

Obsah

Přehled použitých veličin	3
1 Úvod a uvedení do problematiky Technologie 3D tisku.....	4
1.1 Aditivní výroba	5
1.1.1 Personalizace	5
1.1.2 Složitost	5
1.1.3 Recyklace a plánované zastarávání	5
1.1.4 Ekonomické měřítko	5
2 Rozdělení základních druhů technologií tisku	6
2.1 Dle pohybu	6
2.1 Dle použitých technologií	6
a) Fotopolymery	6
b) Stereolitografie (SLA)	6
c) PolyJet systém	6
d) Práškové.....	7
e) Laminace (LOM)	Chyba! Záložka není definována.
f) Fused deposit modeling (FDM).....	7
3 Potřebná elektronika pro stavbu 3D tiskárny	8
3.1 RAMPS	8
3.2 Modulární komponenty	8
3.3 Řídící jednotka motoru.....	8
3.4 Senzory pozice	9
3.6 Zdroj napájení	10
3.7 Větrák a osvětlení.....	11
4 Rešerše 3D tiskáren na principu tavení plastu	12
4.1 CEL robox	12
4.2 Big Rep.....	13
4.2.1 Technická specifikace	13
4.3 Prusa I3.....	14
4.5 Spider bot V2.0	16
5 Průzkum trhu	17
6 Specifikace požadavků.....	21
6.1 Souhrn základních požadavků.....	21
6.2 Zadání cílů a parametrů 3D tiskárny	21
6.3 Varianty.....	23
6.4 Popis vzniklých variant	23

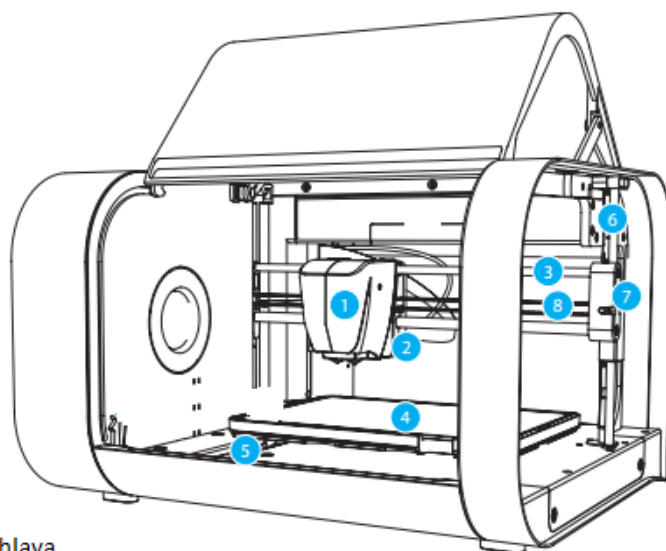
6.5 Výběr optimální varianty	24
6.5.1 Odůvodnění kritérií	24
6.5.2 Posouzení výsledku	25
7 Konstrukce	26
7.1 Rozlišení, přesnost a opakovatelnost	26
7.2 Návrh lineární jednotky pro osu X	27
7.3 Návrh lineárního vedení pro jednotku v ose X	33
7.4 Návrh lineární jednotky pro osu Y	39
7.5 Konstrukční návrh lineárního vedení a pohybového šroubu pro svislý pohyb stolu	47
7.5.1 Výběr optimálního pohybového šroubu pro pohyb stolu v ose Z.....	47
7.5.1.1 Kritická rychlost (kontrola maximálních otáček).....	47
7.5.1.2 Rychlost posuvu	49
7.5.3 Návrh lineárního vedení pro jednotku v ose Z (vedení stolu).....	50
7.6 Konstrukční návrh rámu.....	56
7.6.1 Deformace rámu	58
7.6.2 Výpočet průhybu jednotky x	60
8 Technicko-ekonomické hodnocení	62
9 Závěr.....	65
Použité zdroje a software	67
Seznam příloh volně ložených	68

Přehled použitých veličin

Veličina	Značka	Zkratka jednotky	Základní jednotka
Čas	t	s	sekunda
Délka	l	m	metr
Tloušťka	t		
Šířka	$š, b$		
Výška	h		
Poloměr	r		
Průměr	d		
Rozteč	p		
Hmotnost	m		
Síla	F	N	newton
Moment síly	M	$N.m$	newtonmetr
Napětí	Σ	Pa	pascal
Plocha	S	m^2	metr čtvereční
Rychlost	V	m/s	metr za sekundu
Součinitel tření	F	-	-
Součinitel bezpečnosti	K	-	-
Tuhost	C	N/m	newton na metr
Úhel	$\alpha,$	$^\circ$	stupeň
Gravitační zrychlení	G	$m.s^{-2}$	metr za sek. na druhou
Modul pružnosti v tahu	E	Pa	pascal
Kvadratický moment	J_z	m^4	metr na čtvrtou
Průřez. modul v ohybu	W_o	m^3	metr na třetí

1 Úvod a uvedení do problematiky Technologie 3D tisku

3D tiskárnu si lze představit jako jednoduchý manipulátor, který má místo manipulačních kleští tiskovou hlavu. Té se odborně říká extrudér. Extrudér pracuje na jednoduchém principu. Pomocí motůrku je do vnitřní komory extrudéru vtlačována plastová struna, která se odvíjí z cívky. Ve vnitřní komoře se následně roztaví. Plast v tekutém stavu je pak vytlačován do prostoru pomocí trysky o velmi malém průměru. Abychom nejspíše pochopili princip tiskárny, podíváme se na následující obrázek. Tisková hlava (1) neboli extrudér se pohybuje na pojezdovém vozíku (2) ve vodorovném směru. Stůl (4) se pohybuje také ve vodorovném tentokrát kolmém směru na lineární vedení. Pokud tyto dva pohyby spojíme, jsme schopni na desku stolu vytlačovat roztavený plast na jakémkoli místě. Teď již jen potřebujeme pohybovat s extruderem ve svislém směru a to je zajištěno tak, že se celé lineární vedení s extruderem zvedá pomocí šroubů (6). Nyní již je celý princip tisku velmi jednoduchý. Tisk začíná extrudér v minimální poloze těsně nad deskou stolu. Téměř se ho dotýká tryskou. 3D model, který chceme tisknout, se před tím v programu rozřeže na jednotlivé tenké vrstvy a data se nahrají do tiskárny. Tiskárna nanese jednu vrstvu roztaveného plastu na desku stolu, následně se posune o jednu vrstvu výše a tisk se opakuje, dokud nezískáme pomocí slepení jednotlivých vrstev celý model. Účelem této práce je navrhnout jednu takovou tiskárnu na bázi tisku pomocí roztavení plastové struny. Je zde mnoho konstrukčních variant, co se týká mechanismu pohybu extrudéru, ale také rozměrových. V úvodu práce se také nezapomeneme podívat v krátkosti na ostatní technologie 3D tisku.



- 1 Tisková hlava
- 2 Pojízdný vozík v ose X
- 3 Kolejnice pojezdu ve směru x
- 4 Vyhřívaná deska
- 5 Kolejnice pojezdu ve směru Y
- 6 Kolejnice v ose Z a pohybový šroub
- 7 Vozík v ose Z
- 8 Ozubený řemen pro osu X

Obrázek č. 1: 3D tiskárna CEL robex

1.1 Aditivní výroba

Aditivní výroba nechává zákazníka navrhnout jeho vlastní osobní verzi produktu. V dnešním propojeném světě možnost rychle měnit design produktu rozhodně není zanedbatelná.

V základu se výhody aditivní výroby dají shrnout do několika kategorií:

- **personalizace**
- **složitost**
- **udržitelnost**
- **recyklace**
- **plánované zastarávání**
- **ekonomické měřítko**

1.1.1 Personalizace

Umožňuje každému jednotlivci blíže si specifikovat tvar, materiál, design, nebo dokonce barvení.

1.1.2 Složitost

Protože každá vrstva objektu je nanášena postupně. Je možné vytvářet složité vnitřní struktury, které by nebylo možné dosáhnout klasickým obráběním nebo odlitím. Pokud požadujeme zvýšení tuhosti a pevnosti za současné snížení hmotnosti, může být tato technologie jednou správnou cestou. Jako příkladem může být vyplnění dutin voštinovou konstrukcí. Tím je získána lehká, tuhá alternativa.

1.1.3 Recyklace a plánované zastarávání

Například v automobilovém průmyslu by nebylo nutné v budoucnu uchovávat náhradní díly. V případě potřeby stačí náhradní díl stáhnout a vytisknout. 3D tiskárny využívají udržitelnou stavební metodu. Místo toho aby průmysl každoročně představoval novou řadu výrobků. Budoucnost by mohla být zaměřena na odvětví, které se zabírají investicí do základních dílů, jejich vylepšování znovupoužití materiálů pro budoucí upravení stávajícího produktu. Například pokud dojde k poruše pračky, není zapotřebí vyrobit celou pračku. Náhradní díl bude vytištěn na místě a pračka bude opět funkční.

1.1.4 Ekonomické měřítko

Pomocí aditivní výroby můžeme vyrobit individuální výrobek za stejnou cenu na jednotku, jako u série těchto výrobků. Využití aditivní výroby by mělo fatální dopad na ekonomiku v následujících aspektech:

- masovou produkci v nízkonákladových oblastech,
- objem hromadné přepravy zboží po celém světě,
- skladovací a distribuční sítě,
- umístěním produkce v těsné blízkosti spotřebitele.

2 Rozdělení základních druhů technologií tisku

2.1 Dle pohybu

- a) Kartézské - používají motory pro pohyb v osách x, y, z;
- b) Delta - využívá mechanické vazby 3 motorů. Díky nim se pohybuje extrudér v celém pracovním prostoru, avšak i tento typ potřebuje řízení v souřadnicích x, y, z. Pomocí těchto souřadnic bude vytlačován stavební materiál do finálního tvaru.

2.1 Dle použitých technologií

Tyto tiskárny jsou uzpůsobeny tak, aby zahrnovaly vlastnosti materiálů, které jsou využité k vytvoření objektu.

Fotopolymery (SLA, Polyjet)

Práškové (SLS, ZCORP)

Laminace (LOM)

Fused deposition modeling (FDM)

a) Fotopolymery

Jedná se o materiál, který lze transformovat z kapaliny na pevnou látku téměř okamžitě v případě, že je osvětlený správným druhem světla.

První druh aditivní výroby se nazýval Stereolitografie (SLA). Vynálezcem této metody je Charles Hall. V roce 1980 představil Hall standardní formát pro tisk STL a používá se u většiny 3D tiskáren do dnes. SLA výroba se také používá pro objekty s vysokým rozlišením, poskytující velice detailní povrch například při výrobě šperků.

b) Stereolitografie (SLA)

Využívá soustředěné UV světlo k přeměně tekutého fotopolymeru (plastu) na pevnou látku. Proces probíhá na pohyblivé desce. Ta je ponořena do nádoby naplněné tekutým fotopolymerem. Deska je ponořena do zásobníku jen tolik, aby se na ní vytvořila jen tenká vrstva kapaliny. Ultrafialový laser ozáří tenkou vrstvu kapaliny tak, že vytvoří první vrstvu daného objektu. Následně se celá deska posune o jednu vrstvu níže do kapaliny a proces ozařování se opakuje, dokud není vytištěn celý objekt. Tato metoda je velice přesná. Je jednou z nejpřesnějších metod 3D tisku. Lze tak dosáhnout teoreticky přesnost odpovídající velikosti jedné molekuly.

c) PolyJet systém

Používá také fotopolymeraci, ale v tomto případě se fotopolymer vytlačuje tiskovou hlavou ve velmi tenké vrstvě. Ten je následně vytvrzován UV světlem. Takto se nanáší vrstva po vrstvě a vzniká tak celý model. Vstříkovaný materiál je umístěn v oddělených kartridžích. Materiály je tak možné mezi sebou míchat. Minimálně se však používají dva základní materiály. Jeden je modelovací a jeden podpurný. Podpurný materiál se následně odstraňuje tlakem vody. Lze dosáhnout velice kvalitního povrchu modelu, tloušťka vrstvy se pohybuje okolo 0,016mm. Životnost modelu se pohybuje okolo 1 roku. Tato metoda je vhodná především pro modely, kde je kladen důraz na detail a přesnost.

d) Práškové

- **Selective Laser Sintering (SLS)**

Jedná se o metodu, kde je prášek spékán laserovým paprskem. Tloušťka vrstvy se pohybuje okolo 0,1 mm. Materiál je poměrně levný, ale cena modelu je přímo úměrná vysoké pořizovací ceně stroje.

- **ZCORP**

Prášek se nanese v tenké vrstvě na pracovní plochu. Tisková hlava vytlačuje pojivo a vzniká tak po jednotlivých vrstvách model. Pomocí této metody lze vyrobit i barevný model. Využívá se především pro ukázkové modely bez vysokých detailů. Model je křehký, drsný a je ho nutné, ještě povrchově upravit.

Další možnosti jsou:

Zapékání práškového materiálu

Zrnitý prášek spojovaný pomocí lepidel

Slinováním – prášek je spékán pomocí laseru

e) Fused deposit modeling (FDM)

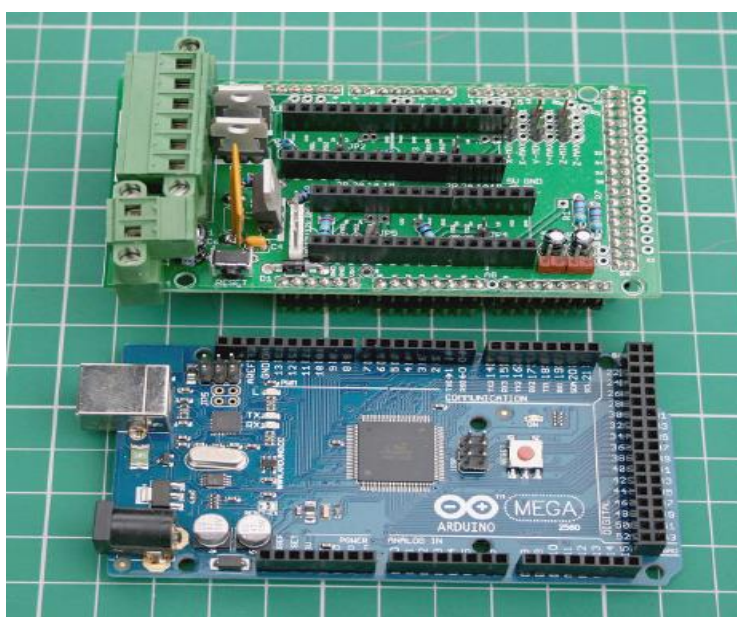
FDM proces začíná vytvořením STL formátu, který popisuje dráhu pohybu 3D tiskárny. Pokud je zapotřebí, je vytvořena dodatečná potřebná struktura. Tiskárna může využívat více materiálů pro dosažení odlišných vlastností. Například je možné použít jeden materiál pro vytvoření modelu a odlišný materiál jako podpěrná struktura nebo je možné použít rozdílné barvy stejného termoplastu na jeden model. Model se vyrábí vytlačováním malých kuliček termoplastického materiálu po jednotlivých vrstvách. Jedná se o vrstvy tloušťky cca 0,25mm. Materiál vytvrdne hned po vytlačení z trysky. Plastové vlákno nebo kovový drát se odvíjí z cívky a materiál je vytlačován tryskou. Tryska je zahřívána na takovou teplotu, aby termoplast přešel do tekutého stavu a byl pak vytlačen pomocí trysky. Tryska se může pohybovat jak v horizontálním i vertikálním směru. Přesto, že je technologie FDM velmi flexibilní a je schopna dosáhnout velmi slušné přesnosti tisku. Tato metoda má určitá omezení co se týká tisku částí, které vyžadují podporu. Podporou je myšlena hrubší struktura materiálu, která se po dokončení modelu oddělí od finálního produktu. Technologie podporuje velkou řadu materiálů pro tisk, jako jsou Polyamid PA, polystyren PS, Polykarbonát PC, Acrylonitril Butadien Styren ABS, Kyselina polymléčná PLA. Pomocí nové metody FDM color lze nově tisknout i barevné modely.

