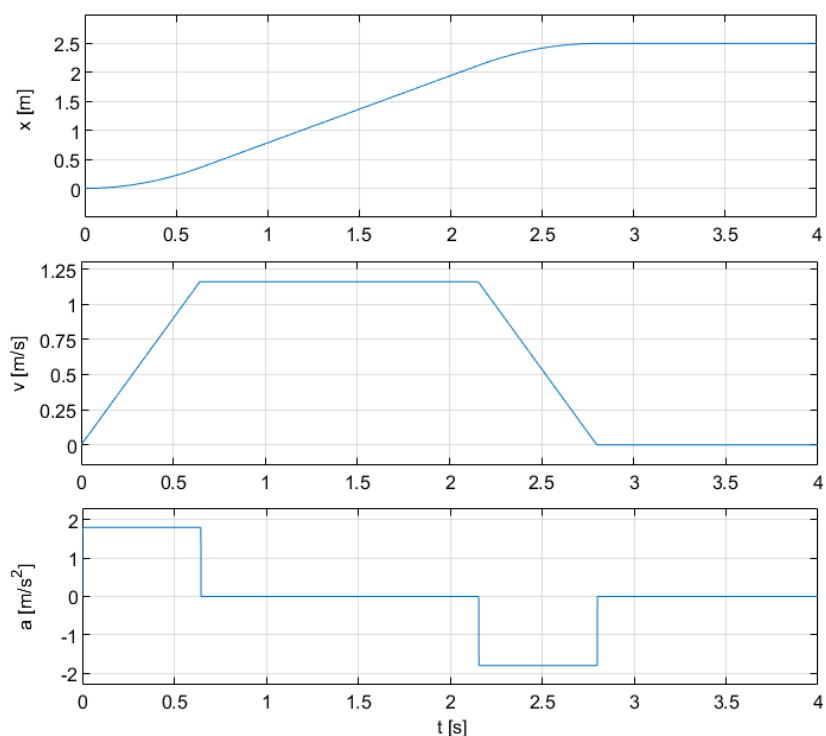
Řešení bude rozděleno na tyto 3 základní varianty:

- Stroj se stávající vezenou kabinou, která je pevnou součástí portálu
- Stroj s pasivní oddělenou kabinou spojenou s portálem přes tlumič a pružinu
- Stroj s aktivní oddělenou kabinou s vlastním pohonem.

Pro každou z variant bude provedena simulace pohybu po zadané trajektorii tak, aby bylo možné tyto 3 varianty porovnat z hlediska energetických a dynamických požadavků na pohon osy x tohoto stroje.

Nejprve bude určeno zadání trajektorie pohybu portálu. Dále budou pro každou ze 3 variant sestaveny zjednodušené jednorozměrné mechanické modely, které budou přejímat reálné parametry stroje. Budou určeny vlastní pohybové rovnice daného systému, ze kterých je dále možné sestavit simulační model v Simulinku, kde zadaná trajektorie bude dodržována pomocí regulátorů. Výsledkem simulace bude průběh požadované síly pro dodržení této trajektorie. Požadovaná síla je dobrým měřítkem pro porovnání jednotlivých variant, protože právě ze síly, která odpovídá krouticímu momentu na hřídeli motoru, se vychází v konstrukčním návrhu pohonu.

První trajektorií, na které budou jednotlivé varianty prezentovány, je rychloposuv portálu z bodu A do bodu B, který představuje nejvyšší nároky dynamických požadavků na pohon. Tato trajektorie se skládá ze 3 částí: Rovnoměrně zrychlený pohyb na maximální rychlost $70 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ($1,1\bar{6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), rovnoměrný přímočarý pohyb a rovnoměrně zpomalený pohyb do úplného zastavení. Celková vzdálenost pohybu bude $2,5 \text{ m}$ požadované zrychlení a zpomalení bude mít hodnotu $1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.



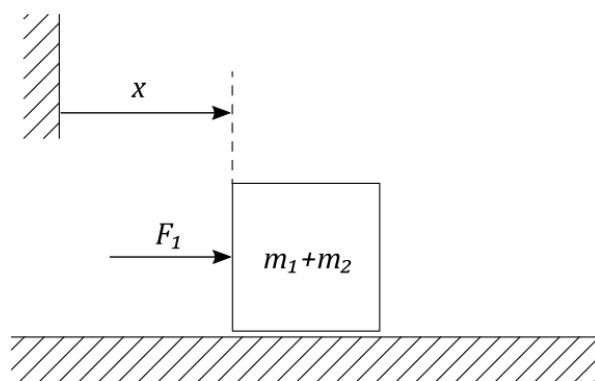
Obrázek 16 – Požadovaný časový průběh polohy, rychlosti a zrychlení při rychloposuvu

Dalším scénářem pohybu pak bude trajektorie portálu při obráběcí operaci, konkrétně obrábění otvoru, dále rozvedena a popsána v kapitole 4.6. Dalším dobrým měřítkem pro porovnání může být celková vynaložená mechanická práce, která reprezentuje energetickou náročnost provozu stroje, a bude tak v poslední kapitole pro jednotlivé varianty porovnávána.

K numerickému řešení vzniklých diferenciálních rovnic bude použit software Matlab Simulink. Matlab jakožto vyšší programovací jazyk je v technické praxi hojně využíváný pro vědecké výpočty, analýzu a vizualizaci dat a vývoj algoritmů pro jeho jednoduchý syntax a rozsáhlou knihovnu funkcí. Simulink je uživatelsky přívětivou a názornou nadstavbou, která se využívá k tvorbě simulačních modelů ve formě blokových schémat. Každý blok zde představuje matematickou či jinou operaci, která manipuluje se vstupním signálem. Kombinací těchto bloků je pak možné simulovat dynamický systém.

4.3 Tradiční ochranná kabina

Pohyb stroje v ose x s tradiční vezenou kabinou, která je pevnou součástí portálu, může být za předpokladu dostatečné tuhosti portálu, kabiny a jejich spojení nahrazen přímočarým pohybem hmotného bodu o hmotnosti $m_1 + m_2$, kde m_1 je hmotnost portálu a m_2 hmotnost ochranné kabiny. Pro jednoduchost řešení bylo zanedbáno tření ve vedení portálu a všechny ostatní pasivní odporové účinky. Pohon osy x byl nahrazen silou F_1 a vzniká tak následující náhradní model.

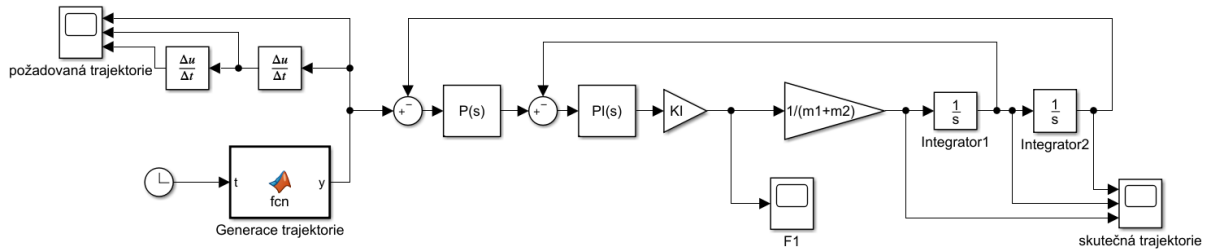


Obrázek 17 - Náhradní model stroje s tradiční vezenou kabinou

Z 2. Newtonova pohybového zákona přímo plyne vlastní pohybová rovnice tohoto systému v následujícím tvaru.

$$(m_1 + m_2) \ddot{x} = F_1 \quad (3)$$

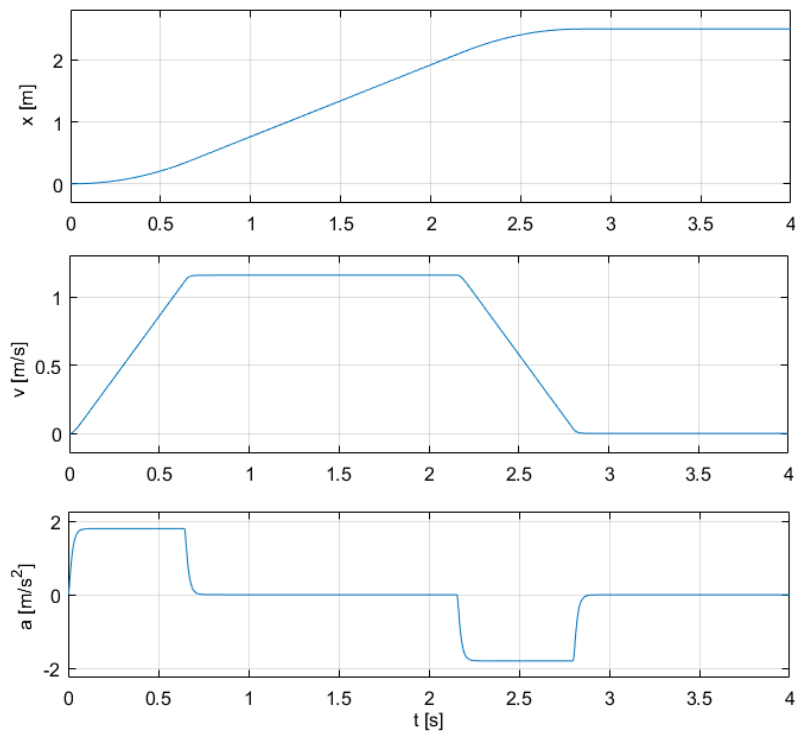
Řešení této lineární diferenciální rovnice druhého řádu s konstantními koeficienty lze pro zadanou trajektorii bez problému analyticky nalézt dvojnásobnou derivací polohy. Při znalosti zrychlení pak síla přímo vychází z rovnice (3), má průběh totožný se zrychlením a dosahuje velikosti 2520 N . Sestavený simulační model v prostředí MATLAB Simulink pro tuto variantu je vyobrazen na následující straně.



