



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE MONTÁŽNÍHO STOLU PRO ULOŽENÍ TISKAŘSKÉHO ŠTOČKU NA POUZDRO PODLE MIKROBODU

DESIGN OF MOUNTING TABLE FOR ASSEMBLY OF PRINTING BLOCK ONTO HUB ACCORDING TO
MICROPOINT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Václav Navrátil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Kučera

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Václav Navrátil
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Petr Kučera
Akademický rok:	2016/17

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 bakalářské práce:

Konstrukce montážního stolu pro uložení tiskařského štočku na pouzdro podle mikrobodu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jednou z fází velkosériového tisku je přesné ukládání tzv. štočků na nosné pouzdro. Automatizace v této fázi by dokázala uspořit jisté množství času, zjednodušila by práci obsluze a také by bylo možné eliminovat případné chyby způsobené lidským faktorem.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je zkonstruovat jednoúčelový stroj pro ukládání tiskařských štočků na pouzdro.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- návrh koncepce,
- návrh polohovacího mechanismu,
- návrh převodů a pohonu polohovacího mechanismu.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). Konstruování strojních součástí. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK. Základy konstruování. Vydání šesté. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2015. ISBN 978-80-7204-921-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je návrh konstrukce montážního stolu pro umístění tiskařského štočku na pouzdro podle mikrobodu na nově vyvíjenou montážní stoličce od firmy Soma Engineering. První část práce obsahuje profil společnosti, princip flexotisku a přehled konkurenčních strojů. Druhá část je zaměřena na návrh možných variant řešení, jejich výhodám a nevýhodám a cenovým odhadům jednotlivých variant. Třetí část práce je věnována vybrané variantě a jejímu detailnímu rozpracování.

KLÍČOVÁ SLOVA

Montážní stůl, montážní stolice, flexotisk, štoček, sleeve

ABSTRACT

The aim of this bachelor's thesis is to create a draft for the design of mounting table for assembly of printing plate onto sleeve according to microdot for newly designed mounting machine made by company Soma Engineering. The first part of the thesis includes the profile of the company, the principle of flexoprint and overview of other companies' machines. The second part focused on draft of possible versions of the solution, their pros and cons and estimated costs of individual solution. The third part of thesis is dedicated to a chosen version and its detailed elaboration.

KEY WORDS

Mounting table, mounting machine, flexoprint, printing plate, sleeve

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NAVRÁTIL, V. *Konstrukce montážního stolu pro uložení tiskařského štočku na pouzdro podle mikrobodu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Kučera.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci „Konstrukce montážního stolu pro uložení tiskařského štočku na pouzdro podle mikrobodu“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce Ing. Petra Kučery a v seznamu jsem uvedl všechny použité literární zdroje.

V Brně 18. května 2017

Václav Navrátil

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Kučerovi za rady, poskytnuté informace a čas strávený vedením bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lukáši Skalickému za konzultace, připomínky a poskytnuté informace k řešení bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat rodině a svým nejbližším za podporu během studia.

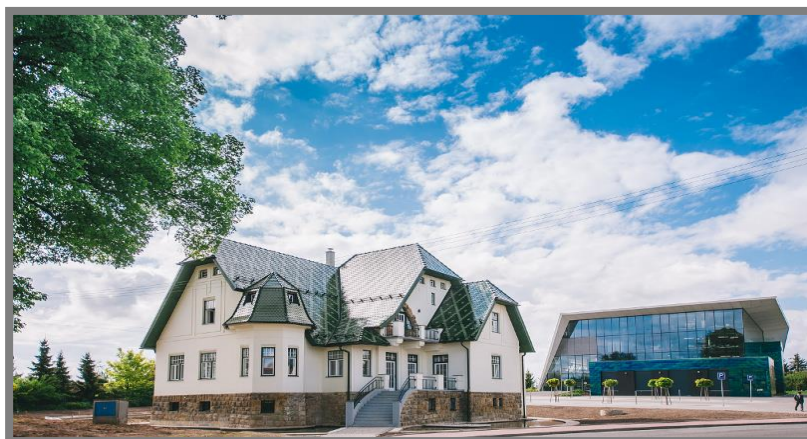
OBSAH

ÚVOD	12
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
1.1 Flexotisk	13
1.2 Tiskové formy	13
1.3 Montážní stolice	15
1.4 SOMA Engineering	15
1.5 Konkurenční řešení	16
1.5.1 Fully Automatic Mounting Machine (FAMM) 2.0	16
1.5.2 Semi-Automatic Mounting Machine (SAMM)	17
1.5.3 AutoMounter	17
1.5.4 UNICA 343 VM	18
1.5.5 STAR-HD	18
1.5.6 Zhodnocení konkurence	19
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	20
3 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	21
3.1 Přisouvání stolu k ose válce pro varianty A a B	21
3.1.1 Řemen	21
3.1.2 Kuličkový šroub	22
3.2 Varianta A – „Řemeny“	23
3.3 Varianta B – „Rotační osa“	24
3.4 Varianta C – „Lineární motory“	25
3.5 Odhad cen	26
3.5.1 Varianta A – „Řemeny“	26
3.5.2 Varianta B – „Rotační osa“	27
3.5.3 Varianta C – „Lineární motory“	27
3.6 Zhodnocení	27
4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	29
4.1 Nosná deska	29
4.2 Lineární vedení	30
4.3 Motory	31
4.4 Ložiska	34
4.5 Návrh pracovní desky	36
4.6 Odměrování a senzory	37
4.7 Kinematika	38
4.8 Přesnost polohování	39
5 DISKUZE	41
6 ZÁVĚR	45
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	46
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	49
9 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK	51
10 SEZNAM PŘÍLOH	52
SAMOSTATNÉ PŘÍLOHY	53
Příloha I	53

ÚVOD

Firma SOMA Engineering byla založena v roce 1992 v Lanškrouně. Od této doby se firma dostala mezi světovou špičku v oblasti vývoje a výroby technologie flexografických tiskových strojů. V roce 2012 bylo k příležitosti dvacátého výročí vzniku firmy otevřeno nové technologické centrum Soma Globe (na obr. 0-1 v pozadí) a o 2 roky později bylo otevřeno nové školící centrum Villa Globe. Mezi hlavní produkty firmy patří stroje na zpracování a potisk materiálu, zejména flexotiskové stroje, podélné a příčné řezačky, montážní stoly, laminátory, vysekávací automaty a paletizační linky. Vlajkovou lodí firmy je flexotiskový stroj OPTIMA, který obdržel v roce 2014 ocenění v soutěži iF Design Awards v kategorii průmyslového designu. [1,2]. Stroje jako je OPTIMA tisknou pomocí tiskařských štočků. Ty se lepí na tzv. sleevy, které se následně instalují do stroje. Lepení štočku probíhá na montážních stolicích pomocí oboustranné lepicí pásky.

Tato práce se zabývá úpravou montážního stolu pro umístění štočku na sleeve na montážní stoličce firmy SOMA Engineering. Hlavními důvody této úpravy jsou úspora času potřebného pro montáž štočku, s tím spojená finanční úspora, a také eliminace rizika lidské chyby při umísťování štočku na sleeve.



Obr. 0-1 Villa Globe a Soma Globe [1]

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

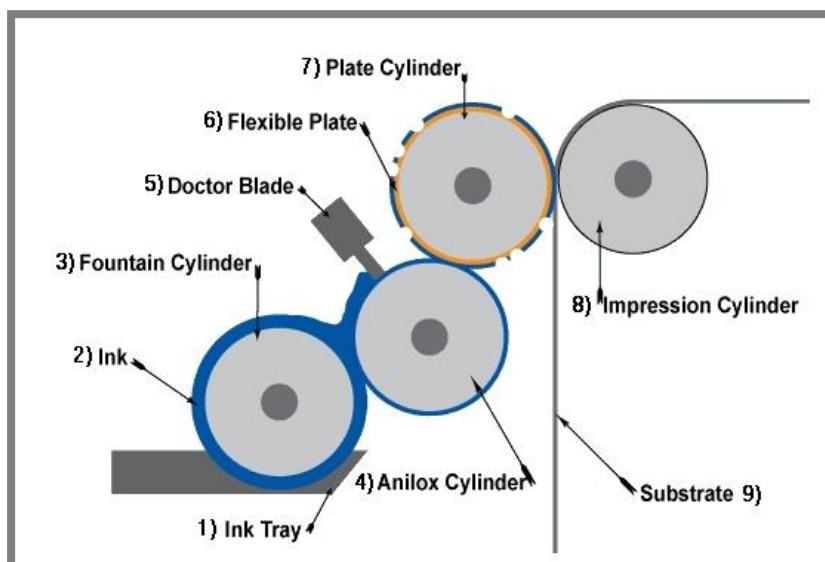
1

1.1 Flexotisk

1.1

Flexotisk je jednou z nejpoužívanějších tiskových technik. Vychází z knihtisku a již od konce 19. století prochází postupným vývojem, nejvýraznější vzestup však zaznamenal až v posledních letech. Patří mezi tiskové techniky využívající tzv. tisk z výšky. To znamená, že tiskové body jsou na formě vyvýšeny oproti místům netisknoucím. Na stejném principu pracuje například obyčejné razítko. Flexotiskem lze potisknout různé obalové materiály, jako například lepenku, papír, plast, polyethylenové, polyamidové a kovové folie nebo plastové etikety na PET lahve. [3]

Na Obr. 1-1 [4] je schéma principu tisku. Barva (2) je přenášena z barevníku (1) přes naběrací válec (3), rastrový (aniloxový) válec (4) na štoček (6) umístěný na formovém válci (7). Štoček následně přenáší barvu na potiskovaný materiál (9). [5]



Obr. 1-1 Schéma tisku [4]

1.2 Tiskové formy

1.2

Tisková forma, tzv. štoček, je vyráběn nejčastěji z fotopolymerů. K přípravě štočků se používají dva postupy. První (konvenční) příprava spočívá v aplikaci kontaktního filmu na fotopolymer. Následně je fotopolymer vystaven působení UV záření. To způsobí vytvrzení štočku v tiskových místech, v místech netiskových dochází k vymytí fotopolymeru. Tím vznikne reliéf tiskové formy. Velkou nevýhodou je ovšem nižší tisková kvalita. Hrany tiskových bodů nejsou tak strmé a při opotřebení štočku dochází k nárůstu tiskového bodu, tím pádem nelze dosáhnout požadované kvality obrazu. Také nelze přenášet velmi jemné rastry.

Zmíněné nevýhody odstraňuje druhý postup přípravy, který využívá digitální technologie. Nenajdeme zde kontaktní film. Štočky jsou opatřeny tzv. LAMS vrstvou, do níž je zaznamenáván obraz. Tato vrstva se odpaluje pomocí laseru, čímž se odkryje fotopolymerní vrstva. Dále následuje vytvrzení pomocí UV záření a vymytí

netisknoucích oblastí. Hrany tiskových bodů jsou strmé a zajišťují tak kvalitní tisk i při produkci vysokých nákladů. [3]



Obr. 1-2 Štoček

Štočky jsou lepeny na tzv. formové sleevey pomocí oboustranně lepicí pásky. Sleevey se nasazují na formové válce a umožňují tak během krátké doby změnu tisknutého motivu. Lepení probíhá na montážních stolicích (montážkách). Štoček musí být nalepen přesně, jinak hrozí, že výsledný obraz bude nekvalitní (např. nedocílíme požadované barvy obrazu). V současné době se pro správné umístění štočku na sleeve využívají systémy s videokamerami, které snímají soutiskové značky (tzv. mikrobody) a podle nich se poloha štočku upravuje tak, aby byla co nejpřesnější.



Obr. 1-3 Štočky na sleevech

1.3 Montážní stolice

1.3

Pro nalepení tiskové formy na sleeve slouží montážní stolice. Jelikož štoček musí být nalepen velmi přesně, také montážní stroj musí být velmi přesně zpracován. Mezi základní vybavení montážních stolic patří videokamery, které snímají soutiskové značky umístěné na štočcích. Ty se nacházejí jak na koncích štočku, tak i zhruba v polovině jeho délky. K umístění tiskové formy se nejčastěji používají mikrobodů uprostřed její délky, protože umístění podle nich je nejpřesnější. Kamery se pohybují ve směru rovnoběžném s osou jádra formového válce. Jsou poháněny buď ručně, nebo motoricky. Jádro je většinou uloženo letmo, a to z důvodu nasouvání a vysouvání sleeveu. Volný konec jádra je opatřen přídatnou podporou pro zajištění přesné polohy. [4]

1.4 SOMA Engineering

1.4

V současné době má firma v nabídce pouze jeden stroj a tím je montážní stolice FLEXMONT. Probíhá ale vývoj nové montážky, jejíž součástí bude i v této práci navrhovaný montážní stůl pro umístění štočku na sleeve.

Na základě osobního rozhovoru s konstruktérem firmy p. Ing. Lukášem Skalickým vyplynulo, že proces lepení štočku na sleeve na současném stroji Flexmont probíhá z větší části manuálně. Obsluha nejprve nasadí sleeve na válec. Poté vezme oboustranně lepicí pásku a nalepí ji na sleeve. Strhne krycí folii a na polovinu sleeveu ji nalepí zpět, aby se zabránilo přilepení štočku na nechtěných místech. Montážní stůl má vysouvací část, kterou si obsluha přisune blíže k válci tak, aby vznikla mezera zhruba 10 mm. Vysouvací část stolu podpírá štoček a obsluha je tak schopna umístit štoček přesněji. Štoček si obsluha položí na montážní stůl. Zhruba uprostřed délky štočku se po obou stranách nachází soutiskové značky (mikrobodů), jenž jsou snímány dvěma kamerami se 120násobným zvětšením. Snímané části štočku se obsluze zobrazí na monitorech, kde se nachází záměrné kříže, podle kterých obsluha štoček přesně umísťuje. Potom co jsou oba mikrobodů na svých místech, obsluha štoček nalepí v místech mikrobodů a následně po celé délce válce. Pod štočkem nesmí být vzduchové bubliny, nesmí být natáhnutý, zkroucený ani jinak deformovaný. Následuje nalepení štočku po celém jeho obvodu, přičemž během lepení se štoček nesmí pohnout.

Proces lepení je náročný jak časově, kdy je v některých případech nutné lepení i více než deseti štočků vedle sebe, tak i z pohledu zručnosti a zkušenosti samotného operátora. V kombinaci se zkracujícími se časy pro splnění zakázek je zřejmé, že současný stav nevyhovuje. Firma Soma chce celý proces poloautomatizovat, v budoucnu zcela automatizovat. Představa je taková, že obsluha nalepí oboustrannou lepicí pásku, umístí štoček na montážní stůl tak, aby jej kamery viděly a zbytek procesu již bude zautomatizován. Díky tomu se poměrně hodně zkrátí celková doba lepení, štočky budou lepeny přesněji, sníží se riziko lidské chyby a obsluha bude moci během automatického procesu vykonávat jinou práci.