3 Potřebná elektronika pro stavbu 3D tiskárny

Pro 3D tisk je potřeba zajistit spolehlivou a stabilní elektroniku. Jedná se o zdlouhavou operaci a musí být spolehlivá v průběhu několika hodin, než je celý tisk dokončen. RepRAP elektronika vznikla z open-source hobby platformy Arduino. Tuto platformu lze použít pro veškeré aplikace průmyslových řídicích systémů a robotiky. Elektronika se skládá nejčastěji ze standardní základní desky a krycí desky, která obsahuje potřebnou elektroniku pro řízení motorů a připojení senzorů.

Elektronika se dá pořídit také jako celý set přímo pro 3D tiskárnu, ale všechny tyto varianty pracují na podobném principu a plní stejnou funkci, a proto na nich lze s největší pravděpodobností provozovat podobný firmware.

3.1 RAMPS



Obrázek č. 2 Modulární komponenty

3.2 Modulární komponenty

V následující části jsou popsány jednotlivé prvky elektroniky, možnosti rozšíření tiskárny o další prvky. Například lze tiskárnu rozšířit o LCD displej a rozhraní paměťové karty připojené do základní desky. Tiskárna po té může pracovat i bez připojení k počítači a tisk lze zadat ze souboru umístěného na paměťové kartě. To je výhodné pro tisk složitějších úloh, které mohou trvat i několik hodin nebo dnů a není nutné mít po celou dobu připojený počítač.

3.3. Řídící jednotka motoru

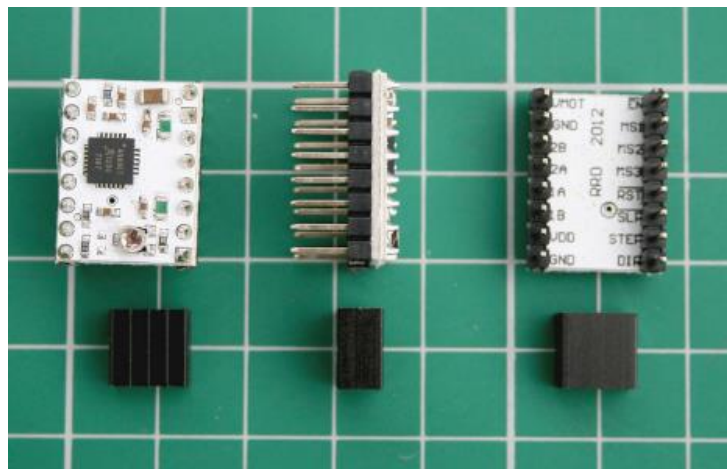
3D tiskárna používá k pohybu krokové motory. Ten potřebuje speciální zařízení (řídící modul), který posílá do motoru krátké pulzy, díky kterým se motor natáčí dopředu nebo

dozadu o přesnou vzdálenost. Modul krokového motoru může být plně integrovaný, nebo častěji připojený do základní desky. Každý krokový motor potřebuje svůj vlastní řídicí modul.

Pro 3D tiskárnu proto potřebujeme minimálně 4.

Například standardní krokový motor NEMA17 používá 200 pulzů, aby se otočil o celých 360° . Tento nebo obdobný typ využijeme ve stavbě naší tiskárny.

Řídicí modul dokáže používat režim mikrokrokování (dále microsteps), kdy krokem je jen část této vzdálenosti. Microsteps snižuje hlučnost motoru a umožňuje přesnější polohování. Režim se nastavuje nejčastěji pomocí malých Jumperů přímo na řídicím modulu. Většina 3D tiskáren používá režim 16x microsteps. Řídicí modul pak musí generovat 3200 pulzů, aby se motor otočil o 360° . Díky tomuto jemnému ovládní získáváme přesnější a plynulejší chod motoru. Stále více krokových motorů a řídicích modulů nabízejí režim (32x microsteps). Díky tomu je motor ještě tišší a schopný ještě jemnějšího rozlišení. Jsou zde však určité limity v počtu pulzů, které je schopná elektronika základní desky a řídicího modulu motoru propustit. Zároveň zvyšuje zátěž na firmware, který musí provést o to více pozičních výpočtů. Proto se používají různé motory pro daný typ pohybu. Například režim 16x microsteps se používají pro motory zajišťující pohyb ve třech osách x, y, z. Pro motor extrudéru se pak používá režim 8x microsteps s nižším rozlišením, ale zvýší se rychlost reakce a zrychlí pohyb zpětného chodu.



Obrázek č. 3: Řídicí čip krokového motoru

3.4 Senzory pozice

Většina 3D tiskáren vyžaduje informaci, kde se nachází počáteční poloha extrudéru.

Počáteční polohy je dosaženo pomalým pohybem každé osy známým směrem, dokud se spínač nebo čidlo neaktivuje. Zde se nachází počáteční poloha „0“ pro každou osu zvlášť. Před zahájením každé tiskové úlohy musí být vozík s extrudérem v této počáteční pozici.

Pro zajištění správné polohy extrudéru používáme tři hlavní typy senzorů:

1) Mikrospínač

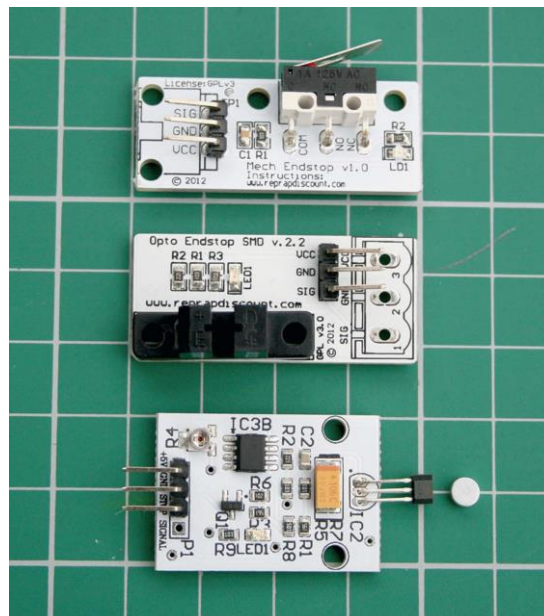
Nejběžnější snímač je jednoduchý mikrospínač. Sepne se po kontaktu s vozíkem extrudéru a vyšle signál do základní desky

2) Optický senzor

Po přerušení paprsku infračerveného světla vyšle snímač signál, že vozík je v počáteční poloze.

3) Hallův snímač

Nejdokonalejší forma pozičního snímání. Pracuje na principu detekce magnetického pole. Jedná se o velice přesný snímač s vysokou životností a opět se jedná o bezkontaktní snímač. Tento typ snímače se nejčastěji používá na vertikální Z ose vozíku pro nastavení polohy.



Obrázek č. 4: Mikrospínač

3.6 Zdroj napájení

Požadavky na napájecí zdroj.

Výběr vhodného zdroje napájení je důležitým bodem každé 3D tiskárny.

Většina elektroniky potřebné pro 3D tiskárnu je napájena stejnosměrným proudem, převážně 12V. Vzhledem k tomu, že při 3D tisku je potřeba tavit plast, pohánět elektromotory a nesmíme zapomenout na vytápění stolu, vyžaduje tiskárna značné množství energie. Je nutné tedy zvolit zdroj s dostatečnou kapacitou a použít vhodný průřez vodičů.

Dále musíme také uvažovat vyhřívání trysky a podle počtu krokových motorů musíme dimenzovat zdroj. Častou možností je mít další napájecí zdroj pro vyhřívanou desku.

Je možné použít napájení více volty a může to mít i výhodu pro výkon motoru a zahřívací čas. Lze pak použít menší průřez vodičů ze zdroje, ale je nutné zkontrolovat, zda je možné napájet ostatní elektroniku více než 12V. Bez vyhřívané desky se příkon sníží na 60W. Lze pak použít podobný zdroj podobný využívaný u většiny laptopů.

3.7 Větrák a osvětlení

Větrák pomáhá udržet optimální teplotu kritických částí jako je horký konec a mohou také pomoci s procesem samotného tištění. Většina elektroniky tiskáren má určené výstupy pro ventilátory, které lze řídit pomocí G-kódu (zapnutí, vypnutí a řízení rychlosti ventilátoru).

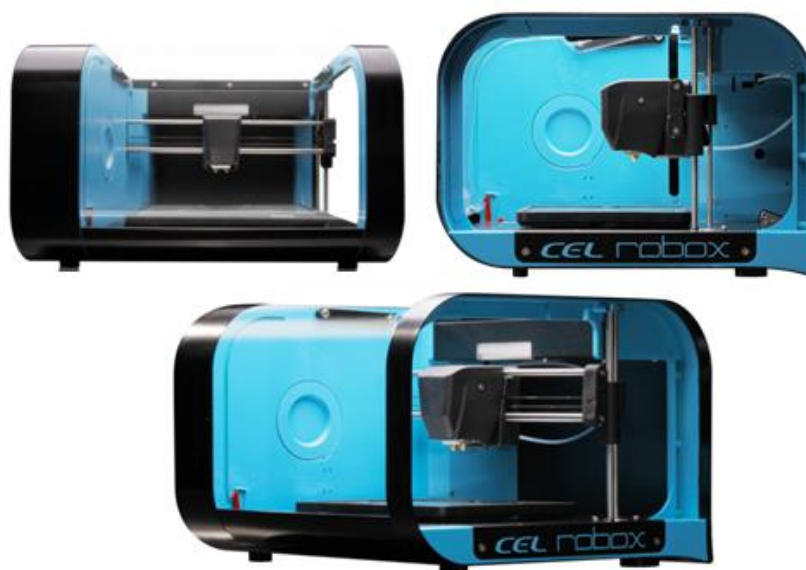
Nesmíme zapomenout a osvětlení pomocí led-diod, které jsou důležité pro kontrolu tisku.

4 Rešerše 3D tiskáren na principu tavení plastu

v následující části se budeme věnovat pouze tiskárnám na principu tavení plastové struny, která je protlačována přes tiskovou hlavu (extrudér) a následně po vrstvách nanášena na pracovní desku stolu.

4.1 CEL robox

Tiskárna Cel-robox se vyznačuje velmi zajímavou konstrukcí. Je sestavena z kombinace vstříkovaných plastů a plechových částí, díky kterým dosahuje tiskárna tuhé konstrukce pro každého běžného spotřebitele. Extrudér je na bázi bowdenu. To znamená, že motůrek extrúderu je umístěn na rámu tiskárny a přes trubičku (bowden) je plastová struna vtlačována do trysky, kde se taví a vstříkuje. Díky tomu je samotná tiskařská hlava (tryska) lehká a působí na ni menší setrvačné účinky, ale je zde určitá pružnost v bowdenu, která má negativní vliv na výsledné vstříkování. Krokové motory dosahují vysokého rozlišení a přenášejí kroučící moment na ozubený řemen, který má rozteč 2mm a pohání vodorovné osy x a y. Pro pohon osy z je použitý pohybový šroub s velmi jemným stoupáním 0,5mm. Díky tomu může tiskárna dosáhnout slušného rozlišení v ose Z.¹



Obrázek č. 5: 3D tiskárna CEL robox

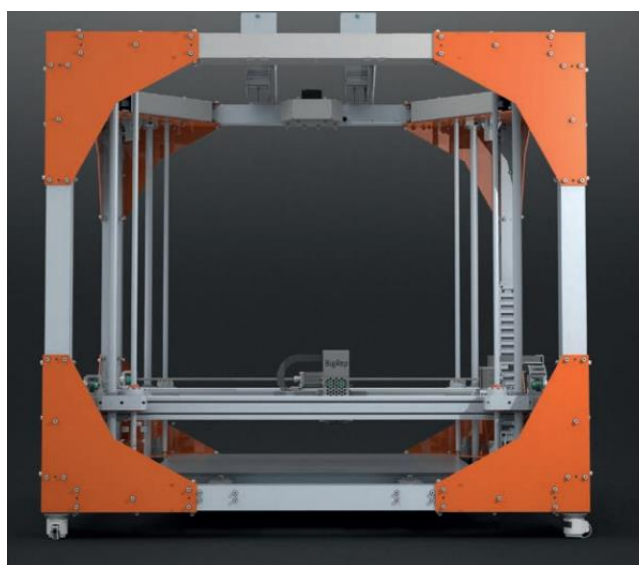
Tiskárna využívá vyhřívanou podložku. Uvnitř komory je schopna udržet teplotu přibližně 50°C. Díky tomu je schopna udržet přesnost modelu vyrobeného z ABS nebo obdobného modelu v rozumné míře. Rozlišení vrstev lze určit dle požadavku na přesnost modelu: Low 0,3mm, Standart 0,2mm, High 0,1mm a Super 0,02mm.

¹ *Návod tiskárna Robox. Cel-Robox [online]. 2015 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.cel-robox.com/wp-content/uploads/RoboxDocuments/Robox%20User%20Manual%20v1.3.pdf>*

4.2 Big Rep

Big Rep je tiskárna učená pro studia a průmyslové použití. S objemem 1,3 m³ se jedná o největší dostupnou 3D tiskárnu na trhu. Ať se jedná o funkční prototyp nebo finální díl. Tiskárna vytváří skutečný objekt. Je to proto, že díly jsou vyrobeny ze stejných odolných termoplastů jako tradiční vstřikované díly. Díl lze vytisknout přímo z CAD souboru. Tiskárna je vyrobena v Německu.

Tiskárna využívá řídicí software s názvem Kisslicer. Jedná se o program, který využívá STL formát a generuje z něj přímo G-kód pro 3D tiskárnu. Verze zdarma obsahuje vše pro hobby tiskárny, které používají extrudéry s jednou tryskou. Placená verze umožňuje tisknout více modelů najednou a s extrudérem obsahující více trysek.