Obrázek 18 – Simulační model tradiční vezené kabiny

Trajektorie je generována vloženou funkcí na levé straně modelu a vstupuje jako referenční hodnota do regulační smyčky. V našem případě, kdy pohonem osy je servomotor, byla použita kaskádní regulace, která bývá použita i v reálném řídicím systému servomotorů a má v tomto případě dvě smyčky. Vnitřní smyčka na úrovni rychlosti, která odpovídá přes konstantu úměrnosti K_I proudu, obsahuje regulátor typu PI, neboť pro dosažení nulové trvalé regulační odchylky je nezbytná integrační složka regulátoru a pro dosažení uspokojivých výsledků u takto jednoduchého modelu není nutné využívat derivační složku. Vnější, polohová smyčka obsahuje pouze proporcionální regulátor, protože integrační složka je již obsažena ve smyčce vnitřní.

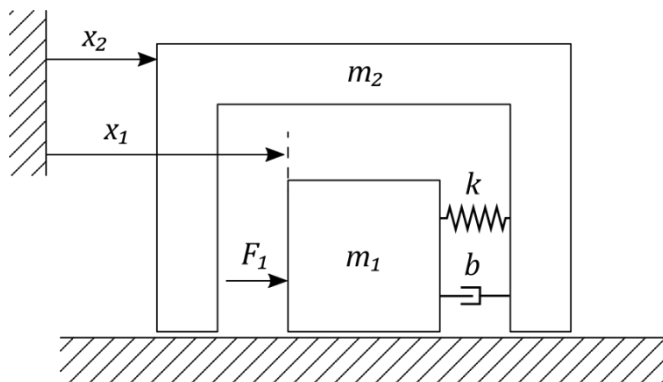
Parametry regulátorů byly nastaveny nejdříve na vnitřní a potom na vnější smyčce za pomoci *PID tuner app* v uživatelském prostředí Simulink tak, aby se přechodová charakteristika soustavy ustálila v řádu 0,01 s. Průběh skutečné trajektorie tak téměř dokonale sleduje průběh požadovaný, avšak bez nekonečně velkých změn zrychlení.



Obrázek 19 – Časový průběh skutečné polohy, rychlosti a zrychlení portálu s vezenou kabinou

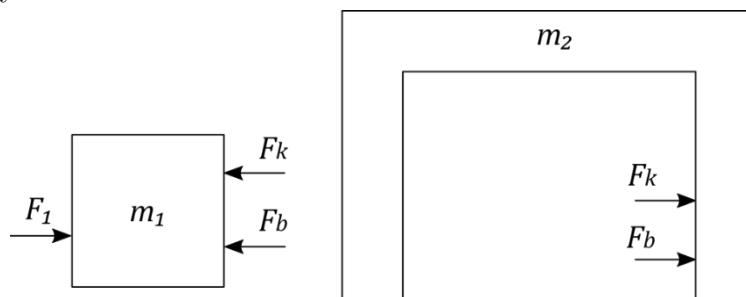
4.4 Pasivní oddělená kabina

V dalším případě byl uvažován model, kdy kabina zůstává pasivní a k pohybu využívá pohon portálu nahrazený silou F_1 . Kabina je spojena s portálem přes pružinu o tuhosti k a lineární tlumič se součinitelem tlumení b . Při zavedení stejných zjednodušení jako v předchozím případě a označení souřadnic portálu x_1 a kabiny x_2 vzniká tlumený kmitavý systém s 2 stupni volnosti a kinematickým buzením dle následujícího modelu.



Obrázek 20 - Náhradní model stroje s pasivní oddělenou kabinou

Dále bylo provedeno uvolnění těles, podle kterého budou sestaveny vlastní pohybové rovnice tohoto systému.



Obrázek 21 - Uvolnění pasivní oddělené kabiny a portálu

Při zavedení předpokladu pohybu $x_1 > x_2$ platí pro sílu v pružině

$$F_p = k(x_1 - x_2) \quad (4)$$

a pro tlumící sílu

$$F_b = b(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (5)$$

a vlastní pohybové rovnice pak mají následující tvar.

$$m_1 \ddot{x}_1 = F_1 - k(x_1 - x_2) - b(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (6)$$

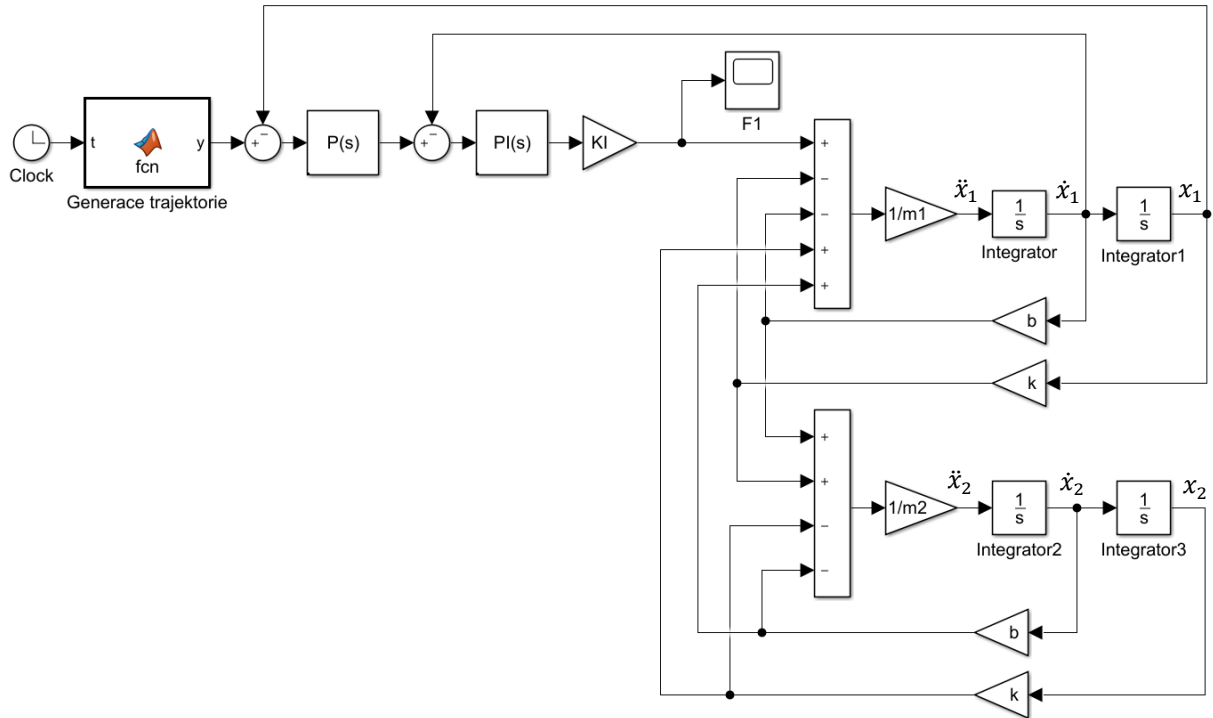
$$m_2 \ddot{x}_2 = k(x_1 - x_2) + b(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (7)$$

Simulační model této soustavy byl sestaven vyjádřením \ddot{x}_1 a \ddot{x}_2 jako součet jednotlivých členů dle vztahů (8) a (9) na následující straně.

$$\ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1} (F_1 - kx_1 + kx_2 - b\dot{x}_1 + b\dot{x}_2) \quad (8)$$

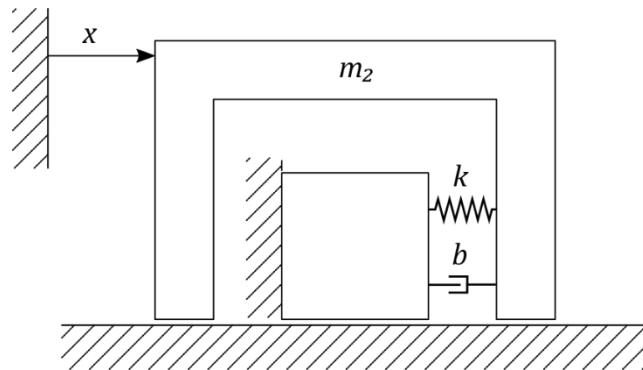
$$\ddot{x}_2 = \frac{1}{m_2} (kx_1 - kx_2 + b\dot{x}_1 - b\dot{x}_2) \quad (9)$$

Pomocí sčítacích bloků tak vzniká vzájemně provázané schéma soustavy s dvěma stupni volnosti, kde řízení je opět pohon portálu vyjádřen silou F_1 pomocí kaskádní regulace pro dosažení požadované trajektorie. Pro lepší přehlednost modelu byly odstraněny bloky *scope*, které slouží k vizualizaci získaných dat.



Obrázek 22 - Simulační model stroje s pasivní oddělenou kabinou

Před samotnou simulací je však nejprve nutné určit tuhost pružiny k a součinitel tlumení b . Portál je vázán k základnímu rámu stroje prostřednictvím tuhého pastorku a hřebenu a pro určení těchto parametrů je tak uvažován portál za tuhý rám. Vzniká tak soustava pouze s 1 stupněm volnosti podle následujícího modelu.



Obrázek 23 - Náhradní soustava s 1 stupněm volnosti

Volné tlumené kmitání tohoto systému s 1 stupněm volnosti lze popsat rovnicí

$$m_2 \ddot{x} + b \dot{x} + kx = 0 \quad (10)$$

nebo také ve tvaru s poměrným útlumem ξ a vlastní úhlovou frekvencí netlumených kmitů ω_0 podle následujícího vztahu.