Obr. 1-4 Montážní stolice FLEXMONT [1]

1.5

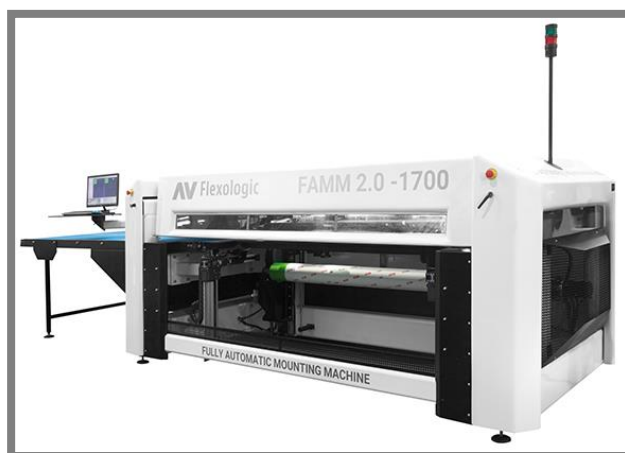
1.5 Konkurenční řešení

1.5.1

1.5.1 Fully Automatic Mounting Machine (FAMM) 2.0

Výrobce montážního stroje FAMM 2.0 je nizozemská firma AV Flexologic, která je jedním z největších hráčů na trhu s tzv. montážkami. Jak napovídá jeho název, stroj pracuje plně automaticky. Díky tomu může obsluha během procesu lepení vykonávat jinou práci. Také eliminuje riziko lidské chyby, štoček dokáže umístit s přesností 5 mikronů. Celý proces lepení zvládne za dobu cca 2 minuty, což je v dané kategorii nadprůměrný výkon. Tento stroj dokáže nahradit 3 tradiční montážní stoje.

Umístění štoček má na starosti flexibilní nosič, který spolupracuje s optickým systémem. Po najetí do správné polohy nosič umístí štoček na stůl. Přední část stolu se sklápí spolu se štočkem do svislé polohy, aby umožnila nalepení štočku na sleeve. Nevýhodou této montážky je její cena, která se pohybuje okolo 400 000 € (dle aktuálního kurzu zhruba 10 560 000 Kč). [6,7,8]



Obr. 1-5 Fully Automatic Mounting Machine (FAMM) 2.0 [6]

1.5.2 Semi-Automatic Mounting Machine (SAMM)

1.5.2

Tak jako u stroje FAMM 2.0 je výrobcem této montážky nizozemská firma AV Flexologic. Na rozdíl od předchozího stroje SAMM pracuje poloautomaticky. Součástí stroje je odsávaný montážní stůl zaručující fixaci štočku během jeho umísťování do správné polohy. Výhodou této montážky je přítlačný válec pro nalepení štočku na sleeve. Stroj též dokáže umístit štoček s přesností 5 mikronů. SAMM snižuje riziko lidské chyby, ale neodstraňuje ho úplně.

Obsluha umístí štoček do polohy rovnoběžné s osou válce, montážní stůl jeho polohu zafixuje a pohybem v osách x a y najede to správné polohy. Obsluha ovládá rotaci válce a štoček se nalepí díky přítlačnému válci na sleeve. [9,10]



Obr. 1-6 Semi-Automatic Mounting Machine (SAMM) [9]

1.5.3 AutoMounter

1.5.3

Výrobcem tohoto montážního stroje je firma JM Heaford Limited sídlící v Altrinchamu ve Velké Británii. Montážka AutoMounter je poloautomatická. Nenajdeme zde montážní stůl, ale dva odsávané poloválce, které zajišťují fixaci polohy štočku pro lepení. Součástí stroje je silikonový přítlačný válec. Stroj je schopen umístit štoček s přesností 10 mikronů, neeliminuje však riziko lidské chyby při umísťování.

Umísťování štočku má na starost obsluha stroje, která za pomoci optického systému dokáže umístit štoček s přesností 10 mikronů. Nevýhodou je zapojení lidského faktoru, který je potenciálně méně spolehlivý než strojní proces. [11,12]



Obr. 1-7 AutoMounter [11]

1.5.4 UNICA 343 VM

Výrobce montážního stroje UNICA je italská firma BIEFFE. UNICA 343 VM je poloautomatická montážka. Má montážní stůl s odnímatelnou přední částí. K základní výbavě patří také přítlačný válec sloužící k nalepení štočku na sleeve, který pracuje automaticky. Hlavní nevýhodou tohoto stroje je fakt, že štoček je umisťován obsluhou, nikoliv strojem.

Montážní stůl zde slouží pouze jako opora pro štoček a pomoc obsluze při jeho umisťování na sleeve. Stroj tak nijak neeliminuje riziko lidské chyby a neurychluje tento proces. [13,14,15]



Obr. 1-8 UNICA 343 VM [13]

1.5.5 STAR-HD

Výrobce montážního stroje STAR HD je firma SYS TEC converting se sídlem ve městě Brascia v Itálii. Tato montážka pracuje z větší části manuálně. I u tohoto modelu najdeme montážní stůl s odnímatelnou přední částí pro podporu štočku a automatický přítlačný válec pro lepení štočku na sleeve. Plusem je support pro cívku s oboustranně lepicí páskou, která je tak vždy po ruce. Štoček umisťuje obsluha za pomoci kamer. To je nevýhoda.



Obr. 1-9 STAR-HD [16]

Tak jako u předchozího stroje je montážní stůl pouze podporou pro štoček při jeho umisťování na sleeve. Stroj tak neurychluje tento proces a hrozí zde riziko lidské chyby. [16,17]

1.5.6 Zhodnocení konkurence

1.5.6

Z výše uvedených montážních stolic má nejvíce výhod oproti montážce Flexmont stroj Fully Automatic Mounting Machine 2.0 od firmy AV Flexologic, který pracuje plně automaticky, čímž šetří nejvíce pracovního času z uvedených strojů, eliminuje riziko lidské chyby a operátor může pracovat na více strojích. I druhý stroj od firmy AV Flexologic Semi-Automatic Mounting Machine šetří pracovní čas a eliminuje riziko lidské chyby, čehož chce firma Soma dosáhnout u nové montážní stolice. Zbylé tři montážky nepřinášejí žádné podstatné výhody oproti stroji Flexmont, které by bylo možno využít při konstrukci montážního stolu pro umístění štočku na sleeve.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Jednou z fází velkosériového tisku je přesné ukládání štočků na sleeve. V současné době montážky firmy SOMA umožňují pouze manuální řešení tohoto procesu. Jeho automatizace by dokázala uspořit jisté množství času, zjednodušila by práci obsluze a také by bylo možné eliminovat případné chyby způsobené lidským faktorem.

Hlavním cílem této bakalářské práce je navrhnout konstrukci montážního stolu pro uložení tiskařských štočků na sleeve. Dílčí cíle práce jsou:

- *návrh koncepce,*
- *návrh polohovacího mechanismu,*
- *návrh pohonu polohovacího mechanismu.*

Dále byly firmou SOMA určeny tyto požadavky:

- *Stůl musí být pohyblivý tak, aby bylo možno měnit vzdálenost mezi osou sleeve a hranou stolu v rozmezí 0 až 80 mm.*
- *Stůl musí umožnit natáčení v horizontální poloze, a to v požadovaném rozlišení pohybu minimálně 5 μ m.*
- *Maximální výška stolu by měla být 120 mm.*
- *Je nutno uvažovat odsávání přední části stolu pro zafixování štočku ve správné poloze.*
- *Odhadované výrobní náklady nesmí přesáhnout 6000 €.*

Montážní stůl by měl pracovat poloautomaticky. Operátor nalepí lepicí pásku na sleeve, vezme štoček, umístí jej na pracovní desku a zde jeho úloha skončí. Stůl následně najede do správné polohy, přítlačný válec štoček přitiskne na sleeve a nalepí ho. SOMA Engineering se zaměřuje na menší tiskařské firmy, které mají například 3 tiskařské stroje, přičemž každý z nich může být jinak starý, tudíž nejsou vzájemně kompatibilní a nelze pro ně sestavit universální montážku. Proto firma ke každému prodanému flexotiskovému stroji prodá také jednu montážní stolicí. Zároveň je pro operátora časově velmi náročné obsloužit 3 stroje. Poloautomatická montážka tak usnadní obsluhu práci a tím ušetří čas potřebný pro lepení štočku.

Pro tvorbu 3D modelu bude použit program ProEngineer Wildfire 4, nákresy budou vytvořeny v programu Autodesk AutoCAD. Postup bude konzultován s konstruktéry a technologi firmou SOMA.

3 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

3

3.1 Přisouvání stolu k ose válce pro varianty A a B

3.1

3.1.1 Řemen

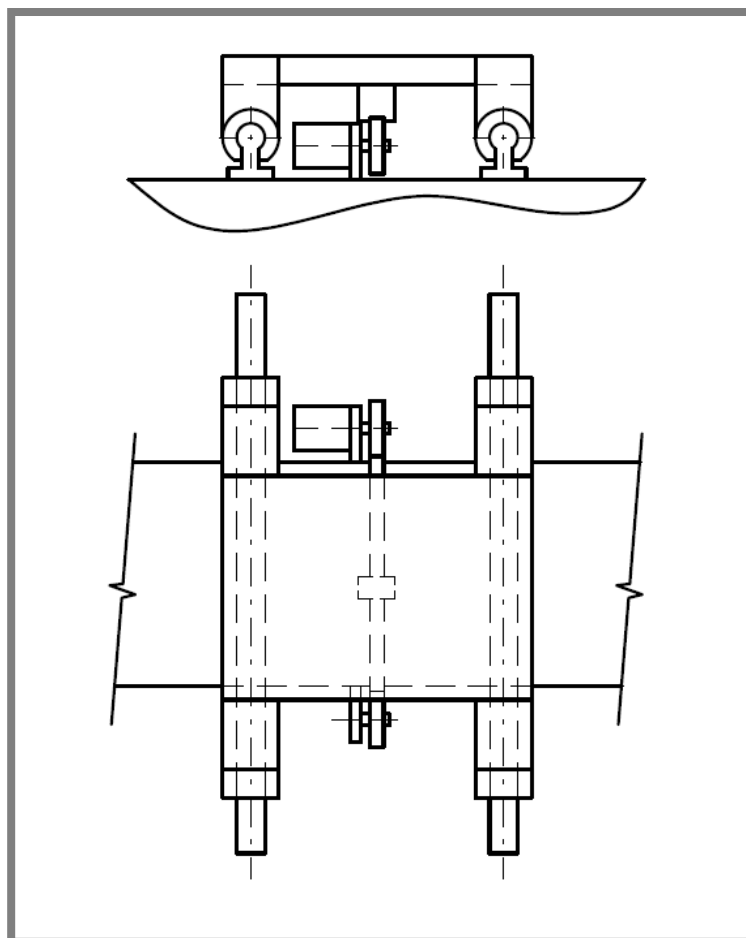
3.1.1

Koncepce této varianty vychází z konstrukčních řešení 3D tiskáren, kde některé jejich varianty využívají k polohování tiskové hlavičky řemeny poháněné krokovými motory. Jako příklad lze uvést zařízení s názvem H-BOT [18], které je schopno pomocí jednoho řemene a dvou krokových motorů zajistit pohyb jak v ose x, tak v ose y.

Pro řešení montážního stolu je však nutno řešit pouze translaci v ose x, a proto stačí použít jeden řemen a jeden krokový motor nebo servomotor. Aby byla dosažena požadovaná přesnost, je potřeba za krokový motor nebo servomotor namontovat převodovku, která zajistí dostačující převodový poměr.

Řemen je k platformě nesoucí otočný prvek stolu, přichycen na přední a zadní straně. Platforma leží na přesném lineárním vedení. Krokový motor nebo servomotor pohání zadní řemenici, řemen transformuje rotační pohyb na translaci a platforma je tak přisouvána nebo odsouvána od osy válce.

Mezi nevýhody řemene patří fakt, že není bez vůlí a tuhý. Může se deformovat a požadovaná přesnost by tak nemusela být dosažena.



Obr. 3-1 Pohon řemenem

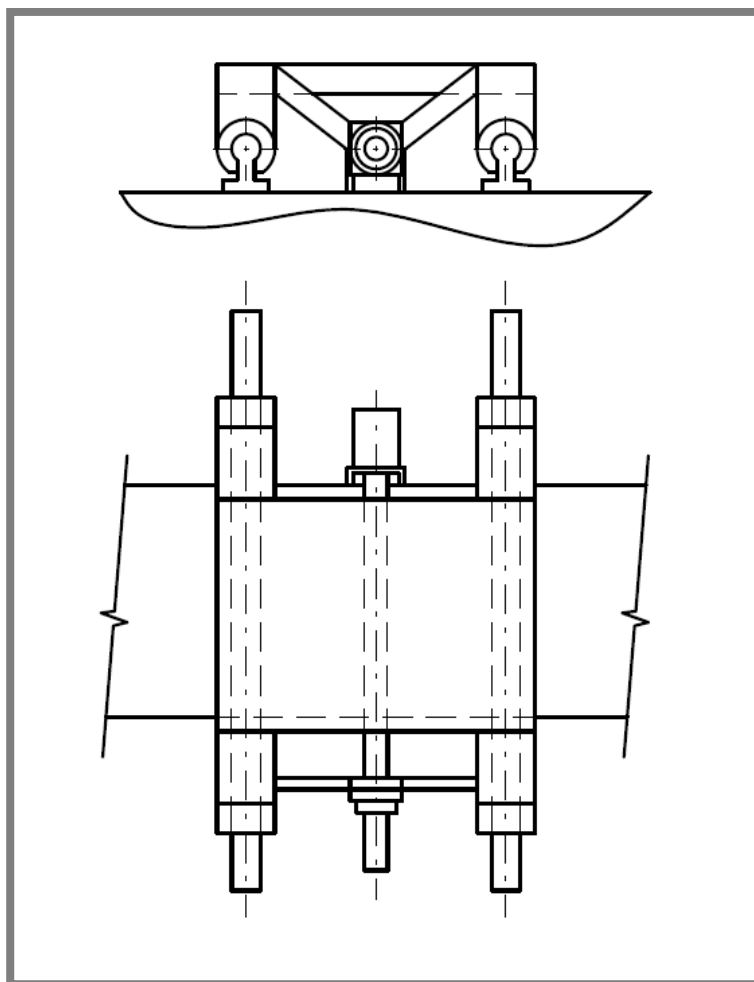
3.1.2 Kuličkový šroub

Druhá možnost přisouvání stolu k ose válce spočívá ve využití kuličkového šroubu. Řada moderních strojů řeší lineární posuv právě pomocí této varianty, a to z důvodu hned několika výhod.

Míra efektivity kuličkových šroubů při přenosu krouticího momentu na lineární pohyb může dosahovat za určitých podmínek až 90 %, tím pádem dochází k minimálním ztrátám na přenosu krouticího momentu a s tím spojenému minimálnímu zahřívání, což je nežádoucí efekt. Předpětím kuličkového šroubu lze zamezit axiální vůli, tím pádem je možno dosáhnout vysoké přesnosti pohybu.

Samozřejmě i kuličkový šroub má své nevýhody. Hlavní z nich je cena, která je většinou vyšší než u jiných řešení. Také je nutné šrouby izolovat od vlivů prostředí, prašnosti a malých částic. Hrozí také zvýšená možnost poškození při instalaci šroubu. [19]

Matice kuličkového šroubu je přichycena k platformě a rotační pohyb šroubu zajišťuje její posuv. Platforma nese rotační prvek a stejně jako u předchozí varianty je uložena na přesném lineárním vedení. Kuličkový šroub je poháněn krokovým motorem nebo servomotorem. K dosažení požadované přesnosti není potřeba zařazovat převodovku, stačí, když bude mít krokový motor dostatečný počet kroků na otáčku a bude zvoleno správné stoupání šroubu.