Obrázek č. 6: Big Rep

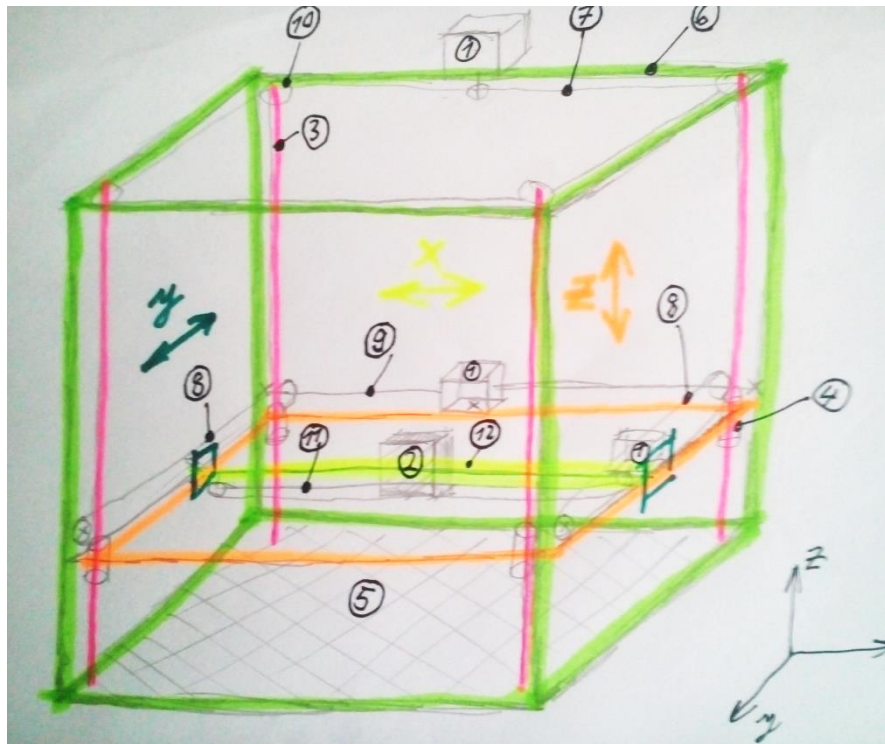
4.2.1 Technická specifikace

1100 x 1067 x 1097 mm / 1,3 m³- pracovní prostor

Konvenční tiskárny mohou zpravidla produkovat jen malé objekty. Velkoobjemový tisk o objemu více než 1 m³ umožňuje tisknout modely v měřítku 1:1 nebo lze vytisknout finální výrobky jako je návrhářský nábytek přímo pomocí metody 3D tisku.

Pro tisk velkých 3D objektů je vyžadována spolehlivá a robustní konstrukce stroje sestavená z hliníkových profilů a CNC obráběných částí pro dlouhý životní cyklus výrobku. Základní rám je sestaven z hliníkových profilů. Na dně je s rámem pevně spojena velkoformátová vyhřívaná deska (5). Uvnitř nosné konstrukce je umístěný rám, který zajišťuje vertikální pohyb extrudéru ve směru osy z. Na tomto rámu je příčně umístěný nosník (12), který se pohybuje v příčném směru osy y. Extrudér je umístěn na tomto příčnicku a je poháněn krokovým motorem přes ozubený řemen ve směru osy x. Vnitřní rám je vedený pomocí čtyř vodících tyčí. Pohon zajišťuje pouze jeden krokový motor, který je umístěn na horním profilu hlavní konstrukce a přes ozubený řemen přenáší kroutící moment na čtyři pohybové šrouby

umístěné vertikálně v rámu a pomocí těchto šroubů se vnitřní rám posouvá ve svislé ose z. Pouzdra vodících tyčí a matice pohybových šroubů jsou upevněny ve frézovaném držáku a ten je přišroubovaný k hliníkovému rámu. Posuv příčného nosníku v ose y je taktéž zajištěný pomocí jednoho krokového motoru, který je opět uchycený na hlavní konstrukci tiskárny. Pro zajištění přesného a rovnoměrného posunu příčného profilu je motor umístěný v ose rámu a vychází z něj dvě hřídele, které přenašejí kroutící moment opět na ozubené řemeny. Ozubené řemeny jsou uchycené na obou koncích příčného profilu. Obdobný princip je použitý i k pohonu extrudéru na příčném profilu ve směru osy x, a to jedním krokovým motorem a ozubeným řemenem.



Obrázek č. 7: Big Rep-technický popis

4.3 Prusa I3

Jedná se o jednu z nejlevnějších a nejdostupnějších tiskáren na internetu. Vychází z mezinárodního RepRap projektu 3D tiskárny. Pod tímto projektem je vše otevřeno a sdíleno pod svobodnou licenci. Jedná se o takzvaný otevřený projekt, kde je vše sdíleno bez nároku na autorská práva. RepRap znamená replicating rapid prototyper. Lze tak pomocí již postavené tiskárny tisknout díly dalších tiskáren a dochází tak k její replikaci, a to velice rychlou formou. Ostatní díly jsou normalizované a dají se tak snadno pořídít a celou tiskárnu lze sestavit v domácích podmínkách. Vyhřívaná podložka zajišťuje rovnoměrné chladnutí modelu a nedochází tak k jeho velké deformaci.²

² [28] Tiskárna PRUSA I3 [online]. 2015 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://m5.img.dxcn.com/CDDriver/CD/sku.349133.pdf>

TECHNICKÉ PARAMETRY:

Pracovní plocha - 200 x 200 x 200 mm

Objem: 8000 cm³

Velikost trysky 0,4 mm

Výška vrstvy od 0,05 mm

Maximální rychlost 200 mm/s

Podporované materiály - ABS, PLA,

Velikost kroku v X/Y ose – 0,1mm



Obrázek č. 8: Tiskárna PRUSA I3 [PRUSA]

Celá koncepce tiskárny Prusa I3 je pojata jako stavebnice a je navržena tak, aby ji byl schopny každý sestavit v domácích podmínkách. Rám 3D tiskárny je postaven ze závitových tyčí spojovaných pomocí plastových dílů a vymezení je provedeno maticemi.



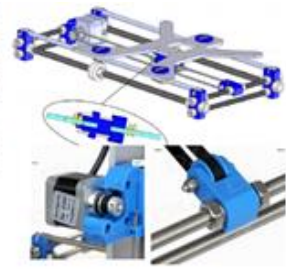
Obrázek č. 9



Obrázek č. 10



Obrázek č. 11



Obrázek č. 12

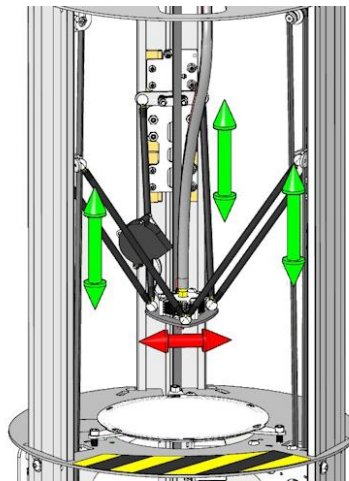
Posuvný mechanismus pro pohyb extrudéru je řešený pomocí vodících tyčí a lineárních kuličkových ložisek. Poněkud nešťastným způsobem jsou zde upevněna lineární ložiska do plastového držáku pomocí upínacích pásek (obr. 9), které nezaručují dostatečnou tuhost a je zde prostor pro vylepšení, ale pro hobby tiskárnu je dostačující. Extrudér společně s příčným vedením se posouvá také ve vertikální ose pomocí dvou pohybových šroubů (běžný metrický závit). Pohon zajišťují dva krokové motory. Ty jsou propojeny se závitovou tyčí pomocí pružné spojky bez využití převodu 1:1, jak můžeme vidět na (obr. 11).

Poslední pohyb v příčném směru osy y zajišťuje stůl poháněný ozubeným řemenem přes kladku (obr. 12), s konci uchycenými k rámu stolu. Při tisku dochází postupně k nárůstu hmotnosti materiálu na vyhřívané desce a tak i k nárůstu setrvačných účinků, které se mohou

projevit na deformaci ozubeného řemenu, a to může mít značný vliv na přesnost tištěného modelu.

4.5 Spider bot V2.0














Jedná se o Delta tiskárnu. Tento mechanismus byl první použit v roce 1985 Raymondem Clavelem. Tiskárna má pohyb řešený pomocí tří ramen. Tato tiskárna má poměrně slušný tiskový objem. Kartézské 3D tiskárny řídí pohyb os pomocí 3 krokových motorů. Delta tiskárna všemi třemi vozíky pohybuje současně. K tomu využívá také tři krokové motory. Na obrázku lze vidět, že pokud se extrudér přemísťuje podél osy (označeno červenou šipkou) Všechny 3 kočáry se pohybují svisle. Zásadní výhodou tiskárny Spider Bot je pohyb malých setrvačných hmot. V podstatě se pohybuje jen extrudér.












Obrázek č. 13: Delta tiskárna Spider Bot

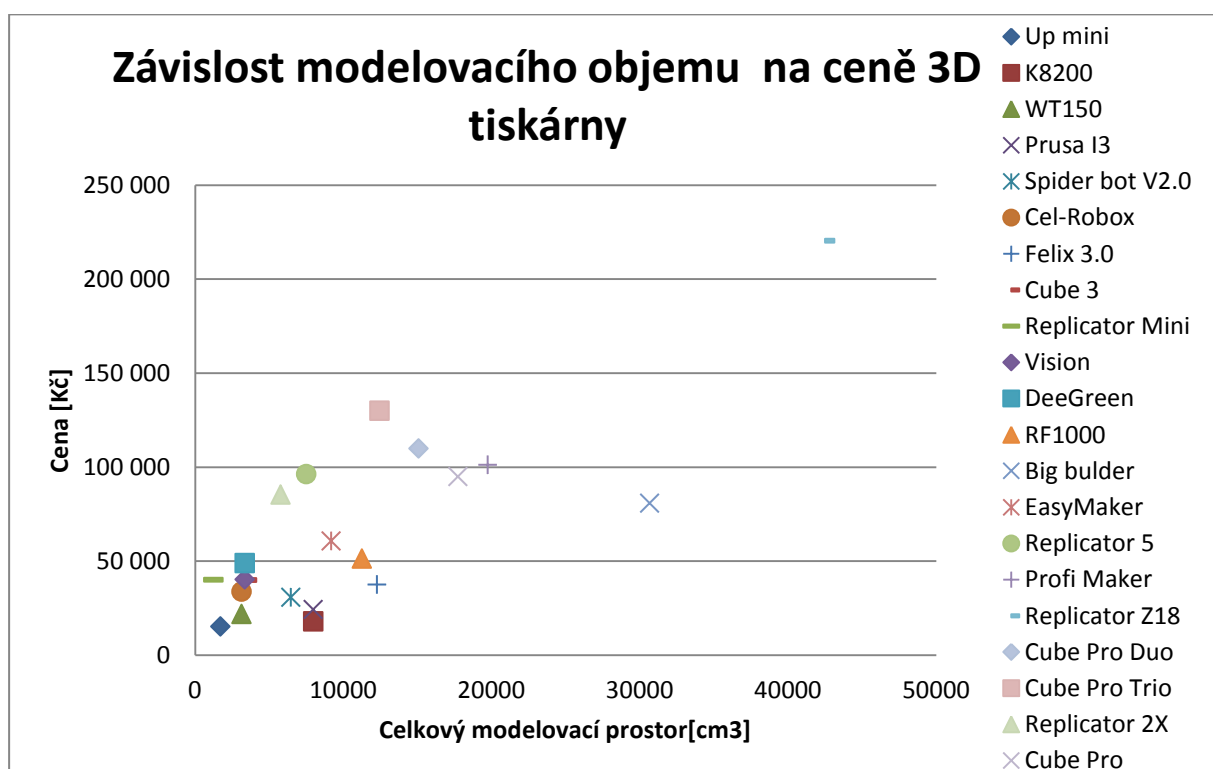
5 Průzkum trhu

Následující tabulka obsahuje vzorek tiskáren dostupných na českém trhu hobby, až poloprofesionálních tiskáren na bázi nanášení plastu extruderem na desku stolu. Průzkum jsem provedl za účelem zmapovat určité parametry, které považuji jako důležité při výběru vhodné varianty tiskárny.

výrobce	Název tiskárny	Tloušťka vrstvy [mm]	Celkový modelovací prostor [cm ³]	Nejdelší modelovací osa [mm]	Cena [Kč]	Foto
Delta micro Factory	Up mini	0,2	1 728	120	15 300	
Welleman	K8200	0,2	8 000	200	18 000	
Idea Factory 3D	WT150	0,18	3 150	150	21 907	
Prusa research	Prusa I3	0,05	8 000	200	24 200	
Delta 3D printer	Spider bot V2.0	0,15	6 480	200	30 800	
Robox	Cel-Robox	0,02	3 150	210	33 868	
Felix printers	Felix 3.0	0,05	12 285	255	37 500	
3D Systems	Cube 3	0,07	3 511	152	39 990	
MakerBot	Replicator Mini	0,2	1 250	125	40 171	
3D Factories	Vision	0,1	3 375	150	40 317	
Be3D	DeeGreen	0,1	3 375	150	49 005	
Renkforce	RF1000	0,05	11 270	245	51 390	
Bulder	Big Bulder	0,05	30 677	664	80 828	

3D Factories	EasyMaker	0,08	9 200	230	60 645	
MakerBot	Replicator 5	0,1	7 522	252	96 290	
3D Factories	Profi Maker	0,08	19 760	400	101 301	
MakerBot	Replicator Z18	0,1	42 512	457	220 490	
BigRep	Bigrep ONE 2	0,1	1 287 549	1 100	975 000	
3D Systems	Cube Pro Duo	0,07	15 106	270	109 990	
3D Systems	Cube Pro Trio	0,07	12 463	270	129 990	
MakerBot	Replicator 2X	0,1	5 795	246	85 390	
3D Systems	Cube Pro	0,07	17 749	285	94 990	