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0 \quad (11)$$

Kořeny charakteristické rovnice této lineární diferenciální rovnice 2 řádu s konstantními koeficienty jsou určeny vztahem na následující straně.

$$\lambda_{1,2} = \omega_0(-\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1}) \quad (12)$$

Aby nebyly do portálu a tím do obráběcího procesu vnášeny nežádoucí kmity, je nutné získat soustavu s nadkriticky tlumenou, tedy takovou jejíž kořeny jsou čistě reálné, a musí tedy pro poměrný útlum platit

$$\xi > 1 \quad (13)$$

Z rovnic (10) a (11) pro poměrný útlum plyne

$$\xi = \frac{b}{2\sqrt{k \cdot m_2}} \quad (14)$$

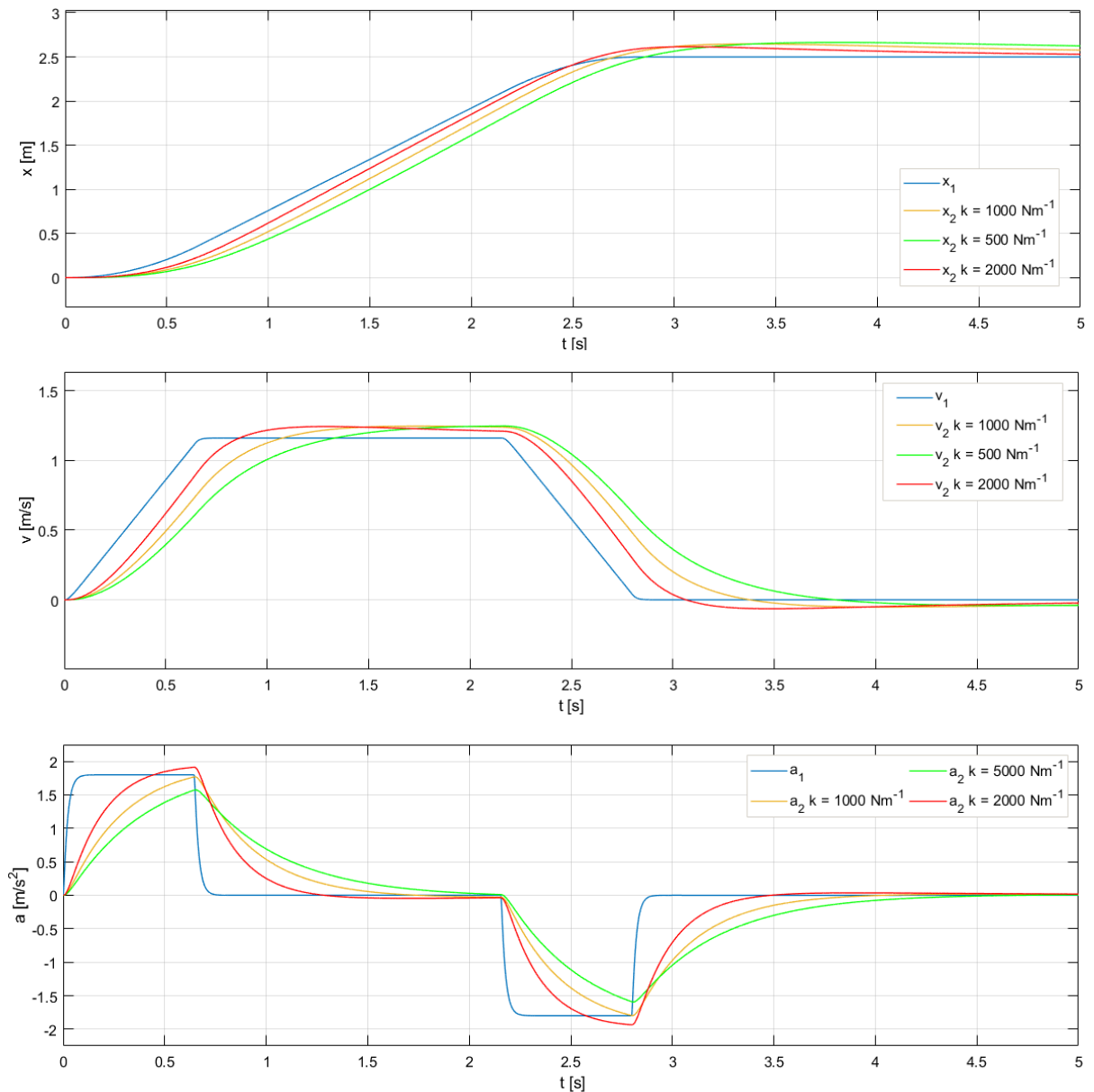
a pro nadkriticky tlumené kmitání je tedy nutné, aby pro platilo následující.

$$b > 2\sqrt{k \cdot m_2} \quad (15)$$

Součinitele tlumení tedy musí být zvolen v souladu s touto podmínkou, avšak volba konkrétní hodnoty již není jinak určena a ovlivní charakter chování soustavy. Čím více bude soustava tlumená, tím více bude pohyb kabiny kopírovat portál, ale stejně tak lze toto chování ovlivnit nastavením různé tuhosti pružiny. Na základě nejlepších výsledků dále neprezentovaných experimentů byl součinitel tlumení byl zvolen podle vztahu

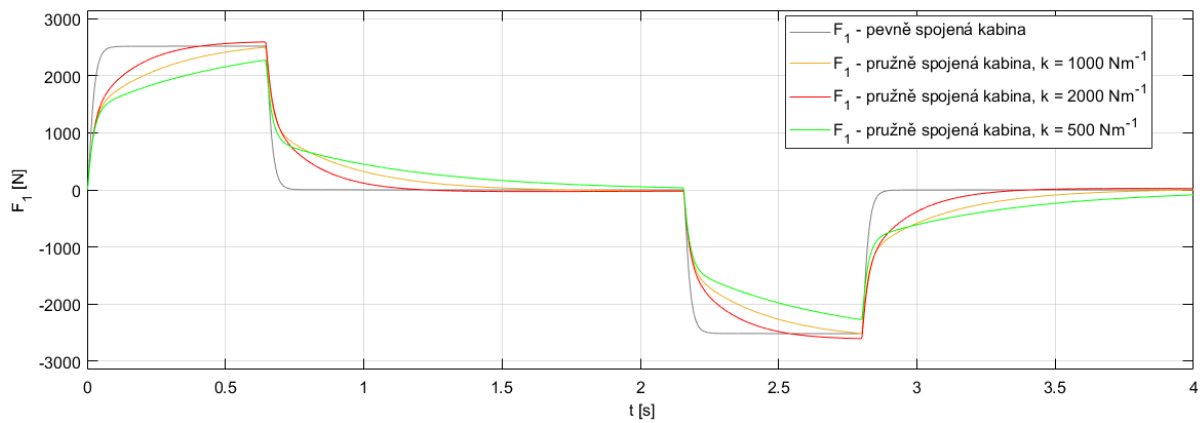
$$b = 1,5 b_{krit} = 1,5 \cdot 2\sqrt{k \cdot m_2} \quad (16)$$

a jediným volitelným parametrem tak zůstává tuhost pružiny k . Chování soustavy bylo simulováno s různými hodnotami tuhostí a výsledky jsou zobrazeny na následující straně.



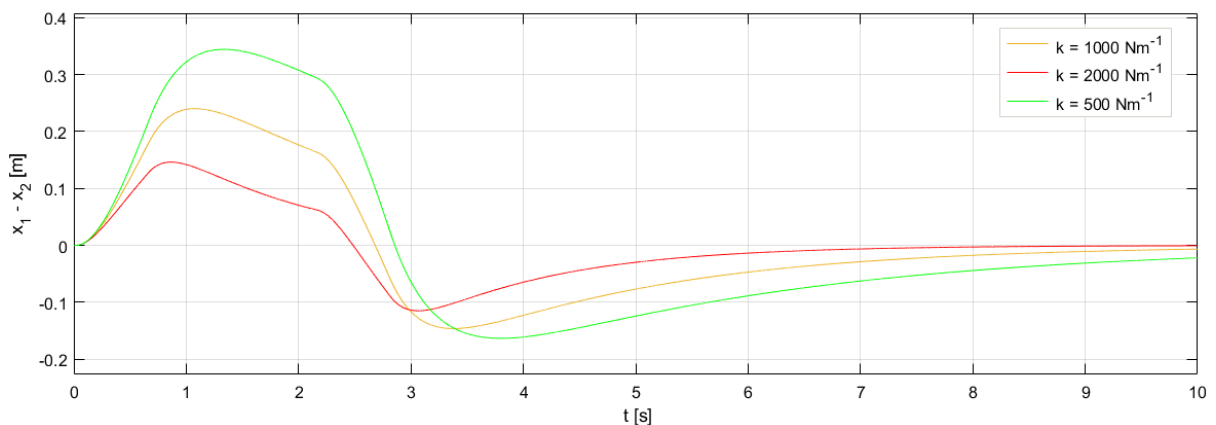
Obrázek 24 - Časové průběhy polohy, rychlosti a zrychlení portálu (1) a kabiny (2) s různými hodnotami tuhostí pružiny

Z průběhů polohy, rychlosti a zrychlení je vidět, že portál díky regulaci stále dodržuje předepsanou trajektorii, kabina však portál následuje s určitým zpožděním. Nastavením tuhosti pružiny je vlastně určováno zrychlení kabiny, které ovlivňuje požadovanou sílu pohonu portálu potřebnou k dosažení jeho požadované trajektorie. Požadovaná síla je vynesena pro různé varianty tuhosti pružiny společně s požadovanou silou varianty pevně spojené vedené kabiny v grafu viz Obrázek 25 na následující straně.