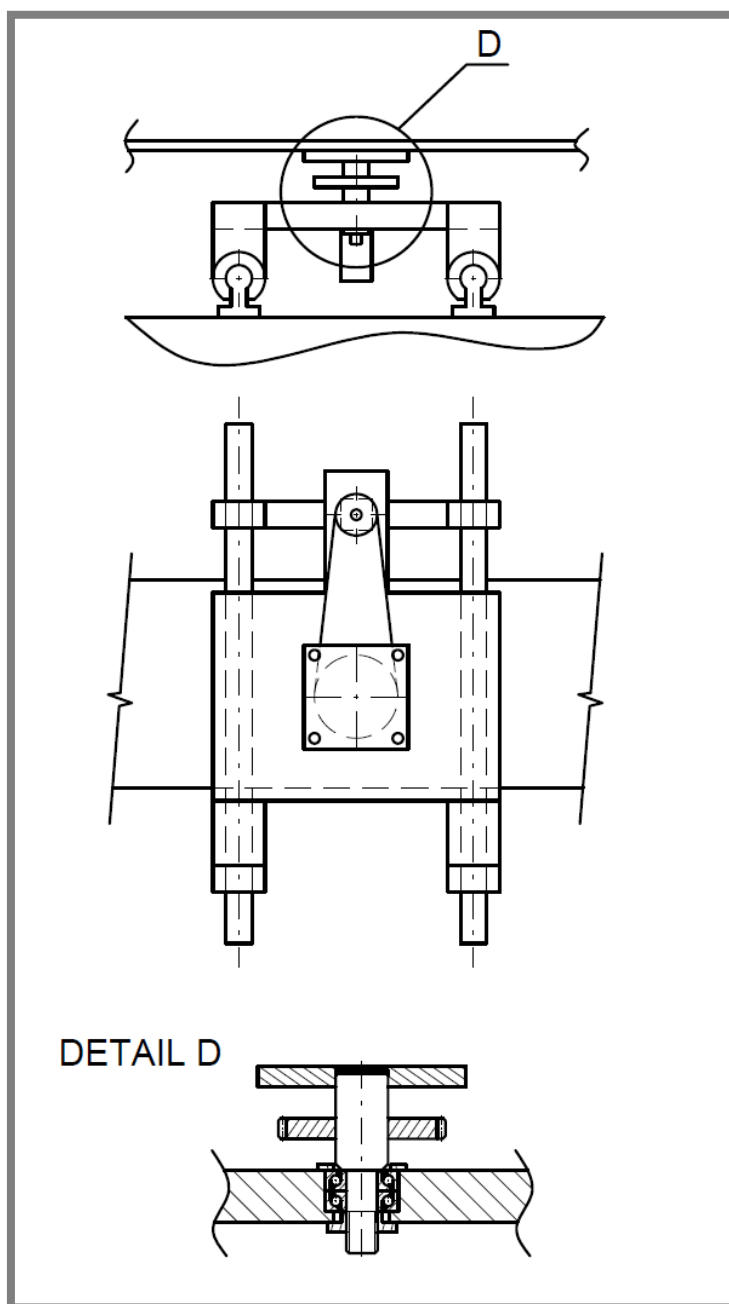


Obr. 3-2 Pohon kuličkovým šroubem

3.2 Varianta A – „Řemeny“

První varianta řešení konstrukce montážního stolu využívá k otáčení stolu řemen poháněný krokovým motorem. Motor je přichycen k platformě za nosníkem a pohání pastorek. Ten pomocí řemenu přenáší krouticí moment na kolo uložené na hřídele. K uložení hřídele v platformě jsou použita dvě jednořadá kuličková ložiska s kosoúhlým stykem uspořádaná čely k sobě (do „X“) a KM matice zabraňuje vypadnutí hřídele z ložisek. Rozšířený konec hřídele s otvory pro šrouby umožňuje přichycení konstrukce desky stolu.

K přisouvání stolu k ose válce lze využít variantu řemen nebo kuličkový šroub a k pohonu řemenu krokový motor nebo servomotor.



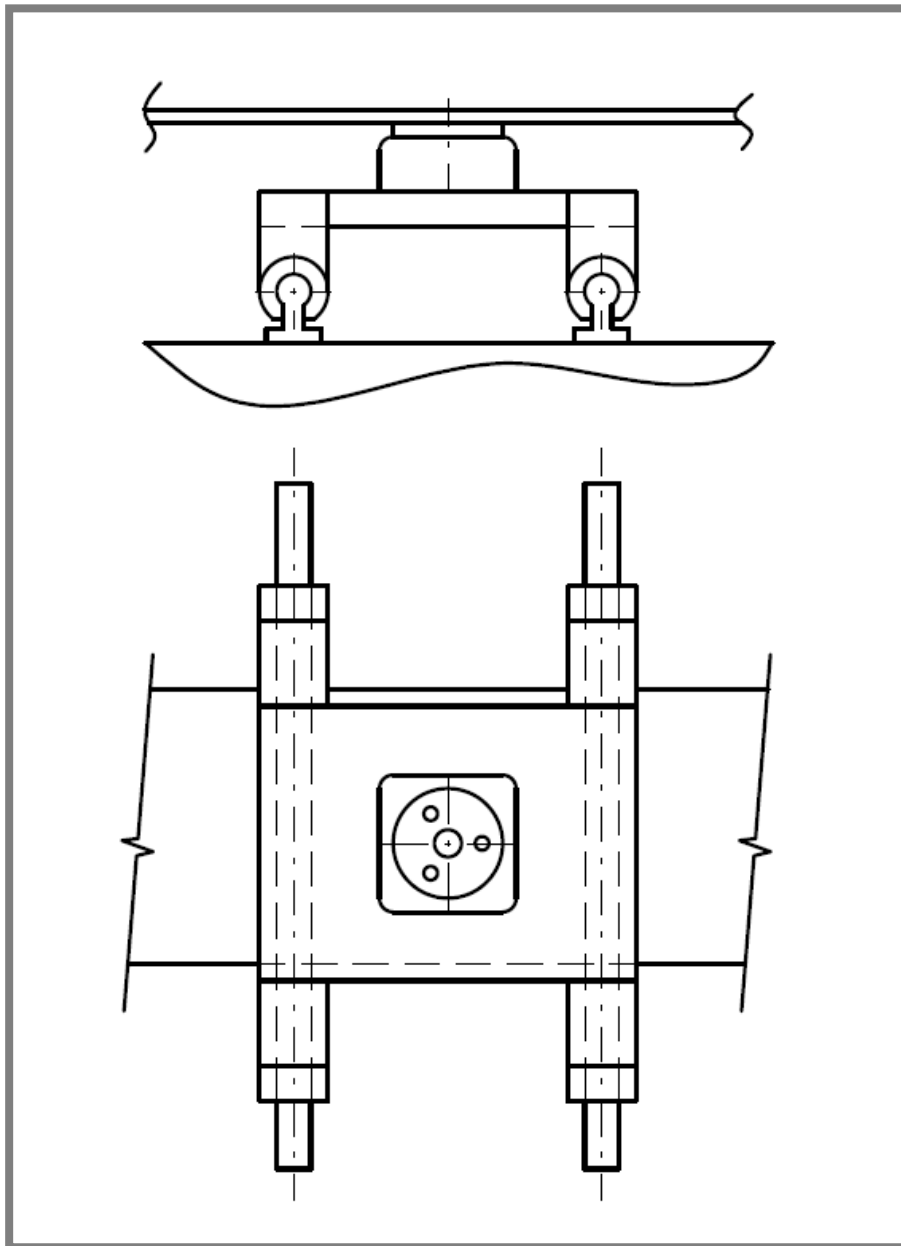
Obr. 3-3 Varianta A

3.3 Varianta B – „Rotační osa“

Tato možnost řešení je velmi podobná variantě A – „Řemeny“. I zde se nachází platforma na lineárním vedení nesoucí rotační prvek, v tomto případě rotační osu.

Švýcarská firma ETEL nabízí rotační osy řady DynX Rotary series, což je rodina přesných polohovacích rotačních os. Dle webové stránky společnosti se tato řada hodí pro aplikace vyžadující spolehlivost, přesnost, nenáročnou údržbu a snadnou integraci. Po kalibraci by osa měla dosáhnout polohové přesnosti až ± 3 úhlových vteřin. [20]

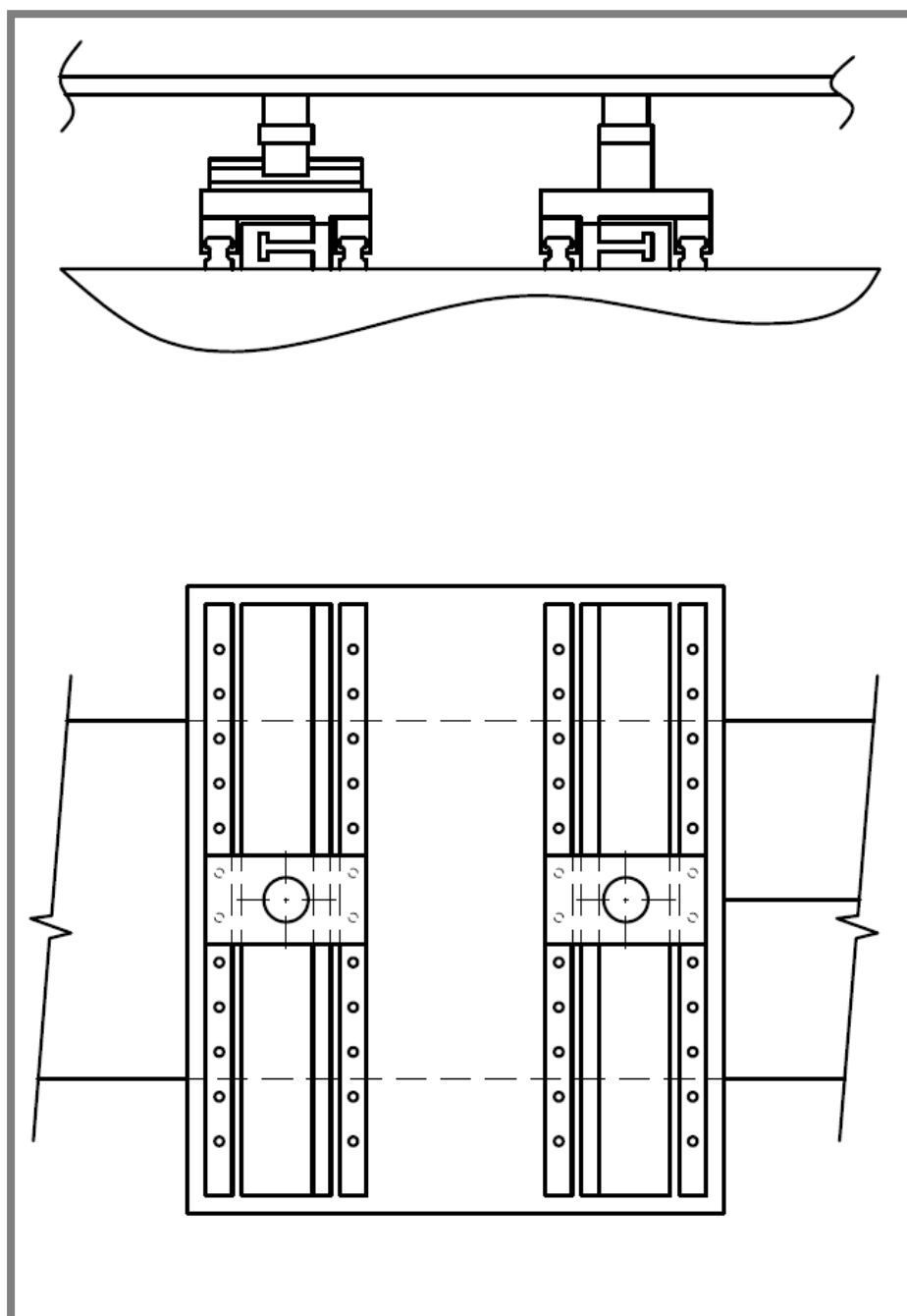
Konstrukce stolu je připevněna přímo k rotační ose. Tak jako u předchozí varianty lze k přísuvu použít variantu *řemen* nebo *kuličkový šroub*.



Obr. 3-4 Varianta B

3.4 Varianta C – „Lineární motory“

Předchozí varianty uvažují otáčení stolu pouze kolem jednoho bodu a otáčení s přísuvem mají oddělené pohony. Toto řešení ale uvažuje otáčení ve dvou bodech a otáčení s přísuvem zajišťuje jeden pohon. Princip řešení spočívá ve využití dvou lineárních motorů. Ty se pohybují buď společně stejným směrem a rychlostí, tím pádem dochází k přísouvání stolu k ose válce, nebo se pohybují opačným směrem a dochází k rotaci stolu. Deska stolu je uložena pomocí dvou čepů v ložiscích s kosoúhlým stykem nad oběma motory. Aby se stůl mohl otáčet, musí být jednomu čepu umožněn pohyb kolmo na dráhu lineárního motoru.



Obr. 3-5 Varianta C

3.5 Odhad cen

Odhadované ceny v tabulkách 3-1 až 3-3 jsou pouze orientační a nejsou konečné. Zahrnují však nejdražší komponenty všech variant, náklady na komponenty společné pro všechna řešení nejsou uvažovány.

3.5.1 Varianta A – „Řemeny“

U této varianty se nabízí více řešení: Pohon krokovým motorem a přisouvání řemeny (varianta A1.1), pohon krokovým motorem a přisouvání kuličkovým šroubem (varianta A1.2), pohon servomotorem a přisouvání řemeny (varianta A2.1) a pohon servomotorem a přisouvání kuličkovým šroubem (varianta A2.2).

Tabulka 3-1: Odhad cen – varianta A

Varianta	Komponenta	množství	celkem [€]	celkový odhad [€]
A1.1	Krok. Motor ILS	2	1104	1817
	Převodovka	1	243	
	Spojka	2	30	
	Řemenice	4	200	
	Řemeny	2	40	
	Vedení	1	200	
A1.2	Krok. Motor ILS	2	1104	1947
	Převodovka	1	243	
	Spojka	2	30	
	Řemenice	2	100	
	Řemen	1	20	
	Kuličkový šroub	1	250	
A2.1	Servomotor	2	1290	1973
	Řemenice	4	200	
	Řemeny	2	40	
	Převodovka	1	243	
	Vedení	1	200	
A2.2	Servomotor	2	1290	2103
	Převodovka	1	243	
	Řemenice	2	100	
	Řemen	1	20	
	Vedení	1	200	
	Kuličkový šroub	1	250	

Pohon servomotorem lze vyloučit, jelikož je dražší než pohon krokovým motorem. Zbývají tak dvě varianty, A1.1 a A1.2. Varianta A1.1 je sice levnější, ale cenový rozdíl není markantní a z hlediska požadované přesnosti je vhodnější varianta A1.2.

3.5.2 Varianta B – „Rotační osa“

Stejně jako v předchozím případě i zde existuje více řešení. Tentokrát však pouze dvě. Přisouvání může být zajištěno buď *řemeny* (varianta B1), nebo *kuličkovým šroubem* (varianta B2). Servomotor není do těchto možností zahrnut, jelikož z předchozího odhadu vyplývá, že je krokový motor ILS levnější alternativou.