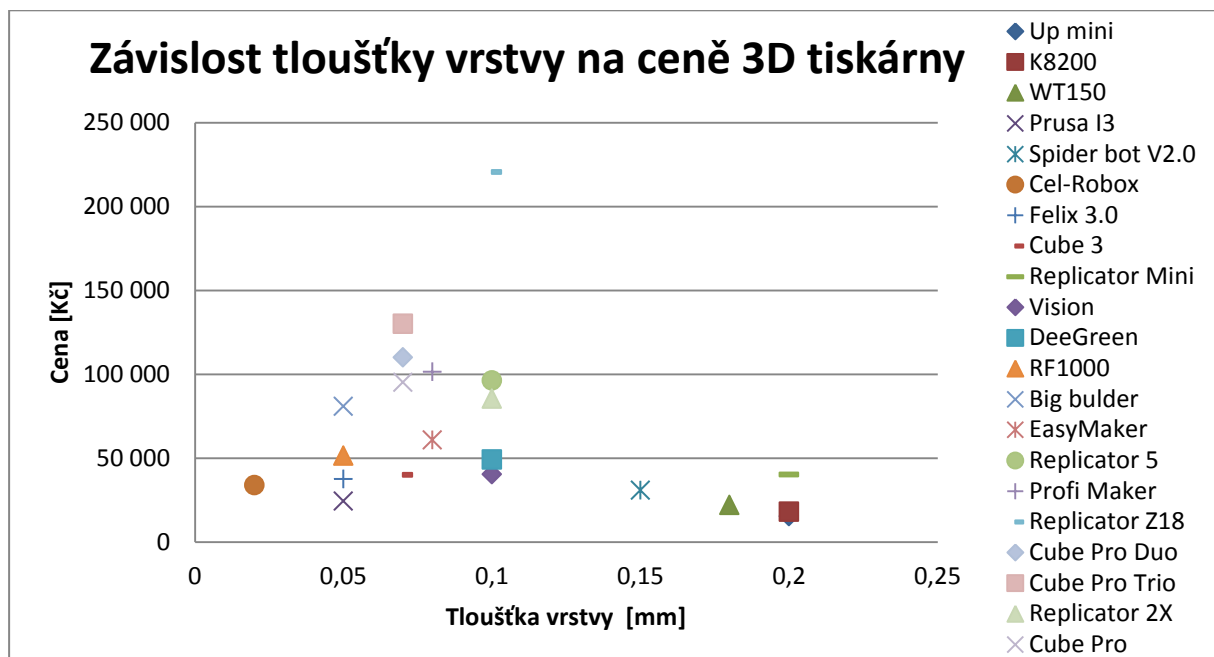
Tabulka č. 1



Graf č. 1

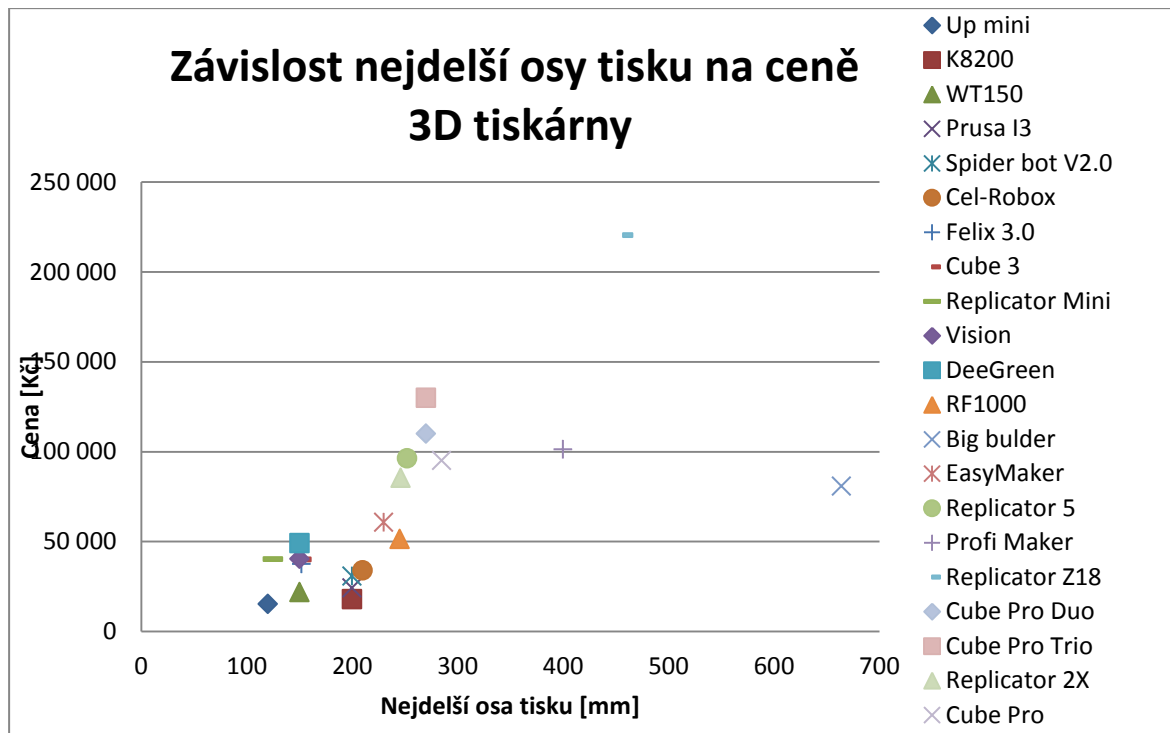
Graf č.1 nám ukazuje orientační přehled celkového využitelného objemu tiskárny v poměru k její ceně. Z grafu lze vyčíst, že největší modelovací objem poskytuje 3D tiskárna Replicator

Z18 (42,5dm³) za současně nejvyšší cenu 220 490 Kč. Zajímavou tiskárnou je však Big Bulder, která s částkou 80 828 Kč nabízí modelovací prostor o objemu 30,7 dm³.



Graf č. 2

Závislost tloušťky na ceně tiskárny nám ukazuje graf č. 2. Tento parametr udává nejmenší možnou tloušťku vrstvy materiálu, kterou je tiskárna schopna nanést v jedné vodorovné hladině. Z grafu lze jednoznačně vyčíst, že nejvyšší přesnost z vybraného vzorku tiskáren dosahuje CEL robox s tloušťkou vrstvy 0,02mm Otázkou je, zda je tento parametr věrohodný a zda je jedná o věrohodnou informaci, protože se s touto přesností vyskytla v průzkumu samostatně. Zajímavá je i její cena 33 868 Kč, čímž se řadí mezi nižší střední třídu. Další zajímavou skupinou tiskáren je Prusa I3 od českého výrobce, Felix 3.0, RF1000 a Big Bulder. Všechny tyto tiskárny mají stejnou minimální tloušťku vrstvy 0,05mm a cena se pohybuje od nejnižší hobby třídy 24 200Kč (Prusa I3) až po vyšší střední třídu Big Bulder s částkou 80 828 Kč. Big Bulder je v ose Z poháněný pomocí pohybového šroubu a vedení je zajištěno pomocí lineárních kuličkových ložisek.



Graf č. 3

Velice zajímavým parametrem je porovnání nejdelší osy (rozměru) modelovacího prostoru, který je zachcen na grafu č. 3.

V grafu je vidět, že většina nejlevnějších tiskáren do 50 000 Kč má možnost tisku nejdelšího rozměru 3D modelu do 200 mm. Od této hranice je prudký nárůst ceny až na 150 000 Kč, a to s přírůstkem modelovacího rozměru na necelých 300mm. Což v poměru k ceně nepřináší velký efekt. Zajímavou tiskárnou je zde Profi Maker s nejdelší osou 400mm za cenu 100 000Kč a nejzajímavější tiskárnou v porovnání parametru nejdelšího možného rozměru pro tisk je opět Big Bulder, která je dostupná za 80 828 Kč a nabízí možnost tisku modelu s nejdelším rozměrem až 664 mm.

Tiskárna	Maximální rychlost extruderu [mm/s]	Podpurný materiál pro tisk	Výška vrstvy (rozlišení vrstvy) [mm]	Teoretická Přesnost polohování x [mm]	Teoretická Přesnost polohování y [mm]	Teoretická Přesnost polohování z [mm]	Průměr trysky [mm]
Cel-Robox	180	PVA, PLA	0,02	0,0075	0,0075	0.00015625	0.3 a 0.8
Up mini	100	HIPS	0,2-0,4	0,1	0,1	0,2	0,3;0,8
Bigrep	150	PVA, PS	0,1-1,5	0,15-0,45	±0,01	0,1	0,3;0,5; 1;1,5
Prusa I3	200	HIPS	0,05	0,01	0,01	0,05	0,4
Spider bot V2.0	150	HIPS	0,15-0,45	0.011	0.011	0.0056	0,3;0,8

Tabulka č. 4: Tabulka vzorku tiskáren-přesnost v osách x a y

6 Specifikace požadavků

V následující kapitole klademe důraz na definici základních požadavků, které jsou důležité pro dosažení výsledného technického systému. Soubor informací slouží nejen k ujasnění si nejdůležitějších parametrů naší 3D tiskárny, ale také k nastavení hodnot, které bychom neměli při následné realizaci překročit. Abychom mohli projekt považovat za úspěšný, měli bychom parametry nastavit tak, aby se náš výsledný technický systém dostal na vyšší technickou úroveň, při podobných, nebo nižších výrobních nákladech, oproti konkurenci.

6.1 Souhrn základních požadavků

Pro návrh 3D tiskárny je směrodatná následující specifikace:

- a) **konstrukce**
- b) **ekonomické hledisko.**

Požadavek	Hodnota
Konstrukce	
Rozměry stroje	d,v,š 1000x500x500 [mm]
Rozměry prostoru pro tisk	200x200x600
Rychlost tisku (maximální rychlost pohybu V_{max})	60[mm/s] ($V_{max}=150$ [mm/s])
Přesnost polohování v ose z	0,05[mm] a lepší
Přesnost polohování v ose x,y	0,01[mm] a lepší
Minimální přesnost modelů ve svislé ose z	0,1[mm]/600[mm]
Minimální přesnost modelů ve vodorovné ose x, y	0,05[mm]/200[mm]
Hlavní rám	Hliníkové profily
Technologie výroby	svařování/ šroubový spoj
Vhodnost pro	Firmy, soukromé osoby
Hmotnost	maximálně 50 [Kg]

Ekonomické hledisko	
Cena výrobku	maximálně 80 000[Kč]
Konkurenceschopnost	Přednosti oproti konkurenci

Tabulka č. 5: Základní požadavky na 3D tiskárnu

6.2 Zadání cílů a parametrů 3D tiskárny

Na základě předchozího průzkumu jsme zjistili, že nejpřesnější 3D tiskárny v dané kategorii se pohybují s přesností tisku tloušťky vrstvy 0,05mm (graf č.2), aby byla tiskárna konkurence schopna, požadujeme u naší navrhované tiskárny přesnost tisku tloušťky vrstvy stejnou nebo menší než je hodnota 0,05mm.

Přesnost tisku ve vodorovných osách výrobci často neuvádějí. U vzorku tiskáren (v přechodí tabulce 4) se nám tento parametr podařilo zjistit. Hodnoty přesnosti polohování v obou osách x a y se pohybují v hodnotách 0,01mm. Všechny tyto tiskárny používají k polohování

ozubený řemen poháněný krokovým motorem napřímo. Pokud budeme uvažovat řemenici o průměru 20mm a motor s 200 kroky na jednu otáčku. Přesnost polohování by byla dána:

$$p = \frac{\pi \cdot d}{f} = \frac{\pi \cdot 20}{200} = 0,3mm$$

d – průměr řemenice [mm]

f – počet kroků motoru na otáčku

p – přesnost polohování v ose x, y [mm]

Je tedy zřejmé, že přesnost polohování je dosažena pomocí mikrokování. Kdy se dělí každý krok motoru ještě na dalších x mikrokroků. Pokud tedy máme mikropohon s 32 mikrokroky Počet kroků na otáčku se zjemní až na $f=200 \cdot 32=6400$ [kroků/ot]

Přesnost polohování potom bude:

$$p = \frac{\pi \cdot d}{f_m} = \frac{\pi \cdot 20}{6400} = 0,01mm$$

d – průměr řemenice [mm]

f_m – počet mikrokroků motoru na otáčku

p – přesnost polohování v ose x, y [mm]

Získaná hodnota odpovídá právě přesnosti polohování, kterou uvádějí výrobci tiskáren v předchozí tabulce č. 4. Budeme se tedy snažit dosáhnout vyšší nebo stejnou přesnost polohování 0,01mm v osách x, y.

Základní myšlenkou konstrukce rámu je využití stejné koncepce jako u levnějších variant tiskáren. Ty používají nejčastěji montovanou konstrukci z hliníkových profilů.

Rozměry prostoru pro tisk jsou zvoleny podobné jako levných typů tiskáren 200x200mm, ale rozhodli jsme se prodloužit výšku tisku na 600mm. Podobně jako u tiskárny Big Bulder. Jsme tak schopni tisknout i atypické díly a mít tak výhodu na trhu.

Požadavek na přesnost tištěných modelů ve svislé ose je minimálně 0,1mm na délce 600mm. Tato přesnost se uplatní například při tisku funkčních prototypových dílů. Při tisku pohledových prototypových dílů nám stačí pouze přesnost $\pm 0,5mm$. Nesmíme také zapomenout, že přesnost se odvíjí od smrštění modelu vlivem chladnutí, a je tak vhodné dosáhnout vyšší přesnosti než 0,1mm. ve vodorovné ose si stanovíme minimální přesnost dílů na hodnotu 0,05mm/200mm.

Konkrétně stanovené cíle:

- použitelnost pro tisk dílů v rozměrech 200x200x600mm
- možnost tisku vrstvy o tloušťce 0,05mm a lepší
- Rám z hliníkových profilů (dostatečná tuhost rámu a vedení)
- váha stroje do 50Kg pro rozumnou manipulaci
- pořizovací cena do 80 000Kč
- nenákladná výroba za použití rozumných technologických postupů
- minimální náročnost na údržbu
- Maximální rozměry 3D tiskárny výška, šířka, délka- 1000 x 500 x 500 [mm]

- Minimální přesnost modelů ve svislé ose je 0,1mm/600mm
- Minimální přesnost tištěného modelu ve vodorovných osách x a y je stanovena na 0,05mm/200

6.3 Varianty

V následující tabulce jsou zobrazeny tři varianty konstrukčních řešení 3D tiskáren na bázi nanášení jednotlivých vrstev roztaveného plastu. Jednotlivé parametry lze mezi sebou kombinovat a lze tak vytvořit více variant. Pro jednu variantu však může být z řádku zvolena pouze jedna buňka tabulky. Jednotlivé výsledné varianty jsou doplněny komentářem, odůvodněním a zhodnocením.

Parametr		Požadavky na parametry			
		1	2	3	4
1.1	Druh tiskárny	Hobby	nižší střední třída	Střední třída	profesionální
1.2	Dle pohybu	Kartézské souřadnice	delta tiskárna		
2.1	Druh pohonu osa X	ozubený řemen	pohybový šroub	Lineární motor	
2.2	Druh pohonu osa Y	ozubený řemen	pohybový šroub	Lineární motor	
2.3	Druh pohonu osa Z	ozubený řemen	pohybový šroub	Lineární motor	
2.4	Stůl tiskárny	fixně	Pohyb v jedné ose	Pohyb ve dvou osách	Pohyb ve třech osách
2.5	Extrudér tiskárny	fixně	pohyb v jedné ose	Pohyb ve dvou osách	Pohyb ve třech osách
3.1	Rychlost tisku	Pomalá	Střední	Vysoká	
3.2	Druh rámu	Svařený rám	Montovaný rám	Montovaný, obrobený plochy	Svařený obrobený rám
3.3	Prostor pro tisk	3 osy stejné	1 osa delší	Dvě osy delší	
3.4	Zpětná vazba odměřování	Bez odměřování	Servomotor s odměřováním polohy	Jiné řešení	

Tabulka č. 6: Morfologická matice

6.4 Popis vzniklých variant

Varianta číslo 1 (žlutá): Stůl tiskárny je upevněn fixně k rámu. Pokud se bude jednat o velkoformátovou tiskárnu vhodnou k tištění velkých dílů, fixní stůl bude rozhodně výhodou. Při tisku totiž dochází k postupnému nárůstu váhy modelu, kterou v tomto případě není nutné zvedat. Tato varianta však vyžaduje, aby se extrudér pohyboval ve všech třech osách. Obdobně je tomu u velkoformátové tiskárny typu Big Rep. V tomto případě je tedy nutné, aby osa Z postupně posouvala obě vodorovné osy ve směru Z s tím rozdílem, že je zátěž stále stejná. Nevýhodou však je, že všechny vůle ve vedení se projeví ve výsledné přesnosti pohybu extrudéru. Pohyb ve vodorovném směru x a y by byl tedy zajištěn pomocí řemenových převodů, které poskytují menší tuhost oproti pohybovému šroubu, ale dá se pořídit za nižší cenu.