Obrázek 25 – Porovnání průběhů síly F_1 pro variantu s pevně spojenou kabinou a variantou s odpružením s různými hodnotami tuhostí pružiny

Je vidět, že varianta s odpruženou kabinou klade z počátku zrychlování nižší nárok na sílu, který však s dalším zrychlováním roste, a konkrétní průběh síly závisí na tuhosti pružiny. Varianta s vyšší tuhostí (červeně) překročí hodnotu síly 2520 N a klade tak vyšší nárok na pohon portálu, zatímco varianta s nižší tuhostí (zeleně) této hodnoty nedosáhne a přináší tak úsporu. Je však zapotřebí brát v úvahu rozdíl poloh portálu a kabiny (viz Obrázek 26), který v tomto případě dosahuje hodnoty kolem 350 mm. Tento rozdíl bude tak považován za nepřijatelný z důvodu možné kolize komponent portálu s kabinou.

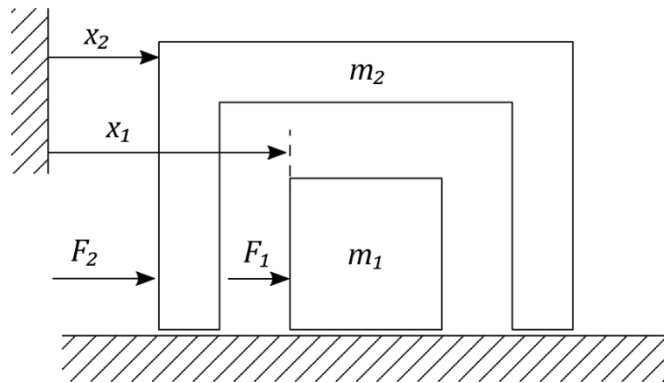


Obrázek 26 - Časový průběh rozdílu polohy portálu a kabiny pro různé hodnoty tuhostí pružiny

Varianta se střední tuhostí 1000 Nm^{-1} (oranžově) dosahuje přípustného rozdílu poloh portálu a kabiny, avšak dosahuje téměř stejné maximální hodnoty požadované síly. Je nutné zmínit, že zadaná trajektorie rychloposuvu vyjadřuje pouze nejhorší možný scénář pohybu z hlediska dynamických požadavků a lze očekávat, že při standartních posuvech stroje při obrábění (např. kruhového otvoru) by odpružená kabina úsporu síly přinášela.

4.5 Aktivní oddělená kabina

Návrh aktivní kabiny vychází z varianty pasivně oddělené kabiny, ale odpružení a tím určované zrychlení kabiny zde není realizováno mechanickým spojením, ale na úrovni řídicího systému dvou nezávislých pohonů. Portál a kabina jsou v tomto případě úplně odděleny, pohon portálu je stále realizován silou F_1 a navíc je zde pohon kabiny realizován silou F_2 . Při stejných zjednodušeních jako v předchozích případech vzniká tento mechanický model.

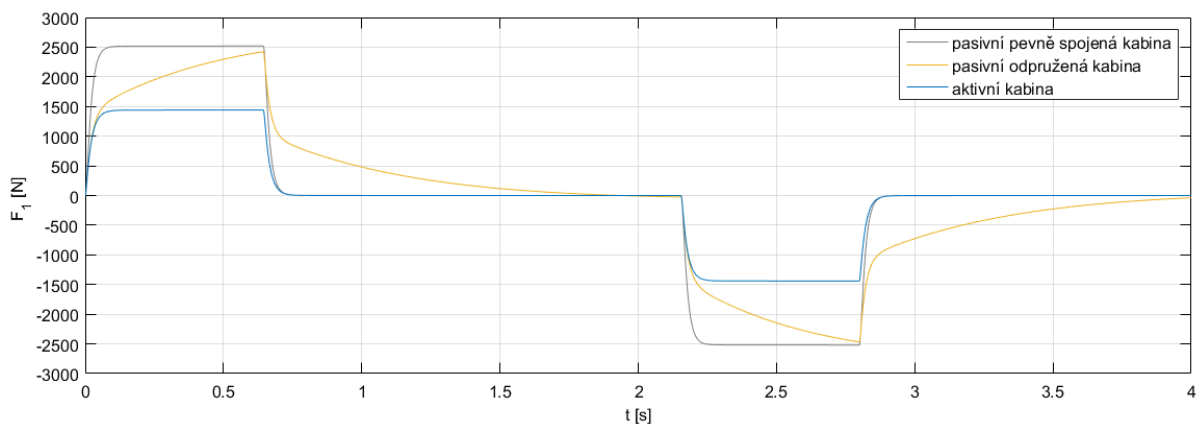


Obrázek 27 - Náhradní model stroje s aktivní kabinou

Vlastní pohybová rovnice portálu bude tedy mít tvar

$$m_1 \ddot{x} = F_1 \quad (17)$$

a pokud bude porovnáván nárok na stávající pohon portálu a tedy sílu F_1 , může k tomu být využit stejný simulační model jako pro tradiční vezenou kabinu (viz Obrázek 18) s tím, že je zde zadána pouze hmotnost portálu m_1 .



Obrázek 28 – Porovnání průběhů sil F_1 pro všechny varianty

Je evidentní, že síla bude nižší přímo úměrně nižší hmotnosti. Na pohon portálu jsou tedy v tomto případě kladeny nižší nároky, ale je nutné brát v úvahu i sílu F_2 , kterou je potřeba působit k pohybu kabiny, která musí u takto zadané trajektorie následovat portál.

Pokud však bude zadanou trajektorií pohybu pojezd při obrábění, tedy pohyb v řádově menších vzdálenostech, může kabina portál sledovat s výrazně nižším zrychlením nebo dokonce stát na místě. V takovém případě by bylo porovnání sil F_1 mezi jednotlivými variantami směřodonné.

4.6 Trajektorie při obrábění

Jako příklad trajektorie při obrábění byla zvolena výroba otvoru o průměru 240 mm frézovacím nástrojem. Otvor lze nejjednodušším způsobem vyrobít obkroužením obvodu požadovaného otvoru, kdy uprostřed otvoru zůstává zbytek polotovaru. Tento zbytek v našem případě zůstane prisátý k rastrovému stolu, a to může být v některých případech nežádoucí. Jinou strategií obrábění může být úplné obrobení otvoru pohybem frézy po spirále. Při tomto obráběcím cyklu se nejprve fréza zavrtá do materiálu nebo je využit již předvrtaný otvor a pak se pohybuje po spirále pro dosažení požadovaného průměru. Z technologického hlediska je důležité, aby se fréza pohybovala s konstantní obvodovou rychlostí. S měnícím se poloměrem spirály a konstantní úhlovou rychlostí by obvodová rychlost narůstala a musí se tedy měnit úhlová rychlost pohybu. Je-li zaveden součinitel zvětšení poloměru u , který odpovídá úběru materiálu na otáčku, pro poloměr platí vztah

$$r(t) = u \cdot \varphi(t) \quad (18)$$

a úhlová rychlost je rovna

$$\omega(t) = \frac{v}{r(t)} = \dot{\varphi}(t) \quad (19)$$

Vzájemným dosazením rovnic (16) a (17) vzniká nelineární obyčejná diferenciální rovnici prvního řádu pro úhel natočení

$$\dot{\varphi}(t) = \frac{v}{u \cdot \varphi(t)} \quad (20)$$

jejíž řešení lze nalézt ve tvaru

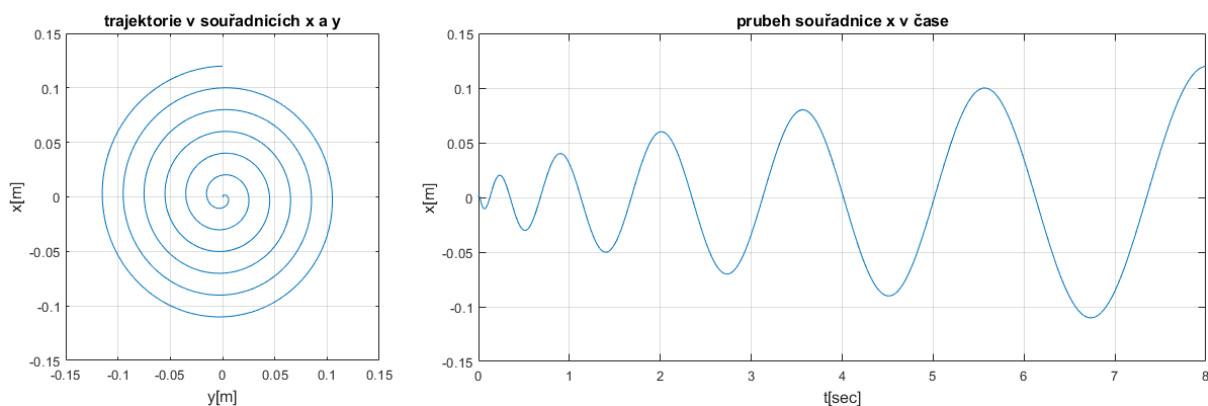
$$\varphi(t) = \frac{v}{u} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{t} \quad (21)$$

Pro získání polohy portálu v osách x a y pak stačí dosadit získané vztahy pro poloměr a úhel natočení do následujících vztahů.