Tabulka 3-2: Odhad cen – varianta B

Varianta	Komponenta	množství	celkem [€]	celkový odhad [€]
B1	Krok. Motor ILS	1	552	7274
	Převodovka	1	243	
	Rotační osa	1	6164	
	Spojka	1	15	
	Řemenice	2	100	
	Vedení	1	200	
B2	Krok. Motor ILS	1	552	7424
	Převodovka	1	243	
	Rotační osa	1	6164	
	Spojka	1	15	
	Kuličkový šroub	1	250	
	Vedení	1	200	

Vysoká cena rotační osy se odráží na celkovém odhadu ceny varianty B. Z důvodu překročení stanoveného rozpočtu se tato možnost nejeví jako vhodná pro hlubší rozpracování.

3.5.3 Varianta C – „Lineární motory“

Tabulka 3-3: Odhad cen – varianta C

Varianta	Komponenta	množství	celkem [€]	celkový odhad [€]
C	Motor lineární – stator	2	260	2140
	Motor lineární – rotor	2	340	
	Odměřování	2	240	
	Měnič	2	620	
	Firmware	2	180	
	Lineární vedení	1	500	

I když by se toto řešení mohlo na první pohled zdát drahé, celkový odhad není nijak zásadně vyšší než v případě varianty A. Příznivá cena tak tuto možnost dělá pro firmu Soma zajímavou.

3.6 Zhodnocení

Po poradě ve firmě s panem Ing. Skalickým se do užšího výběru dostaly varianty A1.2 a C. Odhadované ceny obou řešení se nijak zásadně neliší. Cenový rozdíl činí přibližně 200 €. Z hlediska bezpečnosti obsluhy vítězí *Lineární motory*, a to z jednoduchého důvodu. Lineární motor nemá takovou sílu, aby obsluze skřípl ruku

mezi stolem a válcem, obsluha dokáže zastavit stůl rukou, což v případě *Kuličkového šroubu* neplatí. Třetí kritérium – přesnost – také vyznívá lépe pro *Lineární motory*. Řemen není bez vůlí a mohl by se při zatížení deformovat, tím pádem by nastal problém s požadovanou přesností.

Na základě těchto porovnání byla ve firmě Soma zvolena varianta C – „*Lineární motory*“.

4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

4

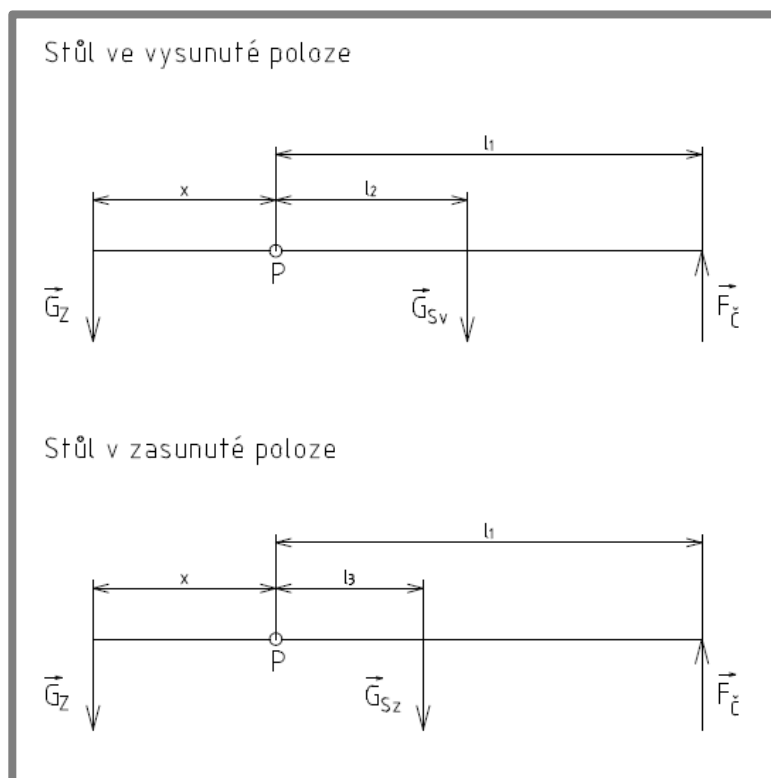
4.1 Nosná deska

4.1

Základem celé konstrukce je nosná deska, na které jsou umístěny všechny komponenty stroje a která zaručuje uložení celého stolu na rám montážní stolice. Jelikož jsou na ní umístěny lineární vedení i lineární motory, jejichž poloha musí být přesná, aby byla zaručena správná funkčnost daných součástí, musí být nosná deska dostatečně tuhá, aby nedocházelo k deformaci desky, např. jejímu prohnutí. Z tohoto důvodu má deska tloušťku 20 mm.

Nosník rámu montážní stolice, na kterém je stůl uložen, není obráběn, proto je nosná deska v přední části podepřena pomocí dvou odtlačovacích šroubů a v zadní části jsou umístěny dva stavěcí šrouby, které slouží k přesnému polohování desky během montáže na nosník stroje. Nosná deska je v zadní části spojena s rámem pomocí pantů, které mají bezpečnostní funkci. Ve chvíli, kdy sleeve přijíždí k hraně stolu, se může stát, že operátor nechá ruku mezi stolem a sleeve. Pokud bude stůl správně vyvážen a připevněn k rámu pomocí pantů, nedojde ke zranění obsluhy, ale pouze k odklopení stolu směrem nahoru. Vyvážení tak musí být co nejpřesnější. Stůl by se měl odklopit, pokud na ruku operátora působí síla $F_{\check{c}} = 50 \text{ N}$, ve stavu, kdy je stůl plně vysunut. Jelikož součástí této práce není systém odsávání, nejsou k dispozici údaje o celkové hmotnosti stolu, a proto bude uveden pouze návrh výpočtu. Výpočet vychází z rovnice statické rovnováhy.

Výpočet momentu M_z



Obr. 4-1 Schéma silového působení

$$\sum M_P = 0: M_{\check{c}} + M_Z - M_S = 0 \quad (4.1)$$

$$M_Z = M_{Sv} - M_{\check{c}} = G_{Sv} \cdot l_2 - F_{\check{c}} \cdot l_1 \quad (4.2)$$

Zároveň:

$$M_Z = G_Z \cdot x \quad (4.3)$$

kde:

M_P	$N \cdot m$	- je celkový moment v bodě P
$M_{\check{c}}$	$N \cdot m$	- je moment, který způsobí ruka v bodě P
M_Z	$N \cdot m$	- je moment vyvolaný závažím v bodě P
M_{Sv}	$N \cdot m$	- je moment vyvolaný hmotou stolu v bodě P
G_{Sv}	N	- je gravitační síla stolu ve vysunutém stavu
G_Z	N	- je gravitační síla závaží
$F_{\check{c}}$	N	- je síla, kterou působí ruka obsluhy
l_1	m	- je vzdálenost od pantu k hraně stolu
l_2	m	- je vzdálenost těžiště stolu od pantu
x	m	- je vzdálenost těžiště závaží od pantu

Výsledkem této rovnice je moment M_Z vyvolaný závažím na vzdálenosti x . Tento moment ale musí být menší než moment G_{Sv} vyvolaný hmotou stolu v zasunutém poloze, jinak by došlo k překlopení stolu.

$$M_Z < M_{Sv} \quad (4.4)$$

$$G_Z \cdot x < G_{Sv} \cdot l_3 \quad (4.5)$$

kde:

M_Z	$N \cdot m$	- je moment vyvolaný závažím v bodě P
M_{Sv}	$N \cdot m$	- je moment vyvolaný hmotou stolu v bodě P
G_{Sv}	N	- je gravitační síla stolu v zasunutém stavu
G_Z	N	- je gravitační síla závaží
x	m	- je vzdálenost těžiště závaží od pantu
l_3	m	- je vzdálenost těžiště stolu od pantu

4.2

4.2 Lineární vedení

Důležitým prvkem konstrukce je lineární vedení. Pro dané řešení bylo vybráno valivé lineární vedení, a to hlavně z hlediska přesnosti pohybu, která je vyšší než u kluzného lineárního vedení. Valivé lineární vedení také zaručuje vysokou zatížitelnost a tuhost. Valivé vedení je zprostředkováno pomocí rotujících kuliček obíhajících v uzavřených drážkách v těle vozíku. [21]

Výpočet statického faktoru

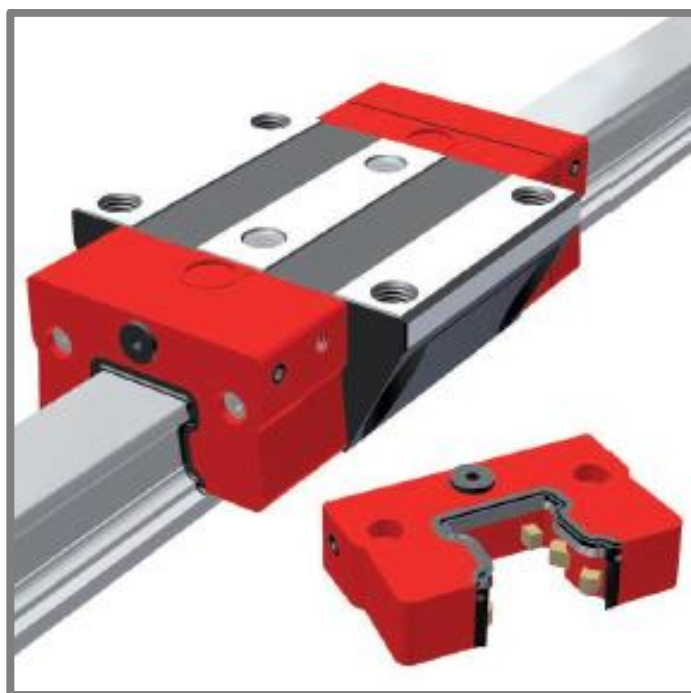
$$f_s = \frac{C_0}{\max(P)} = \frac{19\,600\, N}{299,03\, N} = 65,55 \quad (4.6)$$

kde:

C_0	N	- je statická únosnost vozíku
f_s	-	- je statický faktor
$\max(P)$	N	- je maximální zátěž vozíku

Maximální zatížení vozíku závisí na rozložení hmotnosti nad vozíky. Celý výpočet je uveden v **Příloze I**.

Na základě rozměrových úspor byly vybrány kolejnice BM S 15-NXD-G1-KC-R1-300-15-15-CN pro vedení rovnoběžné s dráhou pohybu lineárních motorů, jenž jsou dvě na straně s pohyblivým čepem a jedna na straně s pevným čepem, a dvě kolejnice BM S 15-NXD-G1-KC-R1-147-13,5-13,5-CN pro vedení kolmé na dráhu pohybu lineárních motorů. Na základě výpočtů byly vybrány vozíky BM W 15-A-G1-V0-R2-CN-S11-LV, kterých je celkem osm. Mazání kolejnic je zajištěno pomocí mazacích nástavců na vozíky SPL 15-BM. Ke každému vozíku náleží dva mazací nástavce. Všechny uvedené produkty nabízí firma Schneberger.



Obr. 4-2 Kolejnice, vozík a mazací nástavec firmy Schneberger [22]

Pro správnou funkčnost lineárního vedení je důležitá samotná montáž kolejnic a vozíků. Obsluha nejprve namontuje jednu kolejnici, pro kterou je na nosné desce připravena přesně obrobena opěrná hrana, druhá kolejnice se přichytí k desce volně tak, aby se její poloha dala upravovat. Následuje montáž vozíků k desce nesoucí kolejnice pro posuv kolmý na dráhu motorů, která je ze spodu opatřena přesně obroběnými hranami pro vozíky. Následuje montáž vozíků na kolejnice. Poté obsluha postupně přejíždí vozíky po kolejnicích a dotahuje šrouby volnou kolejnici v takové poloze, aby obě kolejnice byly vzájemně rovnoběžné. Tímto způsobem se zaručí, že nedojde ke vzpříčení vozíků během pohybu.

4.3 Motory

4.3

Pro pohon daného mechanismu byly vybrány lineární motory. Lineární motor je netočivý elektrický stroj, tzn. nemá žádné rotační součásti. Jeho stator je rozvinutý po celé délce pojezdové dráhy stroje. Vyznačuje se velkou dynamikou, rychlostí lineárního posuvu, vysokou přesností a kompaktním uspořádáním. Jednou z výhod

lineárního motoru je absence mechanických převodů, které zvyšují nepřesnost polohování. Z tohoto hlediska se lineární motor jeví pro dané řešení jako ideální, i když je jeho cena vyšší než např. cena krokového motoru. [23]

Lineární motory byly vybrány také z hlediska bezpečnosti. Pokud obsluha nechá ruku na sleeve a stůl se začne přisunovat, mohlo by dojít ke skřípnutí operátorovy ruky. Lineární motor však nemá tak velkou sílu, aby ruku dokázal přitlačit k válci. Obsluha tak v případě nebezpečí dokáže stůl zastavit rukou.

Výpočet nominální síly motoru:

Motory musí být schopny hýbat stolem v případě, kdy a) budou zabírat oba motory a nastane translace, tak b) bude zabírat jeden motor a nastane rotace stolu. Přibližná váha stolu $m = 25 \text{ kg}$.

a)

$$F_D = m \cdot a = 25 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 1,617 \text{ N} \quad (4.7)$$

kde:

F_D	N	- je dynamická síla
m	kg	- je hmotnost stolu
a	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	- je zrychlení motoru

$$\begin{aligned} F_T &= m \cdot g \cdot f + n \cdot 0,03 \cdot C \cdot f = \\ &= 25 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,015 + 6 \cdot 0,03 \cdot 9000 \text{ N} \\ &\quad \cdot 0,015 = 28,017 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.8)$$

kde:

F_T	N	- je třecí síla
m	kg	- je hmotnost stolu
g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	- je gravitační zrychlení
f	-	- je součinitel tření kolejničky
n	-	- je počet vozíků
C	N	- je dynamická únosnost vozíků

$$F_C = F_D + F_T = 1,617 \text{ N} + 28,017 \text{ N} = 29,634 \text{ N} \quad (4.9)$$

kde:

F_C	N	- je celková síla
F_D	N	- je dynamická síla
F_T	N	- je třecí síla

Jelikož zabírají oba motory, nominální síla pro jeden motor se rovná polovině F_C , tzn. $F_N = 14,817 \text{ N}$.

b)

$$F_D = m \cdot a = 25 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 1,617 \text{ N} \quad (4.10)$$

kde:

F_D	N	- je dynamická síla
m	kg	- je hmotnost stolu
a	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	- je zrychlení motoru

$$F_T = m \cdot g \cdot f + n \cdot 0,03 \cdot C \cdot f = \quad (4.11)$$

$$= 25 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,015 + 4 \cdot 0,03 \cdot 9000 \text{ N} \cdot 0,015 = 19,917 \text{ N}$$

kde:

F_T	N	- je třecí síla
m	kg	- je hmotnost stolu
g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	- je gravitační zrychlení
f	-	- je součinitel tření kolejničky
n	-	- je počet vozíků
C	N	- je dynamická únosnost vozíků

$$F_C = F_D + F_T = 1,617 \text{ N} + 19,917 \text{ N} = 21,534 \text{ N} \quad (4.12)$$

kde:

F_C	N	- je celková síla
F_D	N	- je dynamická síla
F_T	N	- je třecí síla

Minimální nominální síla motoru je tak $F_N = F_C = 21,534 \text{ N}$. Na základě výpočtů byla vybrána primární část lineárního motoru MCP020C-V180-NI-N0CN-NNN a sekundární část motoru MCS020-3S-0300-NNNN od firmy Rexroth Bosch Group. Nominální síla tohoto motoru je $F_N = 39,0 \text{ N}$. Motory jsou uloženy na základní desce v připravených drážkách a jejich spojení s vozíky na lineárním vedení je zajištěno pomocí malé desky.