Varianta číslo 2 (modrá): Tato varianta využívá k pohybu ve všech třech osách pohybové šrouby. Má za cíl zvýšit přesnost polohování. U této tiskárny se stůl pohybuje ve vertikální ose a zvedá tak celou váhu tištěného modelu. Pohyb v ose Z může být velice precizní a kromě rychloposuvu při přejetí stolu do počáteční polohy pro tisk s prázdným stolem, lze setrvačné účinky při průběhu tisku zcela zanedbat. Stůl se vždy posune jen o hodnotu řádově 0,01mm. Další dvě osy jsou umístěny v horním rámu tiskárny a mají tak vyšší tuhost oproti předchozí variantě. Nabízí se zde možnost osu Z prodloužit a umožnit tak tisk podélných modelů.

Varianta číslo 3 (červená): Tato varianta uvažuje pohyb stolu pomocí dvou lineárních motorů v podélném a příčném směru. Jeho nespornou výhodou je bezvúlový mechanismus, ale nevýhodou vysoká pořizovací cena. Varianta uvažuje pouze s pohybem extrudéru ve svislém směru pomocí pohybového šroubu.

6.5 Výběr optimální varianty

Varianta č.	Kritérium								
	Cena	Objem	Tisk podélných dílů	Rychlost	Přesnost	životnost	Design	Σ	Poř.
1	4	5	3	3	1	4	3	68	3.
2	3	5	5	4	4	4	3	105	1.
3	1	3	3	5	5	5	3	90	2.
Váha 5-1	5	3	5	2	5	4	2	-	-

Tabulkač.7: Výběr optimální varianty

6.5.1 Odůvodnění kritérií

Cena – jedná se o velmi důležitý aspekt. Pořizovací a výrobní cena jsou odlišné, ale určují, jak se bude tiskárna prodávat oproti konkurenci. Velmi záleží na kompromisu ceny a použitých pohonů V případě 3D tiskárny je nejnákladnější pohonný mechanismus a lineární vedení. Cena je v tabulce udávaná s nejvyšší možnou hodnotu váhy. Čím vyšší je váha, tím více bodů získá navržená varianta.

Objem je pro tiskárnu podstatný především dle požadavků zákazníka. Pro jakou aplikaci bude tiskárna používána. V našem případě je kladený důraz na tisk prototypových dílů (Rapid Prototyping).

Tisk atypických dílů – toto kritérium považuji za velmi důležité. Například u plastových dílů na autosedače. Zde je největší nalezený plastový díl autosedačky v rozmezí hodnot 600x200x150mm. Stačí tak možnost tisku rozměrných dílů jen v jedné ose a není tak nutné mít hned velkoformátovou tiskárnu za velmi vysoké pořizovací náklady.

Rychlost tisku se pohybuje okolo 60mm/s. Je to dáno omezujícími parametry extrudéru. Vyšší rychlost je potřeba maximálně při najíždění tiskárny do počáteční polohy před tiskem a v průběhu tisku již není využita. Tento parametr proto není tak důležitý.

Přesnost má vliv na to jak bude vypadat výsledný model. Jakou bude mít povrchovou úpravu a především na jeho rozměry. Které u prototypových dílů rozdělujeme na pohledové

a funkční. Kde získáme přehled o tom, jak celkový design vypadá a nezáleží nám tolik na přesnosti. Další variantou je funkční prototyp, kde již požadujeme přesnost dílů v desetinách mm.

Životnost – tisk modelu je značně zdlouhavý proces. Proto je pohybový mechanismus cyklicky namáhán a je nutné ho proto kontrolovat na životnost jednotlivých dílů.

Design – tento parametr je důležitý z pohledu prodeje výrobku. Design prodává výrobek.

6.5.2 Posouzení výsledku

Při posuzování výsledků kritérií vyšla jako nejlepší 2. varianta se 105 body. Jako druhá se umístila varianta s použitím přesných lineárních motorů a nebyla vybrána z důvodů její vysoké ceny. Tiskárna, kterou navrhujeme, by se měla pohybovat v oblasti nižší střední třídy a účelem je postavit tiskárnu v dané cenové kategorii s vyšší přesností tisku a zároveň možností tisku rozměrnějších modelů. To jsou hlavní kritéria, kterých chceme dosáhnout.

7 Konstrukce

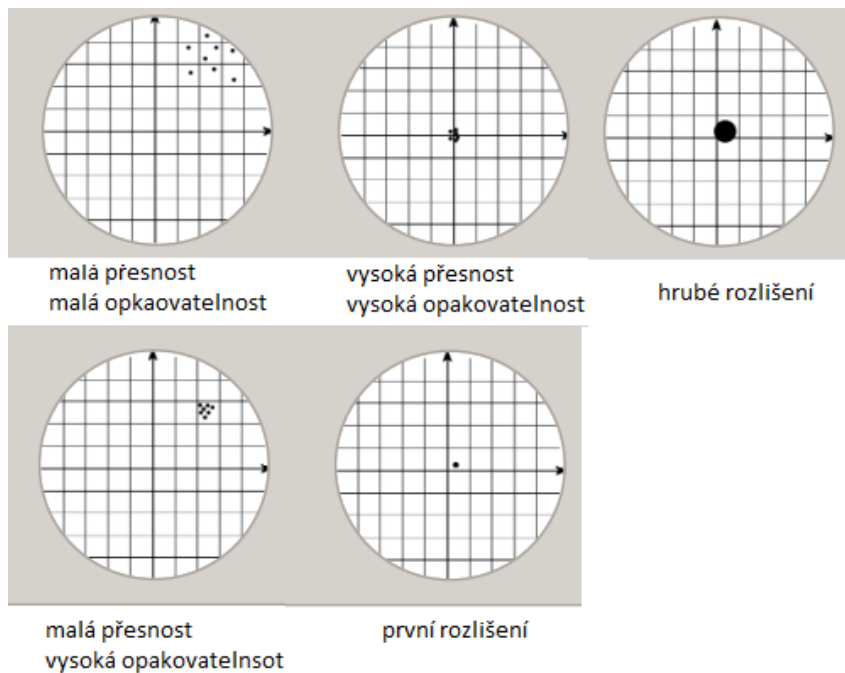
7.1 Rozlišení, přesnost a opakovatelnost

Přesnost je rozdíl mezi skutečnou polohou v prostoru a polohou měřicího zařízení.

Opakovatelnost je definována jako rozsah pozic, kterých je dosaženo (například maticí šroubu), když se matice opakovaně vrací na stejné místo za stejných podmínek. Při opakovatelnosti se měří bod z jednoho bližšího směru. Obousměrná opakovatelnost měří schopnost vrátit se do stejného bodu v obou směrech. Mnohdy se udává opakovatelnost jako \pm určité hodnoty.

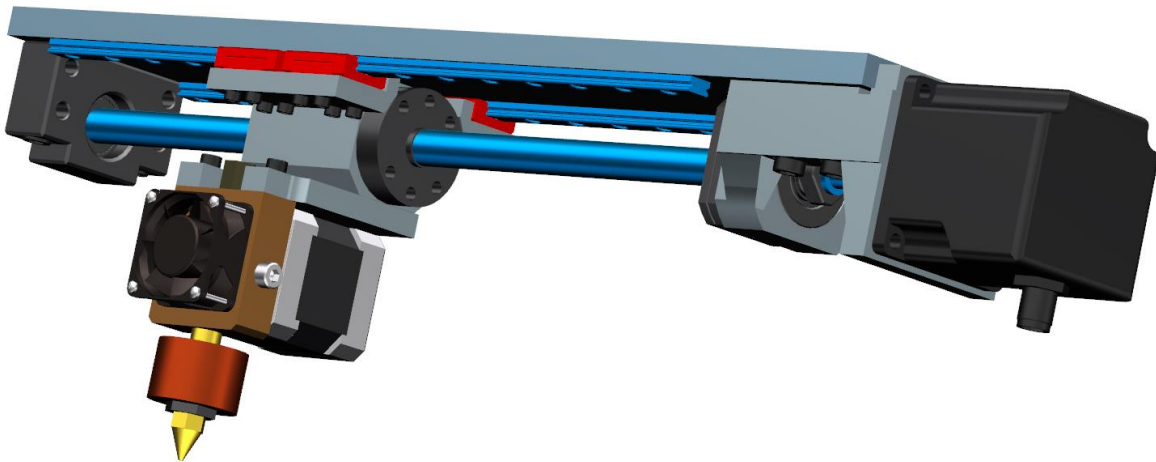
Rozlišení je nejmenší možný pohyb systému také známý jako velikost kroku. Rozlišení je určeno zpětnou vazbou se zařízením a schopností pohybového systému. Teoretické rozlišení může přesáhnout praktické řešení. Například pohybový šroub poháněný krokovým motorem nikdy nedosáhne teoretické přesnosti mikrokroku vlivem tření a dalších faktorů. Z toho důvodu praktické rozlišení je ve skutečnosti menší.

Na obrázku č.14 níže lze vidět obecné příklady přesnosti, opakovatelnosti a rozlišení.



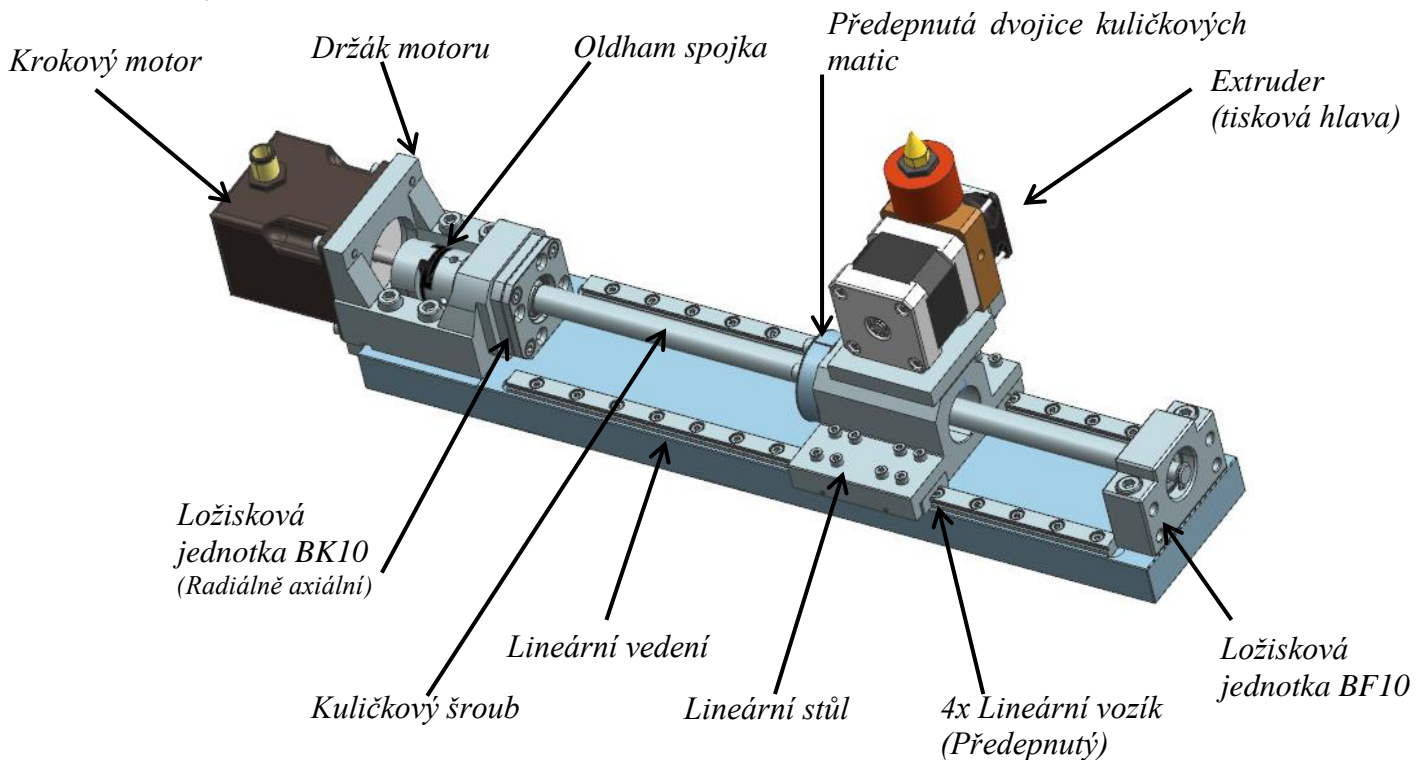
Obrázek č. 14: Rozlišení, přesnost a opakovatelnost [aerotech.com]

7.2 Návrh lineární jednotky pro osu X



Obrázek č. 15 : Lineární jednotka v ose X

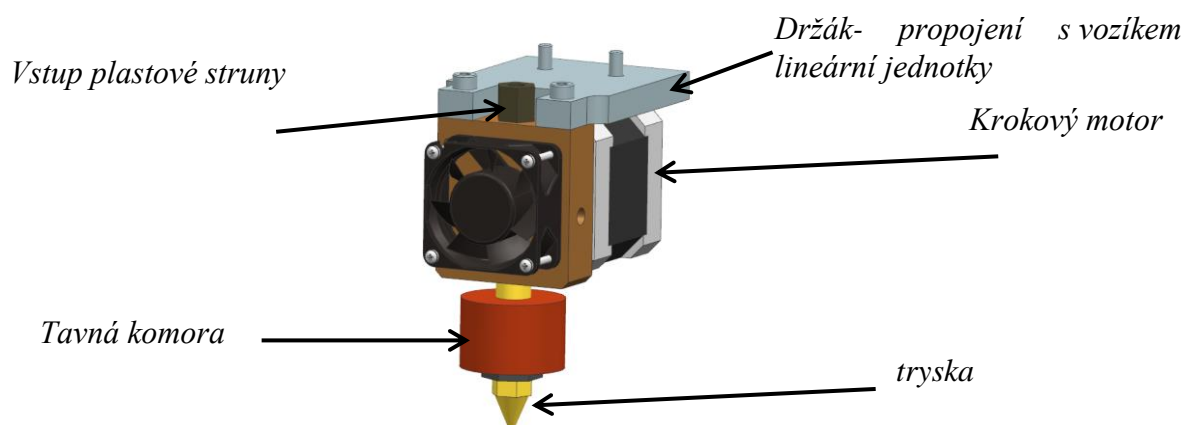
Lineární jednotka jako celek zajišťuje lineární pohyb extrúderu pomocí lineárních vedení a lineárních vozíků. Vozíky jsou přišroubované k pojízdnému stolu, kterým prochází kuličkový šroub s předepnutou dvojicí matic a je přišroubovaný pomocí příruby. Kuličkový šroub má opracované konce. Na poháněné straně je uložený v radiálně axiální ložiskové jednotce BK10. Ložisková jednotka je pomocí příruby přišroubovaná do držáku motoru. Ten je pomocí šroubů a kolíků ustaven na rámu lineární jednotky. Motor je propojený s lineární jednotkou pomocí Oldham spojky. Na druhém konci je kuličkový šroub uložený v radiální ložiskové jednotce BF10 a je zajištěný pomocí pojistného kroužku. Obě ložiskové jednotky jsou přímo určené pro daný průměr šroubu. Na stolku je umístěný samotný extruder (tisková hlava)



Obrázek č. 16 : Lineární jednotka v ose X

Extruder (Tisková hlava)

Tisková hlava neboli extruder si lze představit jako pistoli na tavné lepidlo. Do extruderu je přivedená plastová struna. Ta je vtlačována pomocí krokového motoru a ozubeného pastorku do tavné komory a následně roztavený plast vytláčen skrze trysku na pracovní desku stolu.