$$x(t) = r(t) \cdot \cos(\varphi(t)) \quad (22)$$

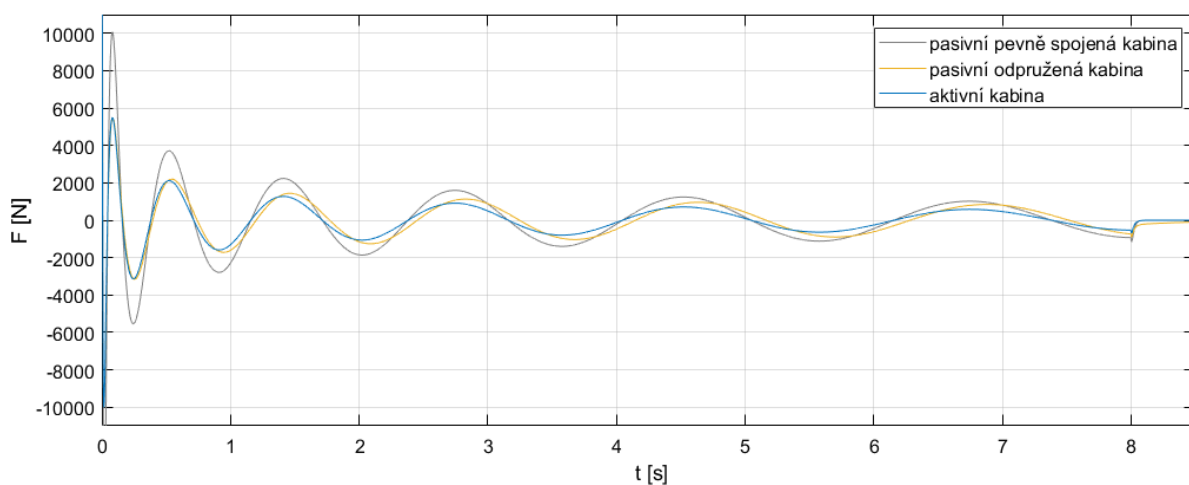
$$y(t) = r(t) \cdot \sin(\varphi(t)) \quad (23)$$

Předpokládá se, že tato trajektorie slouží pouze k dosažení požadovaného průměru a následně bude otvor obroben na stejný průměr po celém obvodu. Při zvolené obvodové rychlosti $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a zvětšení poloměru 20 mm na otáčku bude mít zadaná trajektorie následující tvar.



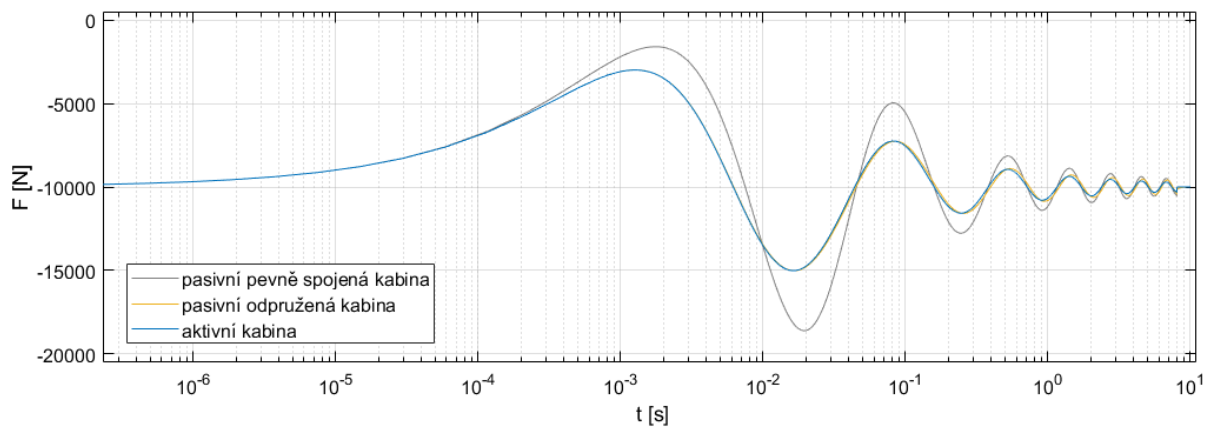
Obrázek 29 – Trajektorie obrábění otvoru

Portál dosahuje maximální výchylky 120 mm z počáteční polohy a předpokládá se, že aktivní kabina může zůstat v případě této trajektorie portálu nehybně stát. Může tedy být mezi jednotlivými variantami přímo porovnávána síla F_1 jakožto dynamický požadavek pro pohyb stroje po této trajektorii.



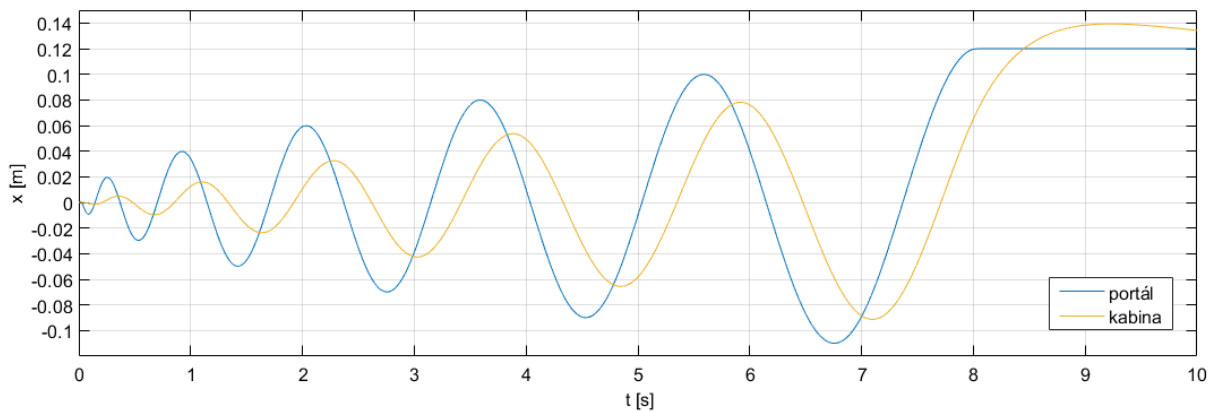
Obrázek 30 - Průběh síly pro trajektorii obrábění otvoru

Požadovaná síla má kmitavý průběh se stejnou proměnnou periodou jako průběh souřadnice, avšak amplituda síly se snižuje z důvodu nižších zrychlení na větších poloměrech pohybu. Z počátku pohybu v nulovém poloměru vychází z rovnice (17) nekonečně velká úhlová rychlost, která způsobí podle tvrdosti nastavení regulátorů prudký nárůst požadované síly. Nárůst v tomto grafu není vidět, protože se odehrává ve velmi krátkém čase a viditelný je až v grafu na následující straně s logaritmickou stupnicí času. Je nutné dodat, že nárůst síly, který se zde objevuje, by u reálného stroje pravděpodobně nedosahoval takto vysokých hodnot z důvodů dosažení limitů pohonu.



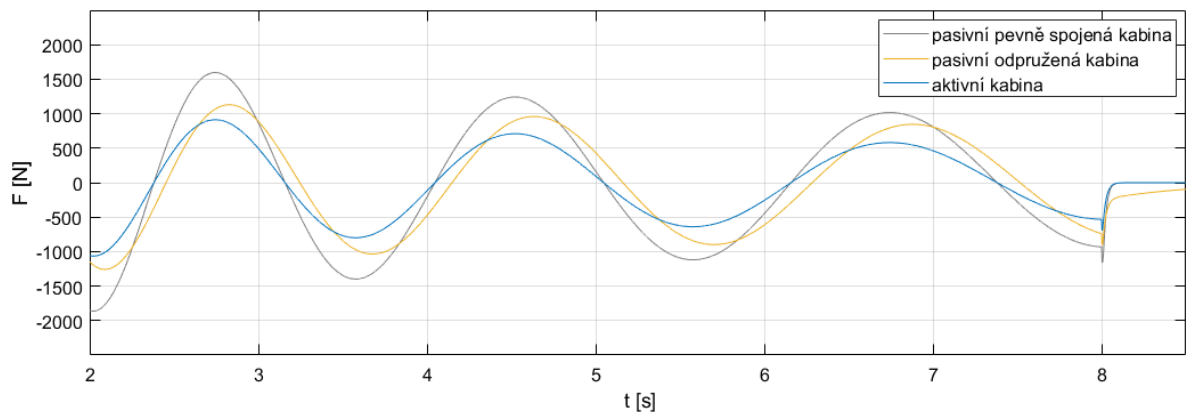
Obrázek 31 - Průběh síly pro trajektorii obrábění otvoru s osou času v logaritmické stupnici

Z tohoto grafu je viditelné, že varianta s pasivní odpruženou kabinou je svým průběhem síly z počátku v podstatě identická s variantou kabiny aktivní a obě tyto varianty dosahují výrazně nižší požadované síly než varianta s pasivní kabinou. Podobnost průběhů je dána faktem, že z počátku cyklu na malých poloměrech pohybu se odpružená kabina pohybuje s výrazně nižšími výchylkami než portál.



Obrázek 32 – Průběh polohy portálu a kabiny při obrábění otvoru

Pokud naopak přiblížíme průběh sil na poslední 3 otáčky spirály, vidíme, že amplituda síly pro variantu s odpruženou kabinou již dosahuje vyšších hodnot než pro kabinu aktivní. Je však stále nižší než pro výchozí variantu s pasivní kabinou.