Obr. 4-3 Lineární motor firmy Rexroth [24]

4.4 Ložiska

Ložiska jsou zatěžována jak v axiálním, tak v radiálním směru. Pro dané řešení se nabízí použití ložisek s kosoúhlým stykem, která jsou schopna přenášet radiální i axiální zatížení. Tato ložiska se vždy používají v páru. Montují se buď čely k sobě („do X“) nebo zády k sobě („do O“), případně lze využít i dvouřadá ložiska s kosoúhlým stykem. Dvouřadá ložiska s kosoúhlým stykem konstrukčně vycházejí ze dvou jednořadých kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem, ale jejich výhodou je menší šířka a také přenáší obousměrné axiální zatížení. Vzhledem k úspoře zástavbového prostoru bylo zvoleno dvouřadá ložisko s kosoúhlým stykem ZKLN2052-2RS-XL od firmy INA. [25]

Výpočet součinitele statické bezpečnosti

Při výpočtu statické bezpečnosti je třeba uvažovat moment, který vyvolá operátor, když se opře o stůl. Pro výpočet je uvažovaná hodnota vyvolané síly $F_O = 100$ N. Obsluha se nejpravděpodobněji opře zhruba v polovině přední hrany stolu, rameno, na kterém síla působí je tak $r = 488,1$ mm.

$$M_O = F_O \cdot r = 100 \text{ N} \cdot 488,1 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 48,81 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4.13)$$

kde:

M_O	$\text{N} \cdot \text{m}$	- je moment působící v ložisku při opření
F_O	N	- je síla, kterou člověk působí
r	m	- je rameno, na kterém síla působí

$$x_K = \frac{\left(\frac{D}{2} + \frac{d}{2}\right)}{2} \cdot \sin(\alpha_S) = \frac{\left(\frac{52}{2} + \frac{20}{2}\right)}{2} \text{ mm} \cdot \sin(60^\circ) \quad (4.14)$$

$$= 15,59 \text{ mm}$$

kde:

x_K	mm	- je vzdálenost působíště sil od os kuliček v ose x
D	mm	- je vnější průměr ložiska
d	mm	- je vnitřní průměr ložiska
α_S	°	- je styčný úhel

$$P_1 = x - \frac{B}{4} = 15,59 \text{ mm} - \frac{28}{4} \text{ mm} = 8,59 \text{ mm} \quad (4.15)$$

$$P_2 = x - \frac{3 \cdot B}{4} = 15,59 \text{ mm} - \frac{3 \cdot 28}{4} \text{ mm} = 36,59 \text{ mm} \quad (4.16)$$

kde:

P_1	mm	- je vzdálenost působíště sil v bodě 1 od bodu 0
P_2	mm	- je vzdálenost působíště sil v bodě 2 od bodu 0
B	mm	- je šířka ložiska

$$F_{r1m} = \frac{M_O}{P_1 + P_2} = \frac{48,81 \text{ N} \cdot \text{m}}{(8,59 + 36,59) \text{ mm}} = 1\,081 \text{ N} \quad (4.17)$$

$$(4.18)$$

$$F_{r2m} = F_{r1m} = 1\,081 \text{ N} \quad (4.19)$$

kde:

F_{r1m}	N	- je radiální síla v bodě 1 od momentu M_O
F_{r2m}	N	- je radiální síla v bodě 2 od momentu M_O

$$F_{a1m} = F_{r1m} \cdot \tan(\alpha) = 1\,081\,N \cdot \tan(60^\circ) = 1\,871\,N \quad (4.20)$$

$$F_{a2m} = F_{r2m} \cdot \tan(\alpha) + F_{\zeta} = 1\,081\,N \cdot \tan(60^\circ) + 100\,N = 1\,971\,N \quad (4.21)$$

kde:

F_{a1m}	N	- je axiální síla v bodě 1 od momentu M_O
F_{a2m}	N	- je axiální síla v bodě 2 od momentu M_O

$$F_{ap} = F_p = 7\,157\,N \quad (4.22)$$

$$F_{rp} = \frac{F_{ap}}{\tan(\alpha)} = \frac{7\,157\,N}{\tan(60^\circ)} = 4\,132\,N \quad (4.23)$$

kde:

F_p	N	- je síla od předpětí
F_{ap}	N	- je axiální síla od předpětí
F_{rp}	N	- je radiální síla od předpětí

$$F_a = F_{ap} + F_{a1m} + F_{a2m} = 7\,157\,N + 1\,871\,N + 1\,971\,N = 10\,999\,N \quad (4.24)$$

$$F_r = 2 \cdot F_{rp} + F_{r1m} + F_{r2m} = 2 \cdot 4\,132\,N + 1\,081\,N + 1\,081\,N = 10\,426\,N \quad (4.25)$$

kde:

F_a	N	- je celkové axiální zatížení
F_r	N	- je celkové radiální zatížení

$$P_0 = F_r + 0,52 \cdot F_a = 10\,426\,N + 0,52 \cdot 10\,999\,N = 16\,145,5\,N \quad (4.26)$$

kde:

P_0	N	- je ekvivalentní statické zatížení ložiska
-------	---	---

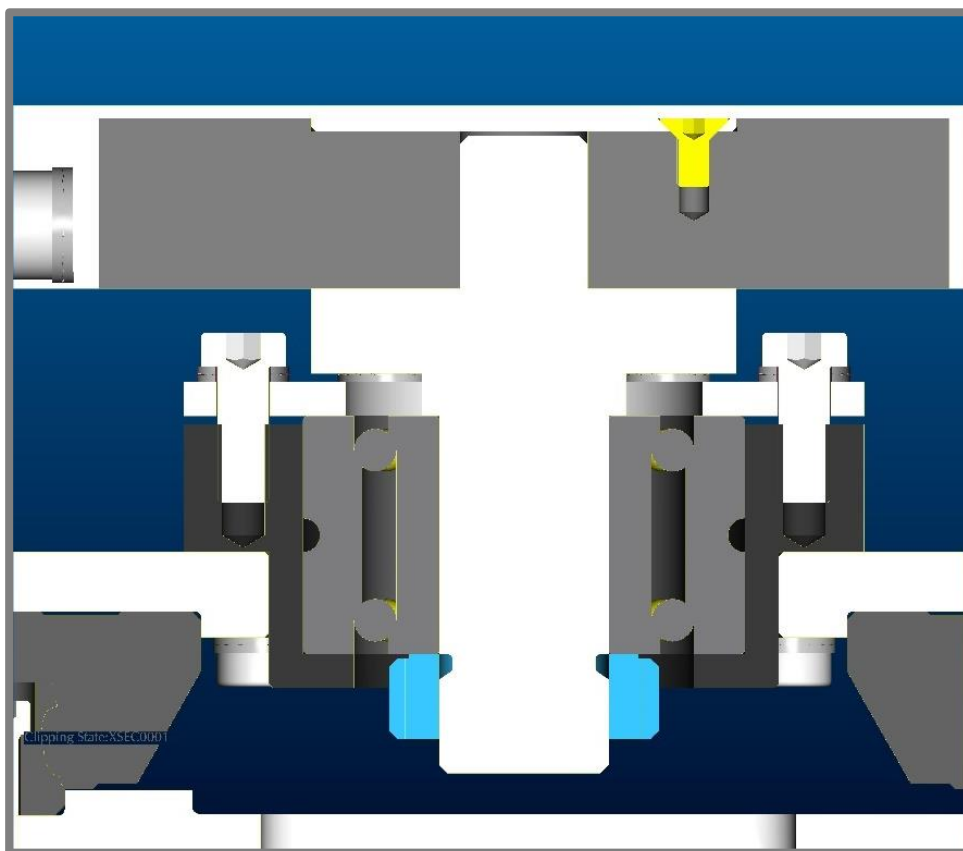
$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} = \frac{47\,000\,N}{16\,145,5\,N} = 2,911 \quad (4.27)$$

kde:

s_0	-	- je součinitel statické bezpečnosti
C_0	N	- je statická únosnost ložiska
P_0	N	- je ekvivalentní statické zatížení ložiska

Uložení ložiska je zobrazeno na obrázku Obr.4-4. Ložisko je uloženo v domku a zajištěno přírubou a šesti šrouby. Požadované předpětí je zajištěno pomocí pojistné matice HIR-20 od firmy HIWIN. Celý domek pro ložisko je uchycen pomocí šesti šroubů k pásovici, která umožňuje uchycení k vozíkům pro příčný posuv na levé straně

stolu, na straně pravé k uchycení přes distanční trubky k desce poháněné lineárním motorem.

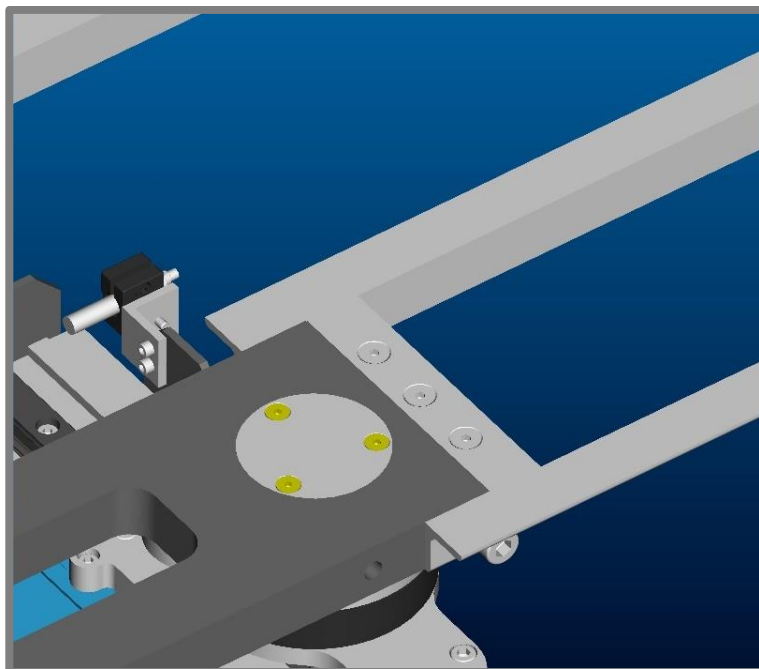


Obr. 4-4 Uložení ložiska

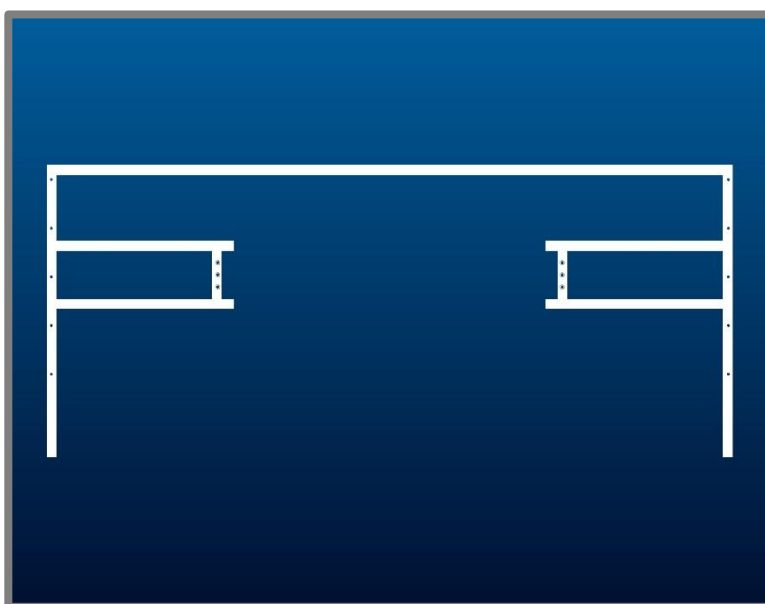
4.5

4.5 Návrh pracovní desky

Pracovní deska stolu musí být dostatečně tuhá a pevná, aby se vlastní vahou neprohýbala. Rám pracovní desky je svařen z L-profilů 20x20x3 mm. Propojení čepů je zajištěno pomocí desky, která je vyrobena z duralu, a to z důvodu redukce celkové váhy stolu. Tato duralová deska slouží také k propojení rámu pracovní desky se zbytkem stroje. Na duralové desce jsou vyfrézované drážky, do kterých se rám pracovní desky zasadí a následně zajistí pomocí šroubů s plochou hlavou. K zadní části stolu je přichycen hliníkový plech sloužící jako pracovní deska. V přední části stolu je uvažováno odsávání pro fixaci štočku během manipulace. Pro uchycení tohoto odsávání jsou v duralové desce předpřipraveny otvory pro šrouby.



Obr. 4-5 Spojení rámu stolu s duralovou deskou



Obr. 4-6 Rám pracovní desky

4.6 Odměrování a senzory

4.6

Aby stroj věděl, ve které poloze se nachází, je třeba použít odměrování a senzory. K odměrování polohy byl vybrán lineární magnetický snímač polohy LM 10 od firmy Renishaw, což je bezkontaktní, vysokorychlostní snímač, jenž je tvořen kompaktní uzavřenou čtecí hlavou, která je připevněna k desce spojující lineární motor a lineární vedení a pohybuje se nad nalepovací magnetickou stupnicí. [26] Na výběr je z rozlišení snímačů 1, 2, 5, 10, 20 nebo 50 μm , vybráno bylo rozlišení 1 μm . Tím pádem nejmenší krok lineárního motoru je 1 μm . Dále jsou ke snímání nulové polohy

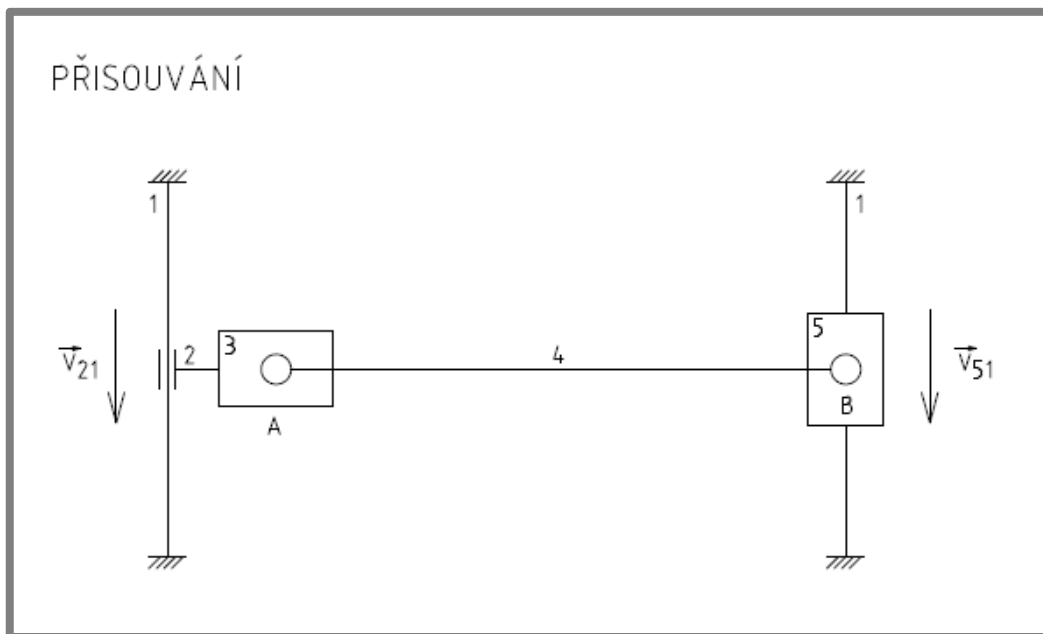
stroje potřeba senzory. Byly vybrány indukční senzory IR020BE37VB od firmy Wenglor, které jsou umístěny v zadní části stroje na levé a pravé straně nosné desky, kde snímají pohyb desek spojujících motory s lineárním vedením. Pod přední částí nosné desky u odtlačovacích šroubů je umístěn indukční senzor IN30-E0407K, který má bezpečnostní funkci. Když se stůl odklopí, senzor okamžitě odpojí celou výkonovou sekci stroje a zabrání se tak případnému zranění obsluhy. Toto bezpečnostní opatření je součástí již předchozího vývojového stupně montážní stolice.