Obrázek č. 17 : Extruder- tisková hlava

Volba přesnosti šroubu:

Podle vybraných kritérií je požadavek na minimální přesnost moelů ve vodorovné ose x,y 0,05mm/200mm. V katalogu KSK Kuřim je možné dosáhnout přesnosti IT5 jak metodou broušení závitů, tak metodou válcování. Je to pro nás tedy jedno zásadní hledisko. Zda je zapotřebí vyšší přesnost šroubu, nebo ne. Přesnost IT5 odpovídá hodnotě $\pm 0,023/300$. Převedeme hodnotu přesnosti na délku šroubu 200mm a získáme hodnotu 0,015mm/200mm. Kriterium přesnosti modelu ve vodorovné ose je splněno s dostatečnou rezervou a není důvod volit přesnější broušený šroub.

Volíme válcovaný šroub s přesností:

IT5 přesnosti šroubu $\pm 0,023/300$ mm
délky 300mm

Výběr stoupání:

Požadovaná maximální rychlost tiskárny je 150 mm/s 0,2 m/sec
Otáčky motoru: 1800 ot/min

$$P = \frac{v}{o_t} = \frac{150}{30} = 5 \quad (1)$$

v- rychlost [mm/s]

P-stoupání závitu

o_t -otáčky motoru [ot/s]

Proto je nutné vybrat šroub se stoupáním 5 mm nebo větším.

Při této variantě může být motor s pohybovým šroubem připojený napřímo bez využití převodovky. Minimální rozlišení krokového motoru je 200 kroků na jednu otáčku. Krokování lze však násobit pomocí řídicí elektroniky a dosáhnout tak několikanásobného rozlišení (mikrokroků na otáčku).

Volíme typ **AP+A K12x5**

Jedná se o předepnutou dvojici matic s přírubou od firmy KSK

Výpočet zrychlení vozíku

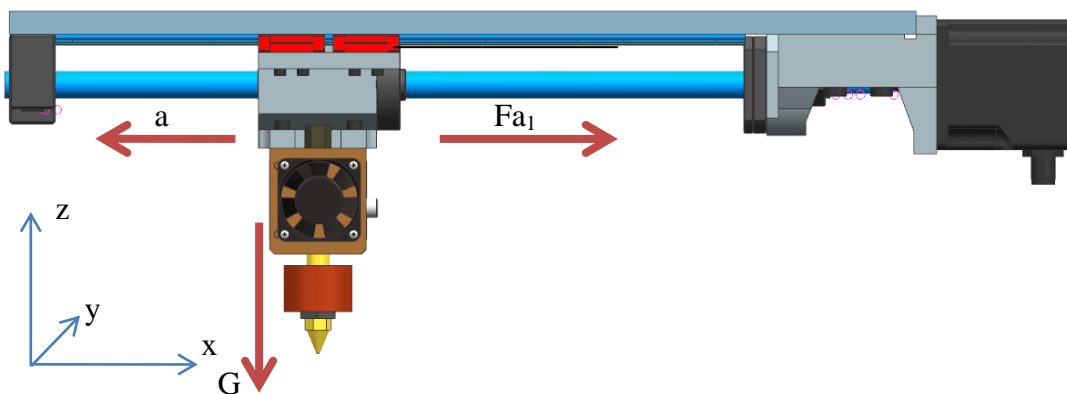
Maximální rychlost tiskárny volíme jako u obdobných typů.

Maximální rychlost- $V_{\max} = 0,15 \text{ m/s}$

Čas zrychlení- $t_1 = 0,1[\text{s}]$

Z požadovaných hodnot je získáno následující zrychlení:

$$a = \frac{V_{\max}}{t_1} = \frac{0,15}{0,1} = 1,5 \text{ m/s}^2 \quad (2)$$



Obrázek č. 18: Návrh lineární jednotky- osa x

Výpočet zatěžujících sil na matici kuličkového šroubu

Pohyb vpřed

Axiální síla při zrychlení:

$$Fa_1 = \mu \times m \times g + f + m \times a = 0,003 \times 1,5 \times 9,81 + 1,5 + 1,5 \times 1,5 = 3,8 \text{ N} \quad (3)$$

f - Třecí odpor vedení lineárních vozíků $f=1,5 \text{ N}$

μ - Koeficient tření vodících ploch, $\mu= 0.003$

a - maximální zrychlení (zpomalení) vozíku \rightarrow ze vztahu (2) $a=1,5 \text{ m/s}^2$

m - Hmotnost (Celková váha extrudéru s maticí a vedením), $m= 1,5 \text{ kg}$

g - gravitační zrychlení

Síla při konstantní rychlosti:

$$Fa_2 = \mu \times m \times g + f = 1,5 \text{ N} \quad (4)$$

Axiální síla při zpomalení:

$$Fa_3 = \mu \times m \times g + f - m \times a = -0,8 N \quad (5)$$

Pohyb vzad (zpětný chod)

Během zpětného chodu:

$$Fa_4 = \mu \times m \times g - f - m \times a = -3,8 N \quad (6)$$

Síla při konstantní rychlosti:

$$Fa_5 = -\mu \times m \times g - f = -1,5 N \quad (7)$$

Axiální síla při zpomalení:

$$Fa_6 = -\mu \times m \times g - f + m \times a = 0,8 N \quad (8)$$

Z následujícího výpočtu vidíme, že maximální zatížení kuličkové matice pohybového šroubu v axiálním směru je zanedbatelných -3,8 N.

Předeptnutí dvojice matic:

$$\frac{F_v}{F_a} = 2,83$$

$$F_v = F_a \times 2,83 = 3,8 \times 2,83 = 11 N \quad (9)$$

F_v = síla předeptnutí matice

F_a = zatěžující axiální síla

Matice stačí předeptnout na hodnotu 11N.

Určení deformace v axiálním směru:

$$\delta = \frac{F_a}{R} = \frac{3,8}{220} = 0,02 \mu m \quad (10)$$

F_a - vnější axiální síla [N]

δ - hodnota deformace v [μm]

R = tuhost kuličkového převodu [N/ μm]

Hodnotu R=220 N/[μm] jsme zjistili z katalogu pro matici K12x5.³

Stanovení trvanlivosti kuličkového šroubu:

Střední otáčky

Většinu času budeme tisknout konstantní rychlostí 60mm/s \rightarrow 12ot/s
n=720 (min-1)

³ Kulickove srouby Zdroj: http://www.ks-kurim.cz/fileadmin/user_upload/Ostatni_pdf_soubory/Ke_stazeni/Produktovy_katalog_2012_CZE.pdf

$$n_m = \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{100} \times n_j = \frac{100}{100} \cdot 720 = 720 \text{ ot/min} \quad (11)$$

kde q je poměrná doba působení v %

Střední vnitřní axiální zatížení F_{ma}

(střední zatížení, které zahrnuje vnější axiální zatížení a předeprnutí)

99% času se pohybujeme konstantní rychlostí.

$$F_{ma(1),(2)} = \sqrt[3]{\sum_{j=1}^n F_{a(1),(2)j}^3 \times \frac{n_j}{n_m} \times \frac{q_j}{100}} = 13N \quad (12)$$

F_a - vnitřní axiální zatížení, které se vypočítá následovně:

$$F_{a(1),(2)} = F_v \times \left(1 + \frac{F_{1,2j}}{2,83 \times F_v}\right)^{3/2} = 11 \times \left(1 + \frac{3,8}{2,83 \times 11}\right)^{3/2} = 13N \quad (13)$$

F_v - je předeprnutí ze vzorec (11)

$F_{1,2}$ síla od vnějšího axiálního zatížení indexy 1 resp. 2 označují směr zatížení a indexy (1) resp. (2) označují příslušnost k matici 1 resp. 2.

Trvanlivost

v otáčkách:

$$L_{1,2} = \left(\frac{C_a \times f_m}{F_{ma}}\right)^3 \times 10^6 = \left(\frac{4940 \times 1,25}{13}\right)^3 \times 10^6 = 1,7 \times 10^{14} \text{ ot} \quad (14)$$

C_a -základní dynamická axiální únosnost
v hodinách:

f_m - koeficient vlivu jakosti a stavu materiálu (standardně je $f_m = 1,25$)

$$L_h = \frac{L}{n_m \times 60} = \frac{1,7 \times 10^{14}}{720 \times 60} = 2,4 \times 10^9 \text{ hod} \quad (15)$$

C_a - základní dynamická axiální únosnost (N), odpovídající stálému a neměnnému zatížení, které KŠ může teoreticky přenášet při trvanlivosti 1 milionu otáček.

Stanovení mezních hodnot KS

Výpočet maximálních otáček hřídele

$$n_{max} = 0,8 \times n_{kr} = 0,8 \times 20\,000 = 16\,000 \text{ ot/min} \quad (16)$$

Kritické otáčky

$$n_{kr} = \frac{1 \times 10^7 \times f_n \times d_0}{l_s^2} = \frac{1 \times 10^7 \times 15 \times 12}{300^2} = 20\,000 \text{ ot/min} \quad (17)$$

d_0 - jmenovitý průměr KŠ

l_s - vzdálenost uložení hřídele

f_n - součinitel dle uložení hřídele

Maximální axiální zatížení vzhledem ke vzpěrné tuhosti hřídele

$$F_{(a)max} = 0,33 \times Q_{kr} = 0,33 \times 7143 = 2357 \text{ N} \quad (18)$$

Kritická zatěžující axiální síla odvozená od materiálových vlastností hřídele

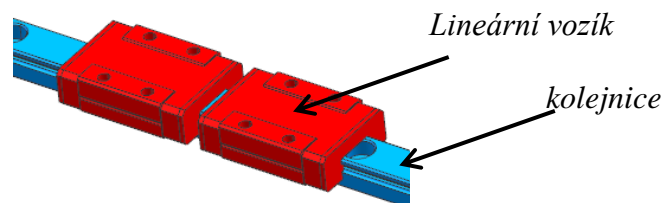
$$Q_{kr} = \frac{\pi^3 \times 500 \times d_0^4}{f_v \times l_s^2} = \frac{\pi^3 \times 500 \times 12^4}{0,5 \times 300^2} = 7143 \text{ N} \quad (19)$$

f_v – součinitel dle typu uložení hřídele

7.3 Návrh lineárního vedení pro jednotku v ose X

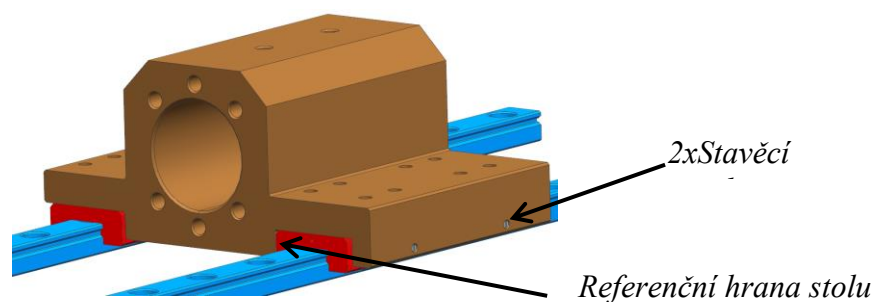
Ve svém principu se lineární vedení skládá z lišty a valivých bloků s kuličkami nebo válečkami, které dovolují plynulý pohyb.

Obrázek č. 18: Návrh lineární jednotky- osa x

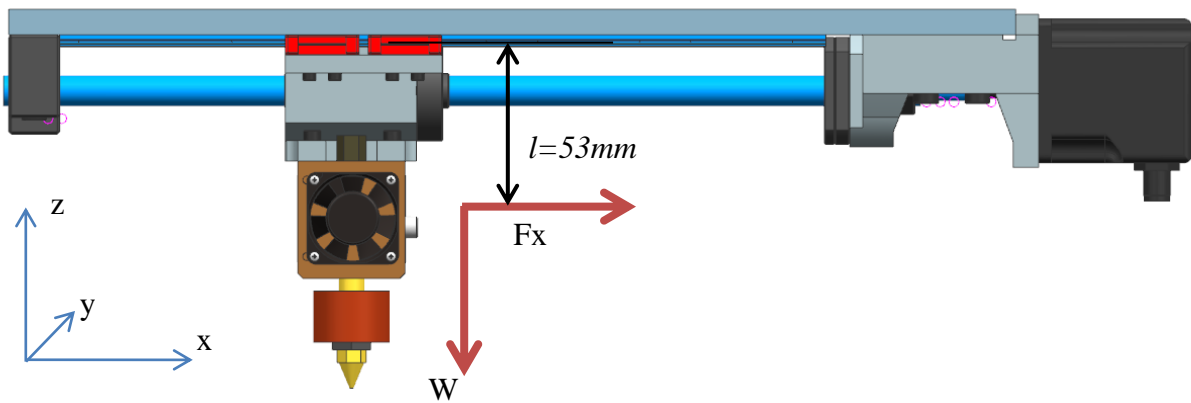


Obrázek č. 19: lineární vozík s kolejnici

Při použití více kolejnic současně a propojení pomocí desky stolu je kladený velký důraz na přesné vedení. Nejprve se ustaví jedna kolejnice s vozíky do drážky a přitlačí se k referenční hraně a následně se přišroubuje. Ustaví se druhá kolejnice a srovná se vůči první pomocí číselníkového úchylkoměru. Přiložíme upevňovací stůl a lehce našroubujeme všechny šrouby. Následně přitlačíme vozíky k referenční hraně pomocí stavěcích šroubů a následně všechny šrouby dotáhneme. Projedeme několikrát dráhu vozíku a při podezření na příčné síly. Šrouby lehce povolíme a opět dotáhneme, aby se vedení přesně ustavilo.