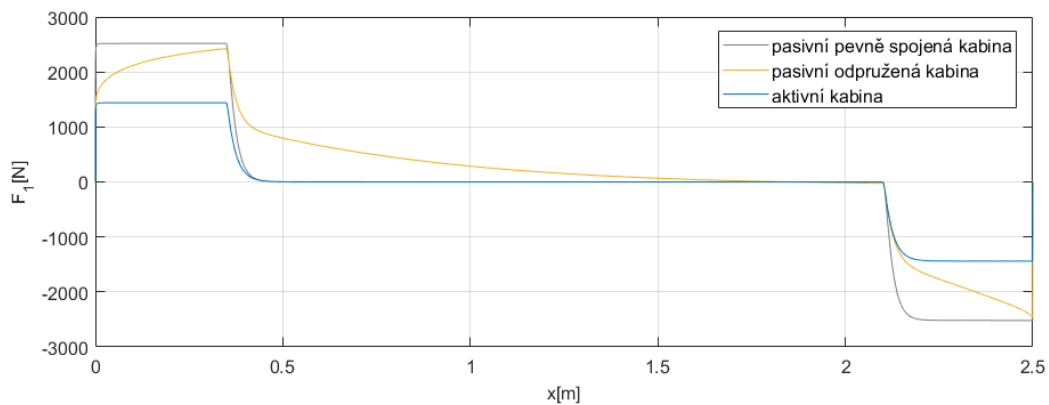
Obrázek 33 - Průběh síly pro trajektorii obrábění otvoru pro poslední 3 otáčky spirály

4.7 Energetické zhodnocení

Dosavadním výsledkem experimentů vždy byl průběh síly v čase, který pouze určuje potřebný okamžitý kroutící moment pohonu, avšak nevypovídá o energetické náročnosti jednotlivých variant. Dalším aspektem hodnocení tedy bude vynaložená mechanická práce pro pohyb stroje po zadané trajektorii, která při zanedbání pasivních odporů vyjadřuje energetickou náročnost. Práce vychází ze vztahu

$$W = \int F(x) dx \quad (24)$$

a potřebujeme tedy pro jednotlivé provedené simulace získat závislost síly na souřadnici portálu. Pro první případ trajektorie, kterým byl rychloposuv portálu, vypadá tato závislost následovně.

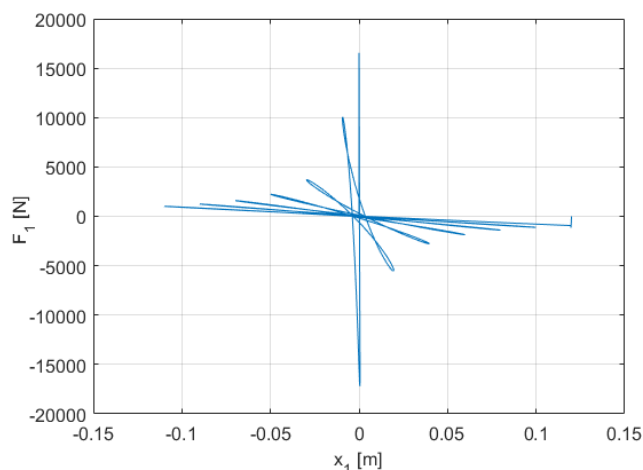


Obrázek 34 – Průběh síly v závislosti na souřadnici portálu při rychloposuvu

K numerické integraci byla použita funkce *trapz* z knihovny Matlabu. Výsledkem je však pro varianty pevně spojené a aktivní kabiny nulová práce a z grafu je viditelné, že plochy pod grafem se skutečně odečtou. Je však nutné vzít v úvahu, že energie při brzdění portálu není v servomotorech rekuperována, ale naopak je nutné práci vynaložit. Záporné hodnoty síly tedy musí být uvažovány jako kladné, a to lze ve výpočtu dosáhnout absolutní hodnotou. Výsledky numerické integrace jsou pak následující.

varianta	pevně spojená kabina	odpružená kabina	aktivní kabina
W	1,883 kJ	1,665 kJ	(1,076 kJ)

K těmto výsledkům je však nutné dodat, že vyjadřují energetické požadavky pouze na pohon portálu, a proto zde není porovnatelná varianta s aktivní kabinou, která využívá k pohybu kabiny přídatný pohon. To však již neplatí pro trajektorii obrábění otvoru, kde aktivní kabina zůstává stacionární. Průběh síly v závislosti na poloze portálu při této trajektorii je vyobrazen na následující straně, a to pouze pro variantu s pevně spojenou kabinou z důvodu lepší přehlednosti.

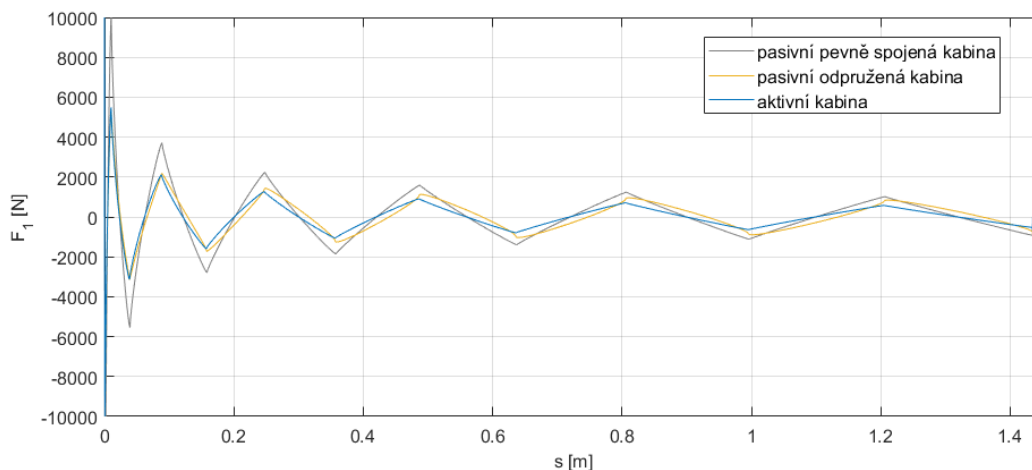


Obrázek 35 - Průběh síly v závislosti na souřadnici portálu při obrábění otvoru pro variantu s pevně spojenou kabinou

Numerickou integraci zde není možné provést, protože není splněna podmínka pouze jedné funkční hodnoty pro každou hodnotu z definičního oboru a průběh tak nelze označit za matematickou funkci. Je tedy zavedena proměnná s , která reprezentuje celkovou vzdálenost, kterou urazí portál během jeho pohybu. Průběh vzdálenosti uražené v čase byl stanoven podle vztahu

$$s(t) = \int |v(t)| dt \quad (25)$$

a průběh síly byl pro všechny varianty vykreslen v závislosti na této vzdálenosti.



Obrázek 36 - Průběh síly v závislosti na uražené vzdálenosti při obrábění otvoru

K výpočtu byla opět použita absolutní hodnota síly z již uvedených důvodů, a výsledky numerické integrace jsou následující.

varianta	pevně spojená kabina	odpružená kabina	aktivní kabina
W	1,288 kJ	0,923 kJ	0,729 kJ

4.8 Shrnutí

Z výsledků provedených simulací vyplývá, že oddělení ochranné kabiny stroje od portálu, pasivně i aktivně, s sebou nese pokles potřebné síly pohonu při zachování identické trajektorie typické obráběcí operace, a při zachování současného pohonu stroje lze proto očekávat zlepšení dynamických vlastností. Dobrým příkladem je právě zmíněné obrábění otvoru, kde pro dosažení příznivých řezných podmínek potřebujeme dosahovat konstantní obvodové rychlosti pohybu frézy, a tedy teoreticky nekonečnou úhlovou rychlost z počátku pohybu. Z výsledků simulací plyne, že tomuto požadavku stroj s aktivní i pasivní oddělenou ochrannou kabinou vyhoví lépe. Navíc při porovnání z energetického hlediska přináší tyto varianty značnou úsporu. Varianta s pasivní kabinou přináší energetickou úsporu 28 %, varianta s aktivní kabinou dokonce přes 43 %.

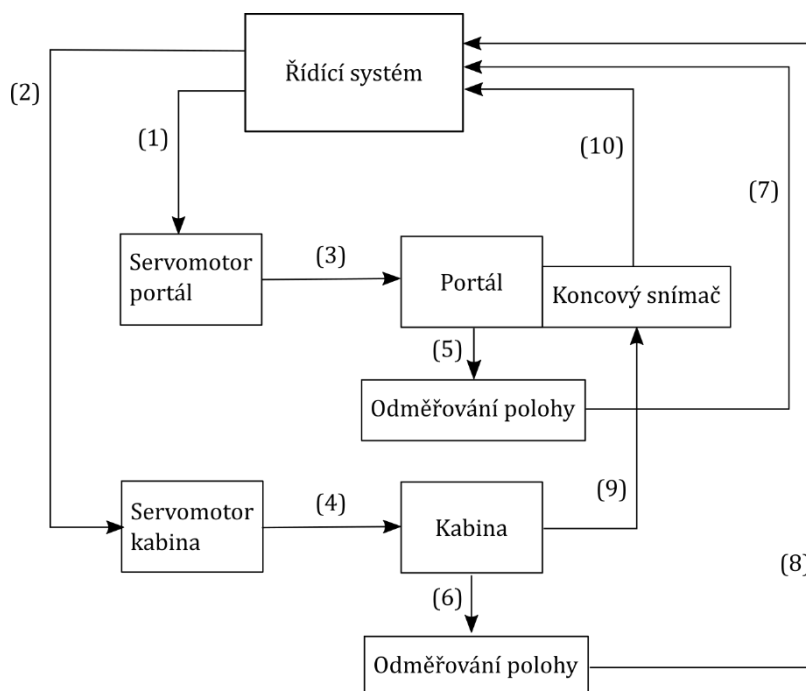
Pasivní oddělená kabina, která vyžaduje bezesporu menší konstrukční zásah, se tedy jeví jako dobré řešení. Její obrovskou nevýhodou je její různé chování pro různé scénáře pohybu, respektive možnost pouze jednoho nastavení tuhosti spojení, které není pro každý scénář optimální. Aktivní kabina se tedy jeví jako nejlepší řešení a bude dále rozpracován její koncepční návrh.

5 Koncepční návrh aktivní kabiny

Základní koncept aktivní ochranné kabiny spočívá v instalaci nezávislého pohonu, kterým bude možné ovládat pohyb kabiny nezávisle na portálu. Aktivní ochranná kabina tak může při malých pojezdech portálu stát na místě nebo portál následovat s nižším zrychlením. Následně bude rozebrán základní princip řízení aktivní ochranné kabiny a dále budou podrobněji rozvedeny požadavky na její konstrukci.