Obr. 4-7 Snímač polohy LN10 firmy Renishaw [26]

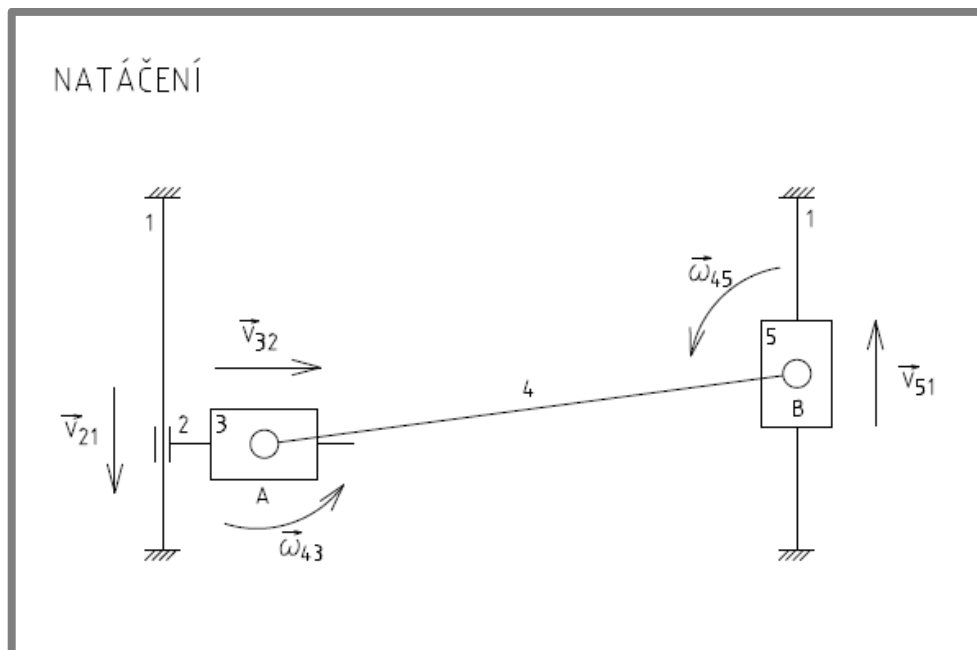
4.7

4.7 Kinematika



Obr. 4-8 Kinematické schéma přisouvání [autor]

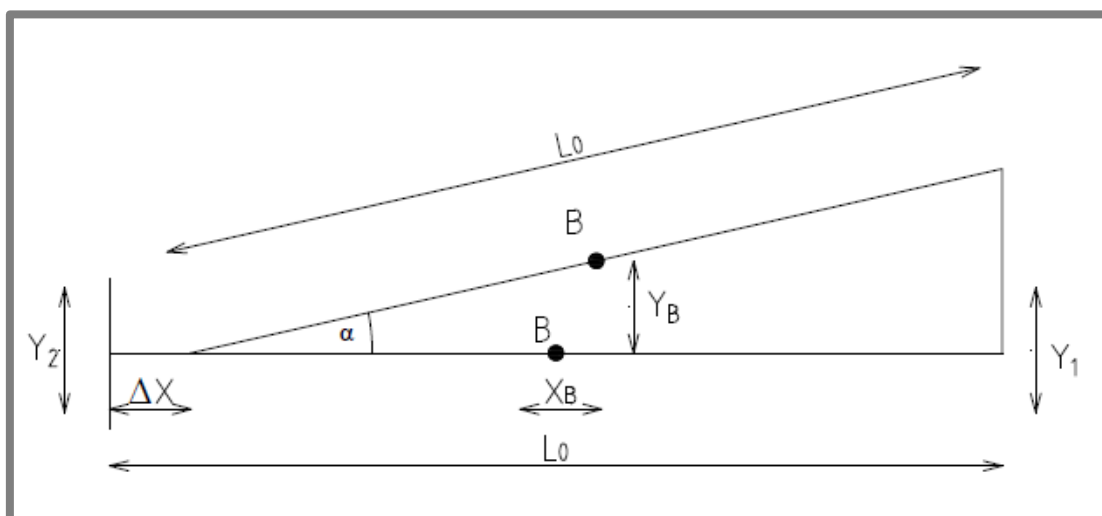
Na obrázku Obr. 4-8 je zobrazeno kinematické schéma pro přisouvání. Pokud rychlosti v_{21} a v_{51} mají stejnou velikost a směr, dochází k přisouvání stolu k ose válce. Na Obr. 4-9 je zobrazeno kinematické schéma pro natáčení. Pokud tyto rychlosti mají směr opačný, dochází k natáčení stolu v ložiscích A a B.



Obr. 4-9 Kinematické schéma natáčení [autor]

4.8 Přesnost polohování

4.8



Obr. 4-10 Schéma pro výpočet přesnosti [autor]

Jak již bylo výše uvedeno, nejmenší krok lineárního motoru je $1 \mu\text{m}$. Výpočet přesnosti pro natáčení stolu je uveden v rovnicích 4.28-30.

$$\alpha = \sin \frac{Y_1}{L_0} = \sin \frac{1 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{625 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \approx 2,79 \cdot 10^{-8^\circ} \quad (4.28)$$

kde:

- | | | |
|----------|----------|---------------------------|
| α | $^\circ$ | - je úhel natočení |
| Y_1 | m | - je krok motoru |
| L_0 | m | - je vzdálenost mezi čepy |

$$\begin{aligned} X_B &= L_0 \cdot (1 - \cos(\sin(\alpha))) = & (4.29) \\ &= 625 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot (1 - \cos(\sin(2,79 \cdot 10^{-8}))) \approx 0 \text{ m} \end{aligned}$$

kde:

X_B	m	- je posunutí v ose x
L_0	m	- je vzdálenost mezi čepy
α	°	- je úhel natočení

$$\begin{aligned} Y_B &= \frac{L_0 \cdot \sin^{-1}(\alpha)}{2} = \frac{625 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \sin^{-1}(2,79 \cdot 10^{-8})}{2} & (4.30) \\ &= 5 \cdot 10^{-7} \text{ m} \end{aligned}$$

kde:

Y_B	m	- je posunutí v ose y
L_0	m	- je vzdálenost mezi čepy
α	°	- je úhel natočení

Přesnost, v místě uprostřed mezi čepy při nejmenším kroku lineárního motoru, je tak zhruba 0,5 μm .

5 DISKUZE

Z koncepčních návrhů byla vybrána varianta C – „Lineární motory“. Pracovní deska je opatřena dvěma čepy, které jsou uloženy ve dvouřadých ložiscích s kosoúhlým stykem. Základem tohoto návrhu jsou dva lineární motory, které se pohybují po rovnoběžných drahách. Ložiska jsou uložena na deskách poháněných lineárními motory. Pokud se motory pohybují stejnou rychlostí stejného směru, dochází k přisouvání stolu k ose válce. Druhou možností je situace, kdy se motory pohybují opačným směrem, tehdy dochází k natáčení stolu v horizontální poloze.

Z konstrukce montážního stolu vyplývá, že zdvih lineárních motorů je zhruba 102 mm, což je o 22 mm více než požadovaných 80 mm. Byl tak získán větší manipulační prostor, než bylo požadováno, a to je plusem.

Rozlišení lineárního magnetického snímače polohy LM 10 bylo zvoleno 1 μm , tím pádem nejmenší možný krok lineárního motoru je právě 1 μm . Lineární motory jsou tak schopny přisouvat stůl s rozlišením 1 μm , rotovat se stolem v horizontální poloze jsou schopny s rozlišením 0,5 μm . Požadované rozlišení pohybu je 5 μm .

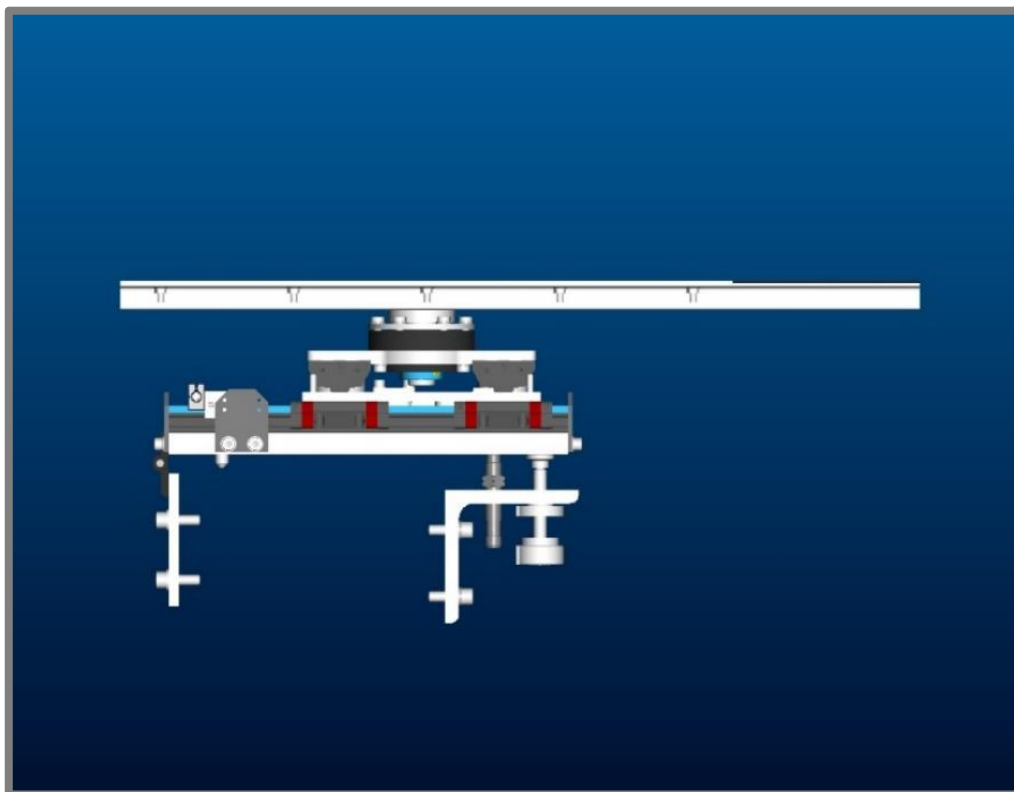
Celková výška montážního stolu je 130,5 mm, což je o 10,5 mm více, než je maximální požadovaná výška 120 mm. Snížení výšky by mohlo přinést jiné uložení domků pro ložiska, které by umožnilo domky více zapustit do pásovic. Jinou možností je použití axiálních ložisek, jako např. ložiska od firmy THK [27]. Tyto ložiska jsou nižší než použitá ložiska, jsou ale také dražší, a to je důvod proč nebyly použity. Po konzultaci s konstruktérem firmy Soma p. Ing. Skalickým byl tento problém vyřešen tak, že dojde ke snížení nosníku na montážní stoličce, na který bude stůl připevněn.

V přední části montážního stolu bude systém odsávání (na Obr.5-3 průhledně černá barva), který bude mít za úkol fixovat štoček v určité poloze během pohybu stolu. Proto jsou v duralové desce připraveny čtyři otvory se závity pro uchycení systému odsávání ke konstrukci. Dále je možno využít otvory pro šrouby v rámu pracovní desky a také přední část rámu.

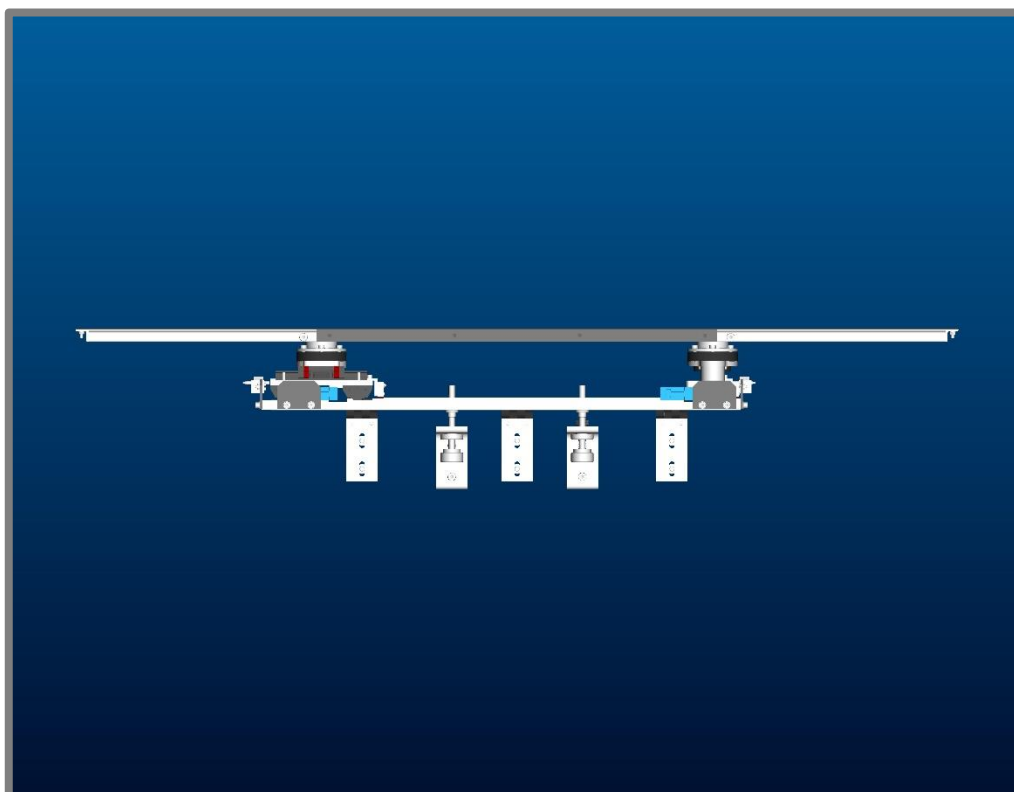
Rozpočet na konstrukci montážního stolu je 6000 €, odhadovaná cena stolu je cca 4050 €. Nejdražšími komponentami celého řešení jsou lineární motory, které zabírají zhruba 34,5 % z odhadované ceny. Také lineární vedení tvoří velkou část ceny, asi 20 %. Nejdražší položkou z lineárního vedení jsou vzhledem k počtu mazací nástavce, jenž se vždy montují po dvou kusech na jeden vozík. Na obráběné části stroje připadá zhruba 27 % ceny.