Obrázek č. 20: lineární vedení s upevňovacím stolem



Obrázek č. 21: Návrh lineární jednotky- osa x

Výpočet sil působících na lineární vedení vozíku:

Maximální rychlost $V_{\max} = 0,15 \text{ m/s}$

Čas zrychlení: $t_1 = 0,1 \text{ [s]}$

Z požadovaných hodnot je získáno následující zrychlení:

$$a = \frac{V_{\max}}{t_1} = \frac{0,15}{0,1} = 1,5 \text{ m/s}^2 \quad (20)$$

Síly působící na lineární vedení

Setrvačná síly ve směru osy x:

$$F_x = m \times a = 1,5 \times 1,5 = 2,25 \text{ N} \quad (21)$$

$m = 1,5 \text{ kg}$

m - celková hmotnost extrudéru 2x (pro případ použití 2 extrudérů) s držákem a vozíkem

a - maximální zrychlení vozíku

Koeficient tření vodících ploch $\mu = 0,003$

Setrvačná síly ve směru osy y:

$$F_y = m \times a = 1,5 \times 1,5 = 2,25 \text{ N} \quad (22)$$

Síly jsou stejné, protože maximální zrychlení lineární jednotky osy y je také $1,5 \text{ m/s}^2$

Tíhová síla působící na kolejnici:

$$W = m \times g = 1,5 \times 10 = 15 \text{ N} \quad (23)$$

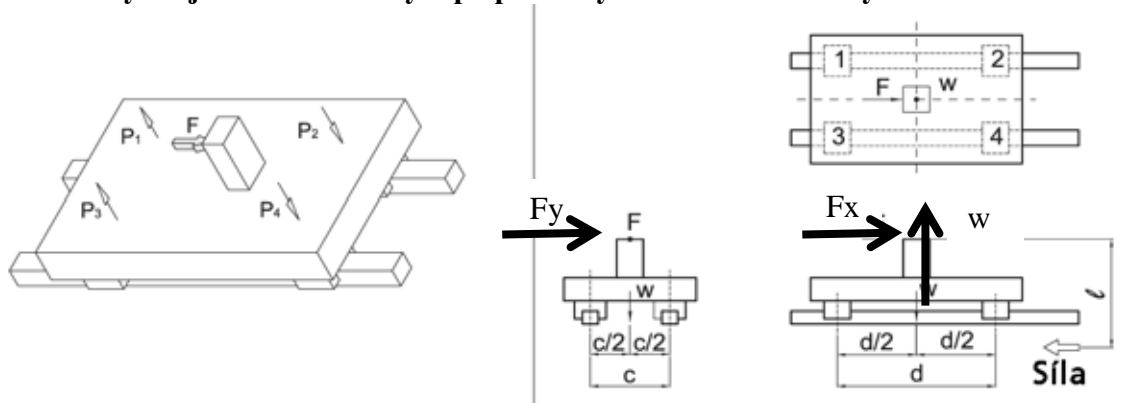
W -tíhová síla

Při výpočtu zatížení působící na profilové kolejnicové vedení je nutné uvažovat různé faktory, (těžiště zatížení, setrvačné účinky)

Volíme lineární vedení MGN9C

Výpočet zatížení působící na jeden vozík:

Silové účinky na jednotlivé vozíky v případě zrychlení ve směru osy x:



Obrázek č. 22: Znárodnění výpočtu zatížení působící na jeden vozík

$$P_1 = P_3 = \frac{w}{4} + \frac{F_x \times l}{2 \times d} = \frac{15}{4} + \frac{2,25 \times 0,053}{2 \times 0,0325} = 5,6N \quad (24)$$

$$P_2 = P_4 = \frac{w}{4} + \frac{F_x \times l}{2 \times d} = \frac{15}{4} - \frac{2,25 \times 0,053}{2 \times 0,0325} = -1,9N \quad (25)$$

Silové účinky na jednotlivé vozíky v případě zrychlení ve směru osy y:

$$P_1 = P_2 = \frac{w}{4} + \frac{F_y \times l}{2 \times c} = \frac{15}{4} + \frac{2,25 \times 0,053}{2 \times 0,0615} = 4,7N \quad (26)$$

$$P_3 = P_4 = \frac{w}{4} - \frac{F_y \times l}{2 \times c} = \frac{15}{4} - \frac{2,25 \times 0,053}{2 \times 0,0615} = 2,8N$$

Pro volbu lineárního vozíku uvažujeme nejvyšší hodnotu $P = 5,6 N$

Deformace vozíku a kolejniče:

Výpočet deformace mezi vozíkem a kolejničí.
volíme předpětí Z1

$$\delta = \frac{P}{K} = \frac{2,8}{120} = 0,02\mu m = 0,00002mm \quad (27)$$

p- pracovní zatížení vozík [N]

δ - hodnota deformace v [μm]

K = hodnota tuhosti mezi vozíkem a kolejničí při předpětí Z1 → předpětí (odečteno z katalogu) → 120 [N/ μm]

Z předchozího výpočtu deformace lze usoudit, že lze vozík při daném zatížení uvažovat jako absolutně tuhý a dostatečně předepnutý a deformaci mezi kolejničí a vozíkem tak lze zanedbat ve výsledném součtu deformací.

Životnost a únosnost lineárního vedení

Je závislá na dané konstrukci, teplotě, rozměrech lineárního vedení, materiálu, ale hlavně na způsobu zatěžování. Účinky mohou být statické nebo dynamické. Proto při určování životnosti je nutné uvažovat hodnoty dynamické a statické únosnosti.⁴

Statická únosnost C_0

V případě, že kolejnicové vedení bude zatěžováno vysokým vedením nebo rázy dochází k trvalé deformaci mezi vozíkem a kolejnicí. Deformace snižuje jeho životnost a omezuje jeho pohyb. Statická únosnost lze definovat jako velikost statického zatížení, při kterém se valivé těleso plasticky deformuje o 0,0001 násobku svého průměru. Statickou únosnost je nutné zkontrolovat u lineárního vedení v klidové poloze, nebo pokud je v pomalém pohybu. Nesmíme zapomenout na bezpečnostní faktor, který je závislý na provozních podmínkách. Zvýšená bezpečnost je nutná u vedení vystavených velkým rázům ($f_{SL}=3-5$) a pro normální zatížení ($f_{SL}=1,25-3$).

V našem případě se bude jednat o normální zatížení $f_{SL}=1,25-3$.

Z důvodů malých zatížení volíme miniaturní sérii lineárních vozíků od firmy HIWIN MGN-9C

Statický bezpečnostní faktor

$$f_{SL} = \frac{C_0}{P} = \frac{2600}{5,6} = 464 \quad (28)$$

f_{SL} = Bezpečnostní faktor statického zatížení

C_0 = Statická únosnost [N]

M = Statický ekvivalentní moment [N/mm]

P = Statické ekvivalentní zatížení [N]

Dynamická únosnost C_{dyn}

Dynamická únosnost je zatížení, které se nemění ve směru ani velikosti a výsledkem je nominální životnost 100 km provozu u válečkového lineárního vedení a 50 km provozu u kuličkového. V našem případě kuličkového vedení z důvodu malých zatížení.⁵

Jmenovitá (nominální) životnost L

$$L = \left(\frac{f_H \times f_T \times C_{dym}}{f_W \times P} \right)^3 \times 50\,000 = \left(\frac{1 \times 1 \times 1900}{1,2 \times 5,6} \right)^3 \times 50\,000 = 1,1 \times 10^{12} \text{ m} \quad (30)$$

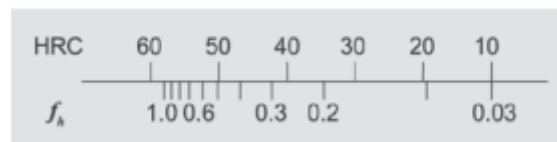
⁴ Lineární vedení: Zdroj: http://www.hiwin.cz/media/files/01_Linearni_vedeni.pdf

L = Jmenovitá životnost [m]
 C_{dyn} = Dynamická únosnost [N]
 P = Dynamicky ekvivalentní zatížení [N]
 f_H = faktor tvrdosti
 f_T = faktor teploty
 f_w = faktor zatížení

Faktory ovlivňující životnost:

➤ faktor tvrdosti - f_H

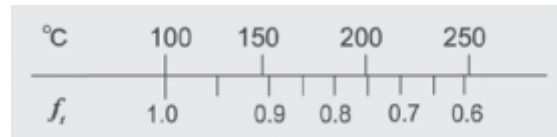
Tvrdoost drah lineárního vedení je 58 HRC. Dle obrázku dostáváme pro tuto hodnotu koeficient tvrdosti 1.0. Pokud tvrdost není dodržena, snižuje se tím hodnota přípustného zatížení. Pak je nutno vynásobit dynamickou a statickou únosnost koeficientem tvrdosti dle obrázku níže.



Obrázek č. 19: Faktor tvrdosti

➤ faktor teploty - f_T

Při zvyšování teploty nad 100°C se snižuje hodnota přípustného zatížení i životnost. Proto dynamickou a statickou únosnost násobíme koeficientem teploty dle obrázku:



Obrázek č. 20: Faktor teploty

➤ faktor zatížení - f_w

Velký vliv na hodnoty statické a dynamické únosnosti má způsob zatížení, které působí na vedení a dále také rychlost pojezdu. Největší faktor zatížení dostáváme u zatížení s rázy a vibracemi, zde je $f_w = 2 - 3,5$. Další hodnoty lze vidět na obrázku níže.⁶

Typ zatížení	Pojezdová rychlost	f_w
žádné rázy a vibrace	$V < 15$ m/min	1,0-1,2
malé rázy	15 m/min $< V < 60$ m/min	1,2-1,5
normální zatížení	60 m/min $< V < 120$ m/min	1,5-2,0
s rázy a vibracemi	$V > 120$ m/min	2,0-3,5

Obrázek č. 21: Vliv zatížení a pojezdové rychlosti na únosnost

⁶ Lineární vedení: Zdroj: http://www.hiwin.cz/media/files/01_Linearni_vedeni.pdf

Výpočet doby životnosti v hodinách L_h

$$L_h = L \times \frac{50\,000}{v \times 60} = 1,1 \cdot 10^{12} \times \frac{50\,000}{0,06 \times 60} = 13\,888 \text{ hodin} \quad (31)$$

v = rychlost [m/min]

Třecí odpor

$$F_R = \mu \times F = 0,003 \times 15 = 0,045 \text{ N} \quad (32) \quad \rightarrow 1,5\text{N}$$

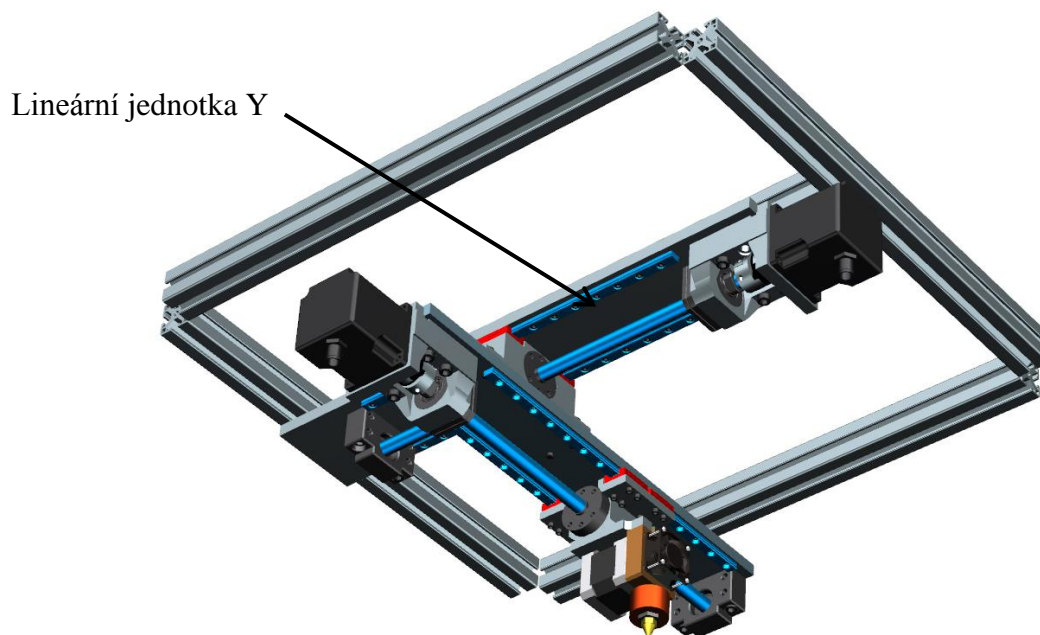
V tomto případě bude odpor vyšší způsobený odporem maziva a třením mezi valivými tělesy.

Volím 1,5N.

μ = koeficient tření [0,002 – 0,004]

F = zatížení [N]

7.4 Návrh lineární jednotky pro osu Y



Obrázek č. 22: Lineární jednotka pro osu Y

U lineární jednotky Y volíme stejný typ šroubu a matice jako u předchozí varianty. Stejně tak jako u pohybu ve směru osy x budeme požadovat stejné přesnosti i ve směru y. Jak již bylo řečeno u návrhu předchozí varianty.