5.1 Funkční struktura konceptu stroje s aktivní kabinou

Princip řízení stroje s aktivní ochrannou kabinou lze výstižně znázornit následujícím blokovým schématem se stručným popisem jednotlivých spojnic.



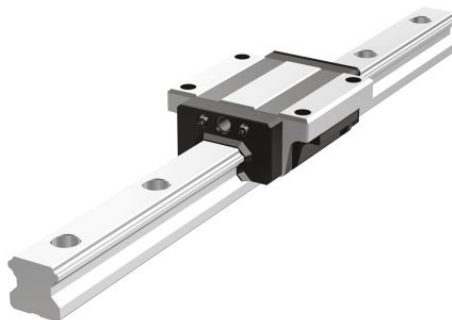
Obrázek 37 – Funkční struktura konceptu stroje s aktivní kabinou

Spojnice (1) a (2) znázorňují řízení vstupního proudu servomotorů, které je v dnešní době realizováno výhradně pulzně šířkovou modulací. Servomotory silově působí na portál a kabinu, což je znázorněno spojnici (3) a (4). Silové působení způsobuje změnu polohy portálu (5) a kabiny (6). Odměřování polohy je zde pro názornost naznačeno samostatnými bloky, avšak reálně bude poloha odečítána z polohových snímačů servomotorů. Informace o poloze je odesílána spojením (7) a (8) zpět do řídicího systému a je tak dokončena zpětnovazební smyčka. Pokud dojde ke kontaktu kabiny s koncovým snímačem umístěným na portálu, což vyjadřuje spojnici (9), je tato informace přenesena do řídicího systému (10), který pohyb stroje zastaví.

Pohon portálu je řízen řídicím systémem pro dodržení požadované trajektorie nástroje při dané obráběcí operaci a řízení pohonu kabiny je obecně takové, aby bylo minimalizováno její zrychlení. Musí při tom však být dodržen takový maximální rozdíl poloh, aby nedošlo ke kolizi kabiny s portálem. Pokud bude rozdíl poloh příliš vysoký a bude vyžadován pohyb kabiny, lze její zrychlení nastavit přímo úměrné rozdílu poloh portálu a kabiny, a pohyb aktivní kabiny tak může být do určité míry ekvivalentem pohybu pasivní pružně spojené kabiny dosahovaného na úrovni softwarového řízení. Tato varianta dosahovala v provedených simulacích uspokojivých výsledků, přičemž její největší nevýhodu lze vyřešit proměnnou virtuální tuhostí spojení. Konkrétní řešení optimalizace řízení aktivní ochranné kabiny je však komplexní problematikou, která je nad rámec této práce.

5.2 Základní návrh konstrukčního provedení

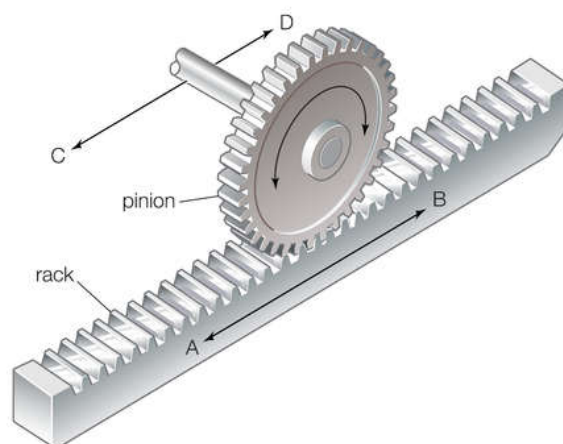
Současná kabina využívá portál jako nosný prvek a aby se mohla pohybovat samostatně, je nejprve nutné zajistit nezávislé uložení kabiny na saních stroje. K tomu je možné využít stávající lineární vedení a uložit kabinu na přídatné vozíky kompatibilní s vedením. Současný stroj využívá následující lineární kuličkové vedení od výrobce THK.



Obrázek 38 – Lineární kuličkové vedení od výrobce THK [31]

Současný pohon portálu je zajištěn pomocí servomotoru, protože servomotory v současnosti představují nejlepší řešení pohonů CNC obráběcích strojů, a pro pohon kabiny by tak bylo vhodné ho použít rovněž. Konkrétní návrh parametrů servomotorů není předmětem této práce, z výsledků provedených simulací však vyplývá, že oba pohony mohou být dimenzovány na nižší kroutící moment než stávající pohon portálu. Použitím servomotorů je rovněž vyřešena problematika odměřování polohy portálu a kabiny, protože polohu lze odečítat přímo z polohových snímačů servomotorů.

Přenos rotačního pohybu výstupního hřídele servomotoru je přenášén na lineární pohyb portálu systémem pastorek – ozubený hřeben. K pohybu aktivní kabiny toho lze využít a instalovat na servomotor kabiny pastorky zabírající se stávajícím ozubeným hřebenem. Hřeben je pevnou součástí rámu stroje a pastorky tak budou vykonávat pohyb C-D znázorněný na následujícím obrázku.



Obrázek 39 – Ilustrace převodu pastorek – ozubený hřeben (reálný převod má šikmé ozubení)

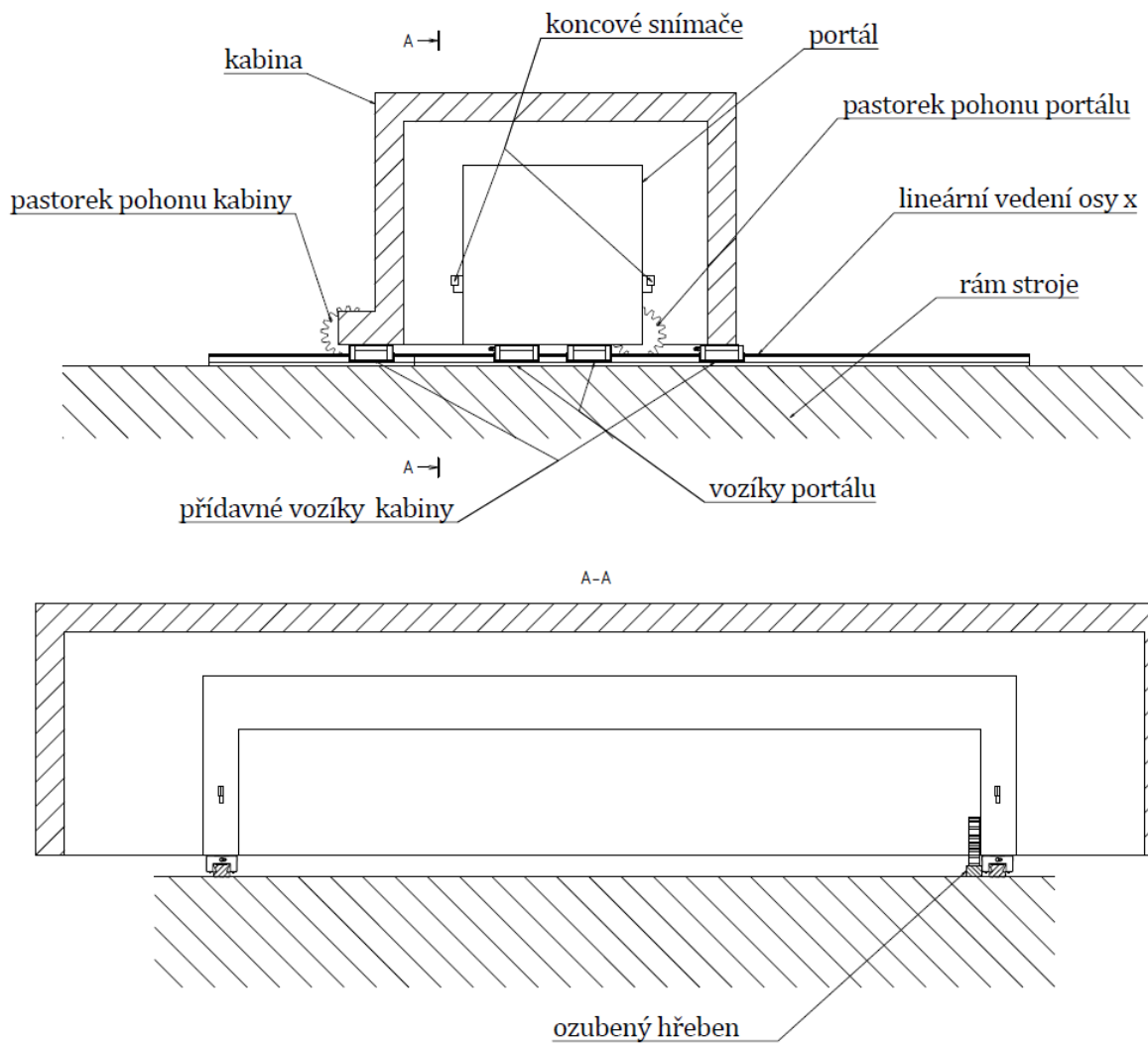
Aktivní kabina bude pro určování limitů pojezdu využívat již existujících koncových dorazů, avšak nezávislý pohyb kabiny s sebou přináší riziko, že pokud nebude řídicí systém správně naprogramován nebo dojde k jeho poruše, může dojít ke kolizi kabiny s portálem. Důležitým bezpečnostním prvkem aktivní kabiny tak budou koncové snímače, které při sepnutí zamezí kolizi kabiny s portálem nouzovým zastavením pohybu stroje. Mezi základní typy koncových dorazů patří mechanické, indukční a optické senzory.