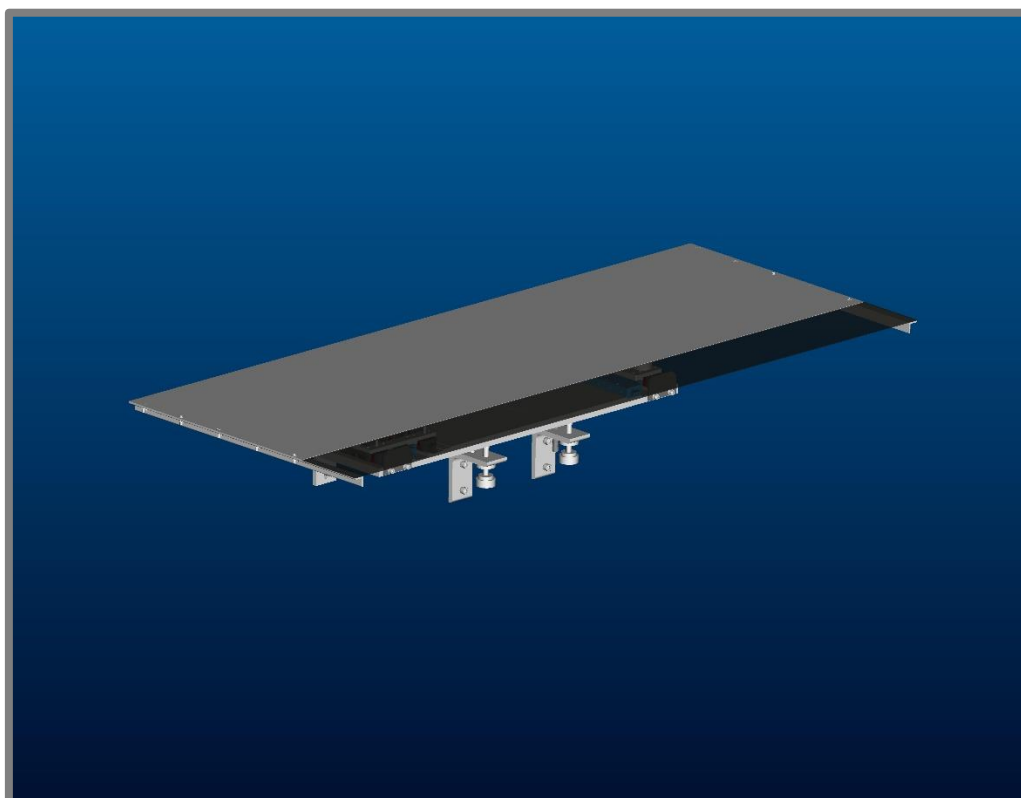
Obr. 5-1 Axiální ložiska THK [27]



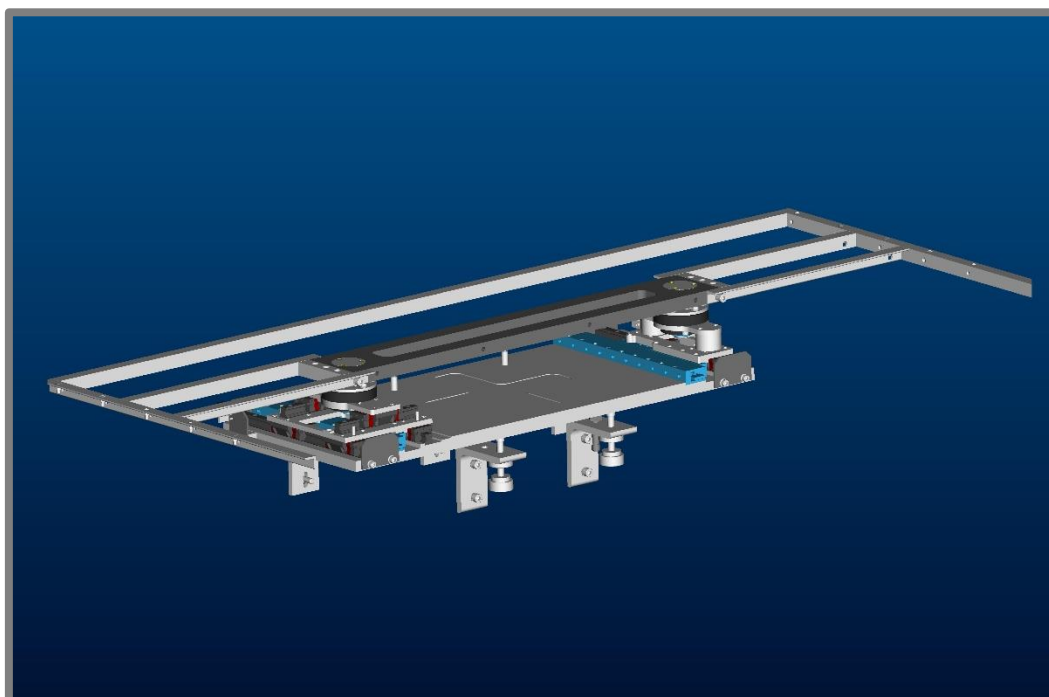
Obr. 5-2 Návrh konstrukce – levý pohled



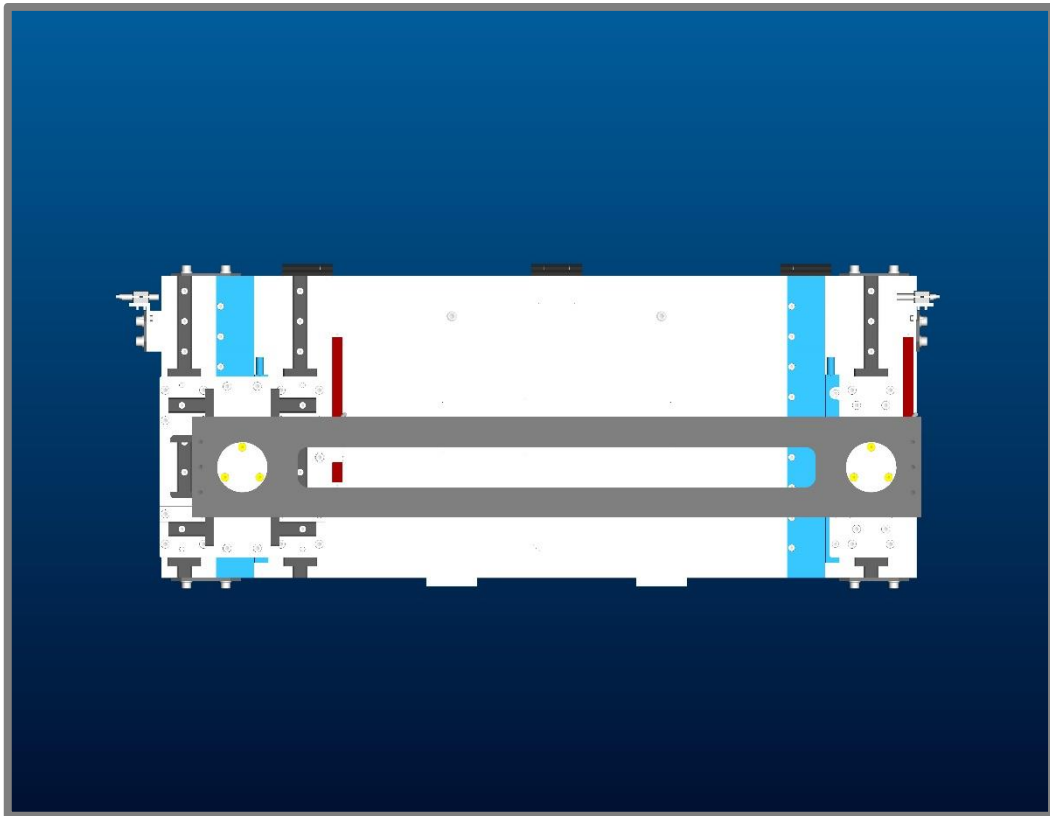
Obr. 5-3 Návrh konstrukce – přední pohled



Obr. 5-4 Návrh konstrukce



Obr. 5-5 Konstrukce bez pracovní desky



Obr. 5-6 Konstrukce bez rámu desky

6 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout koncepci montážního stolu pro umístění štočku na sleeve podle mikrobodu. Jako pohon byly zvoleny dva lineární motory, jejichž dráhy pohybu jsou rovnoběžné. Pracovní desce je umožněna rotace díky dvěma čepům uloženým ve dvouřadých ložiscích s kosouhlým stykem.

Dále byly firmou SOMA určeny požadavky na montážní stůl. Zdvih lineárních motorů je 102 mm, což je o 22 mm více, než požadovaných 80 mm. Přesnost prisouvání hrany stolu k ose válce je 1 μm a přesnost natáčení desky je 0,5 μm . Stanovený rozpočet na konstrukci stolu nebyl překročen, celková suma tvoří 4050 €. Pro odsávací systém jsou předpřipraveny otvory se závitem pro šrouby i průchozí díry pro šrouby, kterými se systém ke konstrukci montážního stolu může uchytit. Jediný bod zadání, který se nepovedlo dodržet je maximální požadovaná výška konstrukce 120 mm. Tento rozměr byl přesažen o 11 mm. Problém ale bude vyřešen snížením nosníku stroje, na kterém je montážní stůl uložen.

Tento projekt je základem pro další chystané projekty ve firmě Soma. Například už zmíněný systém odsávání přední části stolu, dále výsuvná přední část montážního stolu, která není součástí konstrukce navržené v této bakalářské práci, nebo konstrukce přítlačného válce pro nalepení štočku na sleeve. O tom, zda bude tento projekt uveden do výroby se rozhodne v horizontu následujících měsíců.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *SOMA Engineering* [online]. 2015 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.soma-eng.com/>
- [2] Soma (společnost). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Soma_\(spole%C4%8Dnost\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Soma_(spole%C4%8Dnost))
- [3] THOMA, Patrik. Flexotisk. In: *Svět tisku* [online]. Praha: Svět tisku, 2005 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=1960&buxus_svettsku=b1c.
- [4] PAVLAS, P. *Návrh suportu, jeho uložení a pojezdu pro přítlačný válec k nalepení tiskové desky na montážním stroji*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 43 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Michal Černý, CSc.
- [5] SKALICKÝ, L. *Návrh uložení a pohonu chladicího válce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Brandejs, CSc.
- [6] Fully Automatic Mounting Machine (FAMM) 2.0. *AV Flexologic*[online]. 2017 [cit. 2017-01-11]. Dostupné z: <https://www.flexologic.nl/products/fully-automatic-flexo-plate-mounter-famm-2/>
- [7] AV Flexologic B.V. *Automatic Mounting System*, Inventor: Petrus Johannes Marie OTTEN. European patent application. EP1727677B1. 31.12.2008
- [8] Fully Automatic Flexo Plate Mounting Machine | FAMM 2.0 at Drupa. In: *Youtube* [online]. 29.5.2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=ZXBM5Mrvb_s
- [9] Semi-Automatic Mounting Machine (SAMM). *AV Flexologic*[online]. 2017 [cit. 2017-01-11]. Dostupné z: <https://www.flexologic.nl/products/semi-automatic-flexo-plate-mounting-machine/>
- [10] Semi-Automatic Mounting Machine. In: *Youtube* [online]. 8.8.2014 [cit. 2017-1-11]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=QLEprkXuVUs>
- [11] AutoMounter. *JM Heaford* [online]. 2013 [cit. 2017-01-11]. Dostupné z: <http://www.jmheaford.co.uk/products/automounter.html>
- [12] J M Heaford AutoMounter Printing Plate Machine. In: *Youtube* [online]. 10.9.2016 [cit. 2017-1-11]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Fku6l61K7y0>

- [13] FLEXIBLE: UNICA 343 VM. *BIEFFEBI* [online]. 2016 [cit. 2017-01-11].
Dostupné z: <http://www.bieffebi.it/en/unica-343-vm-en/>
- [14] TL APPLICATION (EN). In: *Youtube* [online]. 19. 1. 2016 [cit. 2017-01-12].
Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=Jz1XV_wTqsg
- [15] VDP SYSTEM (EN). In: *Youtube* [online]. 8. 6. 2015 [cit. 2017-01-12].
Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=rVzLx7a8kDg>
- [16] STAR-HD: THE HIGH-DEFINITION PLATE MOUNTER FOR MICRODOTS. *STI converting Site* [online]. 2016 [cit. 2017-01-11]. Dostupné z: <http://flexo.sti-sa.info/star-hd-microdots-mounter>
- [17] STAR-HD microdots plate mouter. In: *Youtube* [online]. 18. 4. 2015 [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=CZq1Qzch3WY>
- [18] H-Bot 3D Printer HB1 No.22. In: *Youtube* [online]. 29.8.2013 [cit. 2017-02-17].
Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=yZm4TXPPITo>
- [19] Co jsou a jak fungují kuličkové šrouby. *Technické zajímavosti* [online]. 2014 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://technicke-zajimavosti.blogspot.cz/2014/08/co-jsou-jak-funguji-kulickove-srouby.html>
- [20] ROTAČNÍ OSY DYNX. *ETEL* [online]. [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.etel.ch/cz/pohybove-systemy/rotacni-osy/dxr/>
- [21] Lineární vedení. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Line%C3%A1rn%C3%AD_veden%C3%AD
- [22] MONORAIL BM Profiled lineat ball guides. SCHNEEBERGER [online]. 2017 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <https://www.schneeberger.com/en/products/linear-bearings-and-profiled-guideways/profiled-guideway/monorail-bm-balls/#downloadscatalogue>
- [23] Lineární elektromotor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Line%C3%A1rn%C3%AD_elektromotor
- [24] Linear motors MCL – dynamic and compact. In: *Rexroth Bosh Group: The Drive & Control Company* [online]. Lohr am Main [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.boschrexroth.com/dcc/Vornavigation/Vornavi.cfm?Language=EN&PageID=p542694>

- [25] Dvouřadá kuličková ložiska s kosoúhlým stykem. *SKF CZ, a.s.* [online]. Göteborg, 2017 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/ball-bearings/angular-contact-ball-bearings/double-row-angular-contact-ball-bearings/index.html>
- [26] LM10 linear magnetic encoder system. In: *Renishaw* [online]. 2017 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/lm10-linear-magnetic-encoder-system--9226>
- [27] Cross-Roller Ring. *THK* [online]. Tokyo, 2017 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.thk.com/?q=eng/node/252>