Obrázek 40 - Mechanické, indukční a optické senzory od výrobce OMRON (v pořadí zleva) [32]

Mechanické spínače jsou nejjednodušším a nejlevnějším řešením, avšak jejich životnost je horší ve srovnání s dalšími typy snímačů, které mají životnost prakticky neomezenou. Indukční snímače reagují na změnu magnetického pole a jsou tak vhodné pouze k detekování kovových předmětů. Nejpřesnější variantou jsou optické snímače, které dokážou detekovat v podstatě jakýkoliv předmět a existují v nespočtu různých konfigurací. Mezi ty nejvhodnější pro tuto aplikaci patří reflexní či jednocestně optické závory. Nevýhodou je nutnost instalace odrazné plochy při použití reflexních snímačů a také nižší odolnost vůči vnějším vlivům (nečistoty, prach atd.). U dřevobráběcího stroje, kde je produkováno vysoké množství prachu, tak nejsou optické snímače vhodnou variantou a vhodnější je použít např. mechanické snímače. [20]

Nakonec byl vytvořen schematický návrh konstrukce aktivní kabiny, kde jsou vyznačeny všechny důležité komponenty.



Obrázek 41 – Schematický návrh konstrukce aktivní ochranné kabiny

6 Závěr

Úvodní část bakalářské práce se zabývá problematikou krytování obráběcích strojů. Nejprve jsou ochranné kryty rozděleny do kategorií podle jejich funkce na vnitřní a vnější. Následně jsou vnitřní kryty podrobněji popsány a rozděleny na základě jejich konstrukce. Dále jsou popsány vnější kryty, které se dělí na klasickou kapotáž a vezené kabiny. Důležitou částí vnějších ochranných krytů jsou také průhledy z bezpečnostního skla, kterým je proto věnována pozornost. Následující kapitola je věnována bezpečnosti ochranných krytů a její normalizaci. Je zde popsána hierarchie bezpečnostních norem a na základě skupinové normy pro bezpečnost strojních zařízení jsou uvedeny bezpečnostní požadavky na konstrukci ochranného krytování. Dále je zpracován přehled metod používaných k ověřování těchto požadavků a podrobnější pozornost je věnována praktickým zkouškám odolnosti krytování proti průrazu. Z provedené rešerše vyplývá, že krytování obráběcích strojů je nedělitelnou součástí stroje a nelze ho podceňovat. Konstrukce vyhovující všem předpisům znamená značné navýšení hmotnosti celého stroje, a to se zvláště nepříznivě projevuje v případě pohyblivých se krytů spojených s pohybovými osami.

Praktická část bakalářské práce se věnuje sestavení simulačního modelu stroje s třemi variantami ochranné kabiny. Nejprve bylo nutné se seznámit s obráběcím strojem, který je předmětem simulace. Poté byly popsány jednotlivé varianty, kterými jsou stávající tradiční vezená kabina, pasivní oddělená kabina spojená s portálem přes tlumič a pružinu a aktivní oddělená kabina s vlastním pohonem. Pro každou z variant byly sestaveny vlastní pohybové rovnice, podle kterých byl vytvořen simulační model v programovacím prostředí MATLAB Simulink. Dále byly pro variantu pasivní kabiny nastaveny parametry tlumiče a pružiny tak, aby byla tato soustava nadkriticky tlumená. Simulace byla provedena nejprve na trajektorii rychloposuvu a dále také na trajektorii, která napodobuje obrábění otvoru.

Výsledky provedených simulací, které jsou podrobněji uvedeny ve shrnutí kapitoly 4, ukazují, že oddělení ochranné kabiny od portálu stroje má smysl a přináší energetickou úsporu a pokles požadované síly pohonu. To v praxi může znamenat možnost volby méně výkonného pohonu nebo zlepšení dynamických vlastností stroje při zachování pohonu stávajícího. V poslední kapitole je zpracován koncepční návrh aktivní ochranné kabiny z pohledu řízení a konstrukce. Jedná se však pouze o schématický návrh, který vyžaduje další důkladné rozpracování všech konstrukčních detailů. Aby instalace aktivní ochranné kabiny přinášela maximální možné benefity, je také do budoucna zapotřebí se věnovat optimalizaci řízení jejího pohybu.

Seznam použité literatury

- [1] MAREK, Jiří a Petr BLECHA. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [2] VOSOLSOBĚ, Josef. Dirty Beauty - Popelka v říši strojů, část 1. *MM Průmyslové spektrum*. 2015, , 12. ISSN 1212-2572.
- [3] HUDEC, Jan. Krytování pohybových os obráběcích strojů. *MM Průmyslové spektrum*. 2005, , 34. ISSN 1212-2572.
- [4] Roletové kryty. *LIN-TECH, HENNLICH s.r.o.* [online]. b.r. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://lin-tech.hennlich.cz/produkty/krytovani-stroju-roletove-kryty-217/materialy-1.html>
- [5] HAMPL, Štěpán. Parametry krytů vedení obráběcích strojů. *MM Průmyslové spektrum*. 2006, , 68.
- [6] Guideway protection systems. *KABELSCHLEPP GmbH* [online]. b.r. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://tsubaki-kabelschlepp.com/uploads/tx_tkg17pim/documents/pdf/Faltenbaelge_EN.pdf
- [7] JONÁŠ, Martin. Krycí měchy - účinná ochrana pohyblivých částí strojů. *MM Průmyslové spektrum*. 2013, , 79.
- [8] VOSOLSOBĚ, Josef a Matěj SULITKA. Modulární systém krytování obráběcích strojů. *MM Průmyslové spektrum*. 2011.
- [9] ČSN EN ISO 13857. *Bezpečnost strojních zařízení - Bezpečné vzdálenosti k zamezení dosahu do nebezpečných prostor horními a dolními končetinami*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008, 24 s.
- [10] Modulární systémy. *Hestego a.s.* [online]. b.r. [cit. 2019-06-15]. Dostupné z: <https://www.hestego.cz/modularni-systemy>

- [11] ČSN EN ISO 19085-3. *Dřevozpracující stroje - Bezpečnostní požadavky - Část 3: Číslíkově řízené (NC) vyvrtávačky a horní frézky*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018, 84 s.
- [12] ŠTĚPÁNEK, Martin. *Možnost monitorování obráběcího procesu*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Zdeněk FIALA, Ph.D.
- [13] Čl. 288 SMLOUVA O FUNGOVÁNÍ EVROPSKÉ UNIE. In: . Úřední věstník Evropské unie, 2012, ročník 47, číslo 327. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:12012E/TXT&from=CS>
- [14] ČSN EN ISO 12100. *Bezpečnost strojních zařízení - Všeobecné zásady pro konstrukci - Posouzení rizika a snižování rizika*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 106 s. Třídící znak 83 3001.
- [15] ČSN EN ISO 14120. *Bezpečnost strojních zařízení - Ochranné kryty - Obecné požadavky pro konstrukci a výrobu pevných a pohyblivých ochranných krytů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017, 44 s. Třídící znak 83 3302.
- [16] Co je technická norma?. *Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví* [online]. b.r. [cit. 2019-06-14]. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/co-je-to-technicka-norma->
- [17] ČSN EN ISO 16090-1. *Bezpečnosti obráběcích strojů - obráběcí centra, frézky, postupové stroje - část 1: Bezpečnostní požadavky*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019, 232 s.
- [18] ČSN EN ISO 23125. *Obráběcí stroje - Bezpečnost - Soustruhy*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018, 106 s.
- [19] CNC centrum scorpion. *Houfek a.s.* [online]. b.r. [cit. 2019-07-24]. Dostupné z: <https://www.houfek.com/cnc-centrum-scorpion#attachments>
- [20] SVOBODA, Aleš. *Koncový spínač 20x jinak. Arduino návody* [online]. b.r. [cit. 2019-08-08]. Dostupné z: <https://navody.arduino-shop.cz/technikuv-blog/o-koncovem-spinaci.html>

- [21] HUNT, Brian R., Ronald L. LIPSMAN a Jonathan M. ROSENBERG. *A guide to MATLAB: for beginners and experienced users*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2006. ISBN 978-0-521-85068-1.
- [22] STEJSKAL, Vladimír. *Kmitání s Matlabem*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2435-0.
- [23] STEJSKAL, Vladimír, Jaromír BROUSIL a Stanislav STEJSKAL. *Mechanika III*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2388-5.
- [24] Teleskopické ocelové kryty. *Hennig CZ s. r. o.* [online]. b.r. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.hennig-cz.com/index.php?id=24>
- [25] Roll up guarding and aprons. *SHAVER Inc.* [online]. b.r. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.shaverinc.com/machine-safety-protection/roll-up-guarding/>
- [26] Portalfräsmaschinen, FZ30/FZ35. *F. ZIMMERMANN GMBH* [online]. b.r. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.f-zimmermann.com/portalfraesmaschinen/fz30fz35/>
- [27] Strojírenství. *TRATEC-CS, s.r.o.* [online]. b.r. [cit. 2019-06-14]. Dostupné z: <https://www.tratec.cz/strojirenstvi/>
- [28] ROVER K FT NC processing centre Brochure. In: *BIESSE* [online]. b.r. [cit. 2019-06-14]. Dostupné z: https://www.biesse.com/downloads/11859/174/5808A1291_Bs_Cat_Rover%20K%20FT_mag19_ENG_Lr.pdf
- [29] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI, . *Harmonizované normy* [online]. b.r. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <http://www.agentura-cas.cz/node/80>
- [30] *Stavba technických norem: popularizace technické normalizace* [online]. b.r. [cit. 2019-07-09]. Dostupné z: <http://www.skolatextilu.cz/elearning/182/popularizace-technicke-normalizace/Stavba-technicky-norem.html>
- [31] Lineární vedení kuličkové. *THK CO., LTD* [online]. b.r. [cit. 2019-08-07]. Dostupné z: <https://www.thk.com/?q=cz/node/3749>
- [32] Produkty - senzory. *OMRON Corporation* [online]. b.r. [cit. 2019-08-08]. Dostupné z: <https://industrial.omron.cz/cs/products/sensing>