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN**8**

např.		- například
Obr.		- obrázek
tzv.		- tak zvaně
tzn.		- to znamená
UV záření		- ultra fialové záření
PET		- polyethylentereftalát
FAMM 2.0		- Fully Automatic Mounting Machine 2.0
SAMM		- Semi-Automatic Mounting Machine
cca		- cirka
3D		- 3 Dimensional
M_P	$N \cdot m$	- je celkový moment v bodě P
$M_{\check{C}}$	$N \cdot m$	- je moment, který způsobí ručka v bodě P
M_Z	$N \cdot m$	- je moment vyvolaný závažím v bodě P
M_{Sv}	$N \cdot m$	- je moment vyvolaný hmotou stolu v bodě P
M_{Sz}	$N \cdot m$	- je moment vyvolaný hmotou stolu v bodě P
M_O	$N \cdot m$	- je moment působící v ložisku při opření
G_{Sv}	N	- je gravitační síla stolu ve vysunutém stavu
G_Z	N	- je gravitační síla závaží
$F_{\check{C}}$	N	- je síla, kterou působí ručka obsluhy
G_{Sz}	N	- je gravitační síla stolu v zasunutém stavu
G_Z	N	- je gravitační síla závaží
C_0	N	- je statická únosnost vozíku
$\max(P)$	N	- je maximální zátěž vozíku
F_D	N	- je dynamická síla
F_T	N	- je třecí síla
C	N	- je dynamická únosnost vozíků
F_C	N	- je celková síla
F_D	N	- je dynamická síla
F_T	N	- je třecí síla
F_O	N	- je síla, kterou člověk působí
F_{r1m}	N	- je radiální síla v bodě 1 od momentu M_O
F_{r2m}	N	- je radiální síla v bodě 2 od momentu M_O
F_{a1m}	N	- je axiální síla v bodě 1 od momentu M_O
F_{a2m}	N	- je axiální síla v bodě 2 od momentu M_O
F_p	N	- je síla od předpětí
F_{ap}	N	- je axiální síla od předpětí
F_{rp}	N	- je radiální síla od předpětí
F_a	N	- je celkové axiální zatížení
F_r	N	- je celkové radiální zatížení
P_0	N	- je ekvivalentní statické zatížení ložiska
C_0	N	- je statická únosnost ložiska
l_1	m	- je vzdálenost od pantu k hraně stolu
l_2	m	- je vzdálenost těžiště stolu od pantu
x	m	- je vzdálenost těžiště závaží od pantu
l_3	m	- je vzdálenost těžiště stolu od pantu

r	m	- je rameno, na kterém síla působí
Y_1	m	- je krok motoru
L_0	m	- je vzdálenost mezi čepy
X_B	m	- je posuv v ose x
Y_B	m	- je posuv v ose y
x_K	mm	- je vzdálenost působíště sil od os kuliček v ose x
D	mm	- je vnější průměr ložiska
d	mm	- je vnitřní průměr ložiska
P_1	mm	- je vzdálenost působíště sil v bodě 1 od bodu 0
P_2	mm	- je vzdálenost působíště sil v bodě 2 od bodu 0
B	mm	- je šířka ložiska
m	kg	- je hmotnost stolu
a	$m \cdot s^{-2}$	- je zrychlení motoru
g	$m \cdot s^{-2}$	- je gravitační zrychlení
α_S	°	- je styčný úhel
α	°	- je úhel natočení
f_S	-	- je statický faktor
f	-	- je součinitel tření kolejnice
n	-	- je počet vozíků
s_0	-	- je součinitel statické bezpečnosti

9 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK**Seznam obrázků:**

Obr. 0-1 Villa Globe a Soma Globe [1]	12
Obr. 1-1 Schéma tisku [4]	13
Obr. 1-2 Štoček	14
Obr. 1-3 Štočky na sleevech	14
Obr. 1-4 Montážní stolice FLEXMONT [1]	16
Obr. 1-5 Fully Automatic Mounting Machine (FAMM) 2.0 [6]	16
Obr. 1-6 Semi-Automatic Mounting Machine (SAMM) [9]	17
Obr. 1-7 AutoMounter [11]	17
Obr. 1-8 UNICA 343 VM [13]	18
Obr. 1-9 STAR-HD [16]	18
Obr. 3-1 Pohon řemenem	21
Obr. 3-2 Pohon kuličkovým šroubem	22
Obr. 3-3 Varianta A	23
Obr. 3-4 Varianta B	24
Obr. 3-5 Varianta C	25
Obr. 4-1 Schéma silového působení	29
Obr. 4-2 Kolejnice, vozík a mazací nástavec firmy Schneeberger [22]	31
Obr. 4-3 Lineární motor firmy Rexroth [24]	33
Obr. 4-4 Uložení ložiska	36
Obr. 4-5 Spojení rámu stolu s duralovou deskou	37
Obr. 4-6 Rám pracovní desky	37
Obr. 4-7 Snímač polohy LN10 firmy Renishaw [26]	38
Obr. 4-8 Kinematické schéma prisouvání [autor]	38
Obr. 4-9 Kinematické schéma natáčení [autor]	39
Obr. 4-10 Schéma pro výpočet přesnosti [autor]	39
Obr. 5-1 Axiální ložiska THK [27]	41
Obr. 5-2 Návrh konstrukce – levý pohled	42
Obr. 5-3 Návrh konstrukce – přední pohled	42
Obr. 5-4 Návrh konstrukce	43
Obr. 5-5 Konstrukce bez pracovní desky	43
Obr. 5-6 Konstrukce bez rámu desky	44

Seznam tabulek:

Tabulka 3-1: Odhad cen – varianta A	26
Tabulka 3-2: Odhad cen – varianta B	27
Tabulka 3-3: Odhad cen – varianta C	27

10 **10 SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha I – Výpočet lineárního vedení

Příloha II – Návrhový výkres

SAMOSTATNÉ PŘÍLOHY

Příloha I

Výpočet lineárního vedení

Výpočet zátěže vozíků:

1) Rovnoměrný pohyb, radiální zátěž P_n :

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \frac{m_1 \cdot g}{4} - \frac{m_1 \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1} + \frac{m_1 \cdot g \cdot l_4}{2 \cdot l_2} + \frac{m_2 \cdot g}{4} + \frac{m_{\check{c}} \cdot g \cdot l_7}{2 \cdot l_1} - \frac{m_{\check{c}} \cdot g \cdot l_8}{2 \cdot l_2} = \\
 &= \frac{12 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{4} - \frac{12 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} + \\
 &+ \frac{12 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 40 \text{ mm}}{2 \cdot 115 \text{ mm}} + \frac{2 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{4} + \\
 &+ \frac{10 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 375 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} - \frac{10 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 317,5 \text{ mm}}{2 \cdot 115 \text{ mm}} = \\
 &= 68,93 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_2 &= \frac{m_1 \cdot g}{4} + \frac{m_1 \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1} + \frac{m_1 \cdot g \cdot l_4}{2 \cdot l_2} + \frac{m_2 \cdot g}{4} - \frac{m_{\check{c}} \cdot g \cdot l_7}{2 \cdot l_1} - \frac{m_{\check{c}} \cdot g \cdot l_8}{2 \cdot l_2} = \\
 &= \frac{12 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{4} + \frac{12 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} + \\
 &+ \frac{12 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 40 \text{ mm}}{2 \cdot 115 \text{ mm}} + \frac{2 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{4} - \\
 &- \frac{10 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 375 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} - \frac{10 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 317,5 \text{ mm}}{2 \cdot 115 \text{ mm}} = \\
 &= -230,16 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_3 &= \frac{m_1 \cdot g}{4} + \frac{m_1 \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1} - \frac{m_1 \cdot g \cdot l_4}{2 \cdot l_2} + \frac{m_2 \cdot g}{4} - \frac{m_{\check{c}} \cdot g \cdot l_7}{2 \cdot l_1} + \frac{m_{\check{c}} \cdot g \cdot l_8}{2 \cdot l_2} = \\
 &= \frac{12 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{4} + \frac{12 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} - \\
 &- \frac{12 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 40 \text{ mm}}{2 \cdot 115 \text{ mm}} + \frac{2 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{4} - \\
 &- \frac{10 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 375 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} + \frac{10 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 317,5 \text{ mm}}{2 \cdot 115 \text{ mm}} = \\
 &= -0,26 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_4 &= \frac{m_1 \cdot g}{4} - \frac{m_1 \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1} - \frac{m_1 \cdot g \cdot l_4}{2 \cdot l_2} + \frac{m_2 \cdot g}{4} + \frac{m_{\check{c}} \cdot g \cdot l_7}{2 \cdot l_1} + \frac{m_{\check{c}} \cdot g \cdot l_8}{2 \cdot l_2} = \\
 &= \frac{12 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{4} - \frac{12 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} - \\
 &- \frac{12 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 40 \text{ mm}}{2 \cdot 115 \text{ mm}} + \frac{2 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{4} + \\
 &+ \frac{10 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 375 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} + \frac{10 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 317,5 \text{ mm}}{2 \cdot 115 \text{ mm}} =
 \end{aligned}$$

$$+ \frac{10 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 375 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} + \frac{10 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 317,5 \text{ mm}}{2 \cdot 115 \text{ mm}} =$$

$$= 298,83 \text{ N}$$

kde:

P_1	N	- je zátěž vozíku 1 během rovnoměrného pohybu
P_2	N	- je zátěž vozíku 2 během rovnoměrného pohybu
P_3	N	- je zátěž vozíku 3 během rovnoměrného pohybu
P_4	N	- je zátěž vozíku 4 během rovnoměrného pohybu
m_1	kg	- je hmotnost hmoty stolu, těžiště této hmoty mění polohu v ose y i v ose x
m_2	kg	- je hmotnost hmoty stolu, těžiště této hmoty mění polohu pouze v ose x
$m_{\check{c}}$	kg	- je hmotnost, kterou se člověk opře o hranu stolu
l_1	mm	- je vzdálenost předních a zadních vozíků
l_2	mm	- je vzdálenost mezi kolejnicemi
l_3	mm	- je vzdálenost těžiště T_1 od těžiště T_2 v ose x
l_4	mm	- je vzdálenost těžiště T_1 od těžiště T_2 v ose y
l_7	mm	- je vzdálenost působíště síly od člověka v ose x
l_8	mm	- je vzdálenost působíště síly od člověka v ose y
g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	- je gravitační zrychlení

2) Během zrychlení v kladném směru osy x, radiální zátěž P_{nla_1} :

$$P_1 la_1 = P_1 - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} - \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_5}{2 \cdot l_1} =$$

$$= 68,93 \text{ N} - \frac{12 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 60 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} - \frac{2 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 34 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} =$$

$$= 68,73 \text{ N}$$

$$P_2 la_1 = P_2 + \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} + \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_5}{2 \cdot l_1} =$$

$$= -230,16 \text{ N} + \frac{12 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 60 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} + \frac{2 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 34 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} =$$

$$= -229,95 \text{ N}$$

$$P_3 la_1 = P_3 + \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} + \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_5}{2 \cdot l_1} =$$

$$= -0,26 \text{ N} + \frac{12 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 60 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} + \frac{2 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 34 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} =$$

$$= -0,06 \text{ N}$$

$$P_4 la_1 = P_4 - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} - \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_5}{2 \cdot l_1} =$$

$$= 298,83 \text{ N} - \frac{12 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 60 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} - \frac{2 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 34 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} =$$

$$= 298,62 \text{ N}$$

kde:

P_1l_{a1}	N	- je zátěž vozíku 1 při zrychlení v kladném směru osy x
P_2l_{a1}	N	- je zátěž vozíku 2 při zrychlení v kladném směru osy x
P_3l_{a1}	N	- je zátěž vozíku 3 při zrychlení v kladném směru osy x
P_4l_{a1}	N	- je zátěž vozíku 4 při zrychlení v kladném směru osy x
l_6	mm	- je vzdálenost těžiště T_1 v ose z
l_5	mm	- je vzdálenost těžiště T_2 v ose z
a_1	$m \cdot s^{-2}$	- je zrychlení stolu v kladném směru osy x

3) Během zpomalení v kladném směru osy x, radiální zátěž $P_n l_{a3}$:

$$P_1 l_{a3} = P_1 + \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} + \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_5}{2 \cdot l_1} =$$

$$= 68,93 \text{ N} + \frac{12 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot s^{-2} \cdot 60 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} + \frac{2 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot s^{-2} \cdot 34 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} =$$

$$= 69,14 \text{ N}$$

$$P_2 l_{a3} = P_2 - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} - \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_5}{2 \cdot l_1} =$$

$$= -230,16 \text{ N} - \frac{12 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot s^{-2} \cdot 60 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} - \frac{2 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot s^{-2} \cdot 34 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} =$$

$$= -230,36 \text{ N}$$

$$P_3 l_{a3} = P_3 - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} - \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_5}{2 \cdot l_1} =$$

$$= -0,26 \text{ N} - \frac{12 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot s^{-2} \cdot 60 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} - \frac{2 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot s^{-2} \cdot 34 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} =$$

$$= -0,47 \text{ N}$$

$$P_4 l_{a3} = P_4 + \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_6}{2 \cdot l_1} + \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_5}{2 \cdot l_1} =$$

$$= 298,83 \text{ N} + \frac{12 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot s^{-2} \cdot 60 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} + \frac{2 \text{ kg} \cdot 0,064 \text{ m} \cdot s^{-2} \cdot 34 \text{ mm}}{2 \cdot 123 \text{ mm}} =$$

$$= 299,03 \text{ N}$$

kde:

$P_1 l_{a3}$	N	- je zátěž vozíku 1 při zpomalení v kladném směru osy x
$P_2 l_{a3}$	N	- je zátěž vozíku 2 při zpomalení v kladném směru osy x
$P_3 l_{a3}$	N	- je zátěž vozíku 3 při zpomalení v kladném směru osy x
$P_4 l_{a3}$	N	- je zátěž vozíku 4 při zpomalení v kladném směru osy x

4) Během zrychlení v záporném směru osy x, radiální zátěž $P_n r_{a1}$:

Vzorce jsou stejné jako pro případ 3) a proto $P_{1ra1} = P_{1la3}$; $P_{2ra1} = P_{2la3}$; $P_{3ra1} = P_{3la3}$; $P_{4ra1} = P_{4la3}$.

kde:

P_{1ra1}	N	- je zátěž vozíku 1 při zrychlení v záporném směru osy x
------------	---	--

P_{2ra1}	N	- je zátěž vozíku 2 při zrychlení v záporném směru osy x
P_{3ra1}	N	- je zátěž vozíku 3 při zrychlení v záporném směru osy x
P_{4ra1}	N	- je zátěž vozíku 4 při zrychlení v záporném směru osy x

5) Během zpomalení v záporném směru osy x, radiální zátěž P_{nra3} :

Vzorce jsou stejné jako pro případ 2) a proto $P_{1la1} = P_{1ra3}$; $P_{2la1} = P_{2ra3}$; $P_{3la1} = P_{3ra3}$; $P_{4la1} = P_{4ra3}$.

kde:

P_{1ra3}	N	- je zátěž voz. 1 při zpomalení v záporném směru osy x
P_{2ra3}	N	- je zátěž voz. 2 při zpomalení v záporném směru osy x
P_{3ra3}	N	- je zátěž voz. 3 při zpomalení v záporném směru osy x
P_{4ra3}	N	- je zátěž voz. 4 při zpomalení v záporném směru osy x

Nyní by měl následovat výpočet ekvivalentní zátěže na jednotlivé vozíky. Ten spočívá v přičtení boční zátěže P_t k jednotlivým zátěžím. Hodnota boční zátěže je ale $P_t = 0,125$ N. Hodnoty zátěží se ale pohybují v řádech stovek a tak ztrácí smysl přičítat k nim hodnoty v řádech desetin N, a proto pro lze pro další výpočet použít výše uvedené hodnoty. Pro výpočet statického faktoru bude z výše uvedených hodnot použita nejvyšší hodnota zátěže.

Výpočet statického faktoru:

$$f_s = \frac{C_0}{\max(P)} = \frac{19\,600\text{ N}}{299,03\text{ N}} = 65,55$$