Volíme tedy:

Matici AP+A K12x5 → Jedná se o předepnutou dvojici matic s přírubou
přesnost šroubu $\pm 0,023/300$ mm
Délku šroubu 300mm

Výpočet maximální axiální síly:

Třecí odpor vedení lineárních vozíků $f=1,5$ N

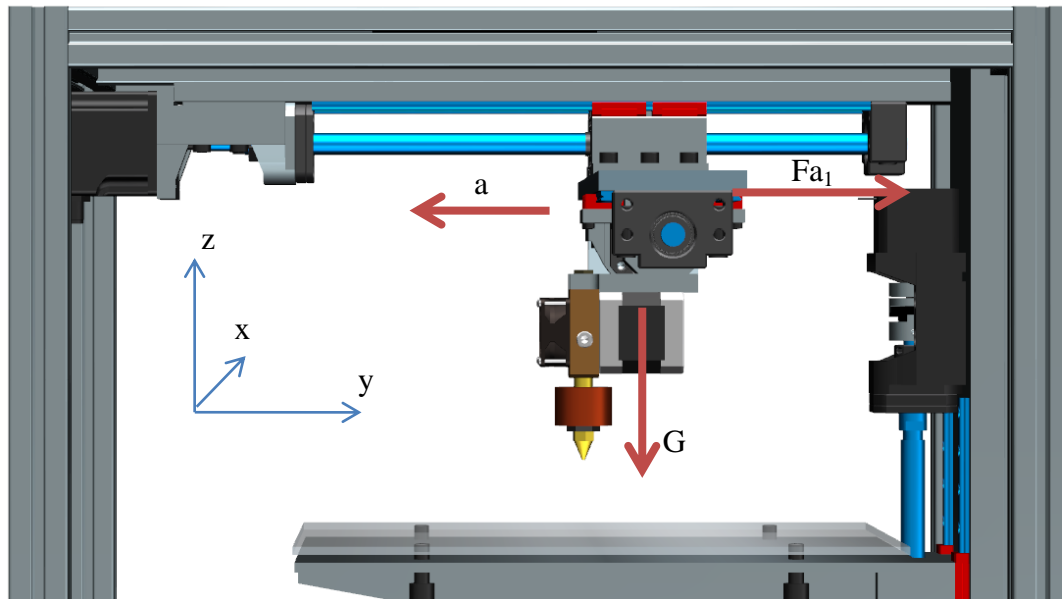
Koeficient tření vodících ploch $\mu= 0.003$

Maximální rychlost $V_{\max} = 0,15$ m/s

Čas zrychlení: $t_1 = 0.1$ [s]

Z požadovaných hodnot je získáno následující zrychlení:

$$a = \frac{V_{\max}}{t_1} = \frac{0,15}{0,1} = 1,5 \text{ m/s}^2 \quad (33)$$



Obrázek č. 23: Návrh lineární jednotky- osa x

Výpočet zatěžujících sil na matici kuličkového šroubu:

Pohyb vpřed

axiální síla při zrychlení:

$$Fa_1 = \mu \times m \times g + f + m \times a = 0,003 \times 5 \times 9,81 + 1,5 + 5 \times 1,5 = 9N \quad (34)$$

f - Třecí odpor vedení lineárních vozíků $f=1,5$ N

μ - Koeficient tření vodících ploch, $\mu= 0.003$

a - maximální zrychlení (zpomalení) vozíku \rightarrow ze vztahu (33) $a=1,5$ m/s²

Hmotnost (Celková váha extruderu s maticí a vedením) $m= 5$ kg

g - gravitační zrychlení

Síla při konstantní rychlosti:

$$Fa_2 = \mu \times m \times g + f = 1,5N \quad (35)$$

Axiální síla při zpomalení:

$$Fa_3 = \mu \times m \times g + f - m \times a = -6N \quad (36)$$

Pohyb vzad (zpětný chod)

Během zpětného chodu:

$$Fa_4 = \mu \times m \times g - f - m \times a = -9N \quad (37)$$

Síla při konstantní rychlosti:

$$Fa_5 = \mu \times m \times g - f = -1,5N \quad (38)$$

Axiální síla při zpomalení:

$$Fa_6 = \mu \times m \times g - f + m \times a = 6N \quad (39)$$

Z následujícího výpočtu vidíme, že maximální zatížení pohybového šroubu extrudéru je 9N.

Předeprnutí matice

$$\frac{F_v}{F_a} = 2,83 \quad (40)$$

$$F_v = F_a \times 2,83 = 9 \times 2,83 = 25,5N \quad (41)$$

F_v = síla předeprnutí matice

F_a = zatěžující axiální síla

Stanovení trvanlivosti kuličkového šroubu:

Střední otáčky

Většinu času budeme tisknout konstantní rychlostí 60mm/s \rightarrow 12ot/s
 $n=720$ (min-1)

$$n_m = \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{100} \times n_j = \frac{100}{100} \cdot 720 = 720 \frac{\text{ot}}{\text{min}} \quad (42)$$

kde q je poměrná doba působení v %

Střední vnitřní axiální zatížení⁷

-střední zatížení, které zahrnuje vnější axiální zatížení a předeprnutí

99% času se pohybujeme konstantní rychlostí.

Matice jsou zatěžovány symetricky.

$$F_{ma(1),(2)} = \sqrt[3]{\sum_{j=1}^n F_{a(1),(2)j}^3 \times \frac{n_j}{n_m} \times \frac{q_j}{100}} = 27N \quad (43)$$

kde F_a je vnitřní axiální zatížení, které se vypočítá následovně:

$$F_{a(1),(2)} = F_v \times \left(1 + \frac{F_{1,2j}}{2,83 \times F_v}\right)^{3/2} = 25,5 \times \left(1 + \frac{9}{2,83 \times 25,5}\right)^{3/2} = 27N \quad (44)$$

F_v - síla předeprnutí

F -síla od vnějšího axiálního zatížení indexy 1 resp. 2 označují směr zatížení a indexy (1) resp. (2) označují příslušnost k matici 1 resp. 2.

⁷ Kulickove srouby Zdroj: http://www.ks-kurim.cz/fileadmin/user_upload/Ostatni_pdf_soubory/Ke_stazeni/Produktovy_katalog_2012_CZE.pdf

Trvanlivost

v otáčkách:

$$L_{1,2} = \left(\frac{C_a \times f_m}{F_{ma}} \right)^3 \times 10^6 = \left(\frac{4940 \times 1,25}{27} \right)^3 \times 10^6 = 1,1 \times 10^{13} \text{ ot} \quad (45)$$

C_a = základní dynamická axiální únosnost v hodinách:

f_m = koeficient vlivu jakosti a stavu materiálu (standardně je $f_m = 1,25$)

$$L_h = \frac{L}{n_m \times 60} = \frac{1,7 \times 10^{14}}{720 \times 60} = 9,9 \times 10^{11} \text{ hod} \quad (46)$$

Kde C_a je základní dynamická axiální únosnost (N), odpovídající stálému a neměnnému zatížení, které KŠ může teoreticky přenášet při trvanlivosti 1 milionu otáček.

Stanovení mezních hodnot KS

Výpočet maximálních otáček hřídele

$$n_{max} = 0,8 \times n_{kr} = 0,8 \times 20\,000 = 16000 \text{ ot/min} \quad (47)$$

Kritické otáčky

$$n_{kr} = \frac{1 \times 10^7 \times f_n \times d_0}{l_s^2} = \frac{1 \times 10^7 \times 15 \times 12}{300^2} = 20\,000 \text{ ot/min} \quad (48)$$

d_0 = jmenovitý průměr KŠ

l_s = vzdálenost uložení hřídele

f_n = součinitel dle uložení hřídele

Maximální axiální zatížení vzhledem ke vzpěrné tuhosti hřídele

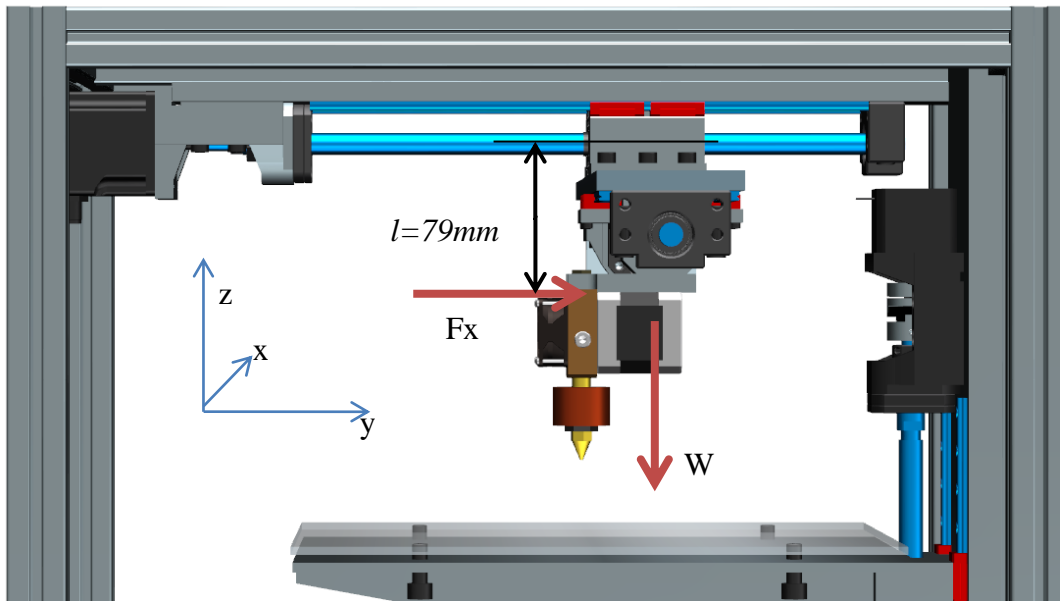
$$F_{(a)max} = 0,33 \times Q_{kr} = 0,33 \times 7143 = 2357 \text{ N} \quad (49)$$

Kritická zatěžující axiální síla odvozená od materiálových vlastností hřídele

$$Q_{kr} = \frac{\pi^3 \times 500 \times d_0^4}{f_v \times l_s^2} = \frac{\pi^3 \times 500 \times 12^4}{0,5 \times 300^2} = 7143 \text{ N} \quad (50)$$

f_v = součinitel dle typu uložení hřídele

Návrh lineárního vedení pro jednotku v ose Y



Obrázek č. 24: Návrh lineární jednotky- osa y

Výpočet sil působících na lineární vedení vozíku:

$m = 5 \text{ kg}$

m - celková hmotnost lineární jednotky x

Koeficient tření vodících ploch $\mu = 0.003$

Maximální rychlost $V_{\max} = 0,15 \text{ m/s}$

Čas zrychlení: $t_1 = 0.1 \text{ [s]}$

Z požadovaných hodnot je získáno následující zrychlení:

$$a = \frac{V_{\max}}{t_1} = \frac{0,15}{0,1} = 1,5 \text{ m/s}^2 \quad (51)$$

Síly působící na lineární vedení

Při výpočtu zatížení působící na profilové kolejničové vedení je nutné uvažovat různé faktory, (těžiště zatížení, setrvačné účinky)

Setrvačná síly ve směru osy x:

$$F_y = m \times a = 5 \times 1,5 = 7,5 \text{ N} \quad (52)$$

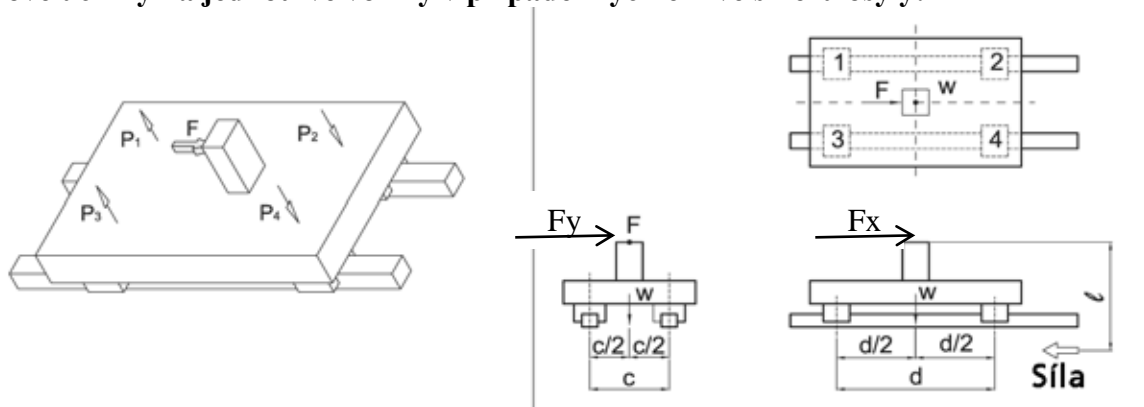
Gravitační síla:

Těžiště působí v ose lineárního motoru. Malý nevyvážek způsobuje jen větrák extruderu a tryska vážící několik gramů.

$$W = m \times g = 5 \times 9,81 = 50 \text{ N} \quad (53)$$

Výpočet zatížení působící na jeden vozík:

Silové účinky na jednotlivé vozíky v případě zrychlení ve směru osy y:



Obrázek č. 25: Návrh lineární jednotky- osa y

$$P_1 = P_3 = \frac{w}{4} + \frac{F_y \times l}{2 \times d} = \frac{50}{4} + \frac{7,5 \times 0,079}{2 \times 0,0325} = 21,6N \quad (54)$$

$$P_2 = P_4 = \frac{w}{4} + \frac{F_y \times l}{2 \times d} = \frac{50}{4} - \frac{7,5 \times 0,079}{2 \times 0,0325} = 3,3N \quad (55)$$

Pro volbu lineárního vozíku uvažujeme nejvyšší hodnotu $P = 21,6 N$

Deformace vozíku a kolejničky:

Výpočet deformace mezi vozíkem a kolejničí.
volíme předpětí Z1

$$\delta = \frac{P}{K} = \frac{21,6}{120} = 0,175\mu m = 0,00175mm \quad (56)$$

p- pracovní zatížení vozík [N] → maximální zatížení vozíku → (54)

δ- hodnota deformace v [μm]

K = hodnota tuhosti mezi vozíkem a kolejničí při předpětí Z1 → předpětí (odečteno z katalogu) → 120 [N/μm]

Tak jako u předchozí varianty lineárního vedení v ose x, také zde vyšla tuhost kolem 1 μm a lze ji tak zanedbat.

Životnost a únosnost lineárního vedení

Budeme postupovat obdobně jako u lineárních vozíků pro osu x.

Statická únosnost C_0

zatížení $f_{SL}=1,25-3$.

Z důvodů malých zatížení volíme miniaturní sérii lineárních vozíků od firmy HIWIN MGN-9C

Statický bezpečnostní faktor

$$f_{SL} = \frac{C_0}{P} = \frac{2600}{21,6} = 120 \quad (57)$$

f_{SL} = Bezpečnostní faktor statického zatížení

C_0 = Statická únosnost [N]

M = Statický ekvivalentní moment [N/mm]

P = Statické ekvivalentní zatížení [N]

Jmenovitá (nominální) životnost L

$$L = \left(\frac{f_H \times f_T \times C_{dym}}{f_W \times P} \right)^3 \times 50\,000 = \left(\frac{1 \times 1 \times 1900}{1,2 \times 21,6} \right)^3 \times 50\,000 = 1,96 \cdot 10^{10} \text{ m} \quad (58)$$

L = Jmenovitá životnost [m]

C_{dyn} = Dynamická únosnost [N]

P = Dynamicky ekvivalentní zatížení [N]

f_H = faktor tvrdosti

f_T = faktor teploty

f_W = faktor zatížení

Faktory ovlivňující životnost:

➤ **faktor tvrdosti - f_H**

Tvrdość drah lineárního vedení je 58 HRC

$f_H=1$

➤ **faktor teploty - f_T**

Do 100°C má hodnotu $f_T= 1$

➤ **faktor zatížení - f_W**

$f_W =$ volíme 1,2

Výpočet doby životnosti v hodinách L_h

Provedení HG, EG, Q1, MG, WE – kuličkové

$$L_h = L \times \frac{50\,000}{v \times 60} = 1,96 \cdot 10^{10} \times \frac{50\,000}{0,06 \times 60} = 9,4 \cdot 10^9 \text{ hodin} \quad (59)$$

v = rychlost [m/min]

L = Jmenovitá životnost [m]

Třecí odpor

$$F_R = \mu \times F = 0,003 \times 50 = 0,15N \quad (60) \quad N \rightarrow 1,5N$$

V tomto případě bude odpor vyšší způsobený odporem maziva a třením mezi valivými tělesy. Volím 1,5N.

μ = koeficient tření [0,002 – 0,004]

F = zatížení [N]

Výpočet potřebného kroučícího momentu motoru:

Uvažujeme potřebný čas zrychlení $t=0,1$ [s]

m - Hmotnost (Celková váha extruderu s maticí a vedením) $m= 5$ kg

$J_s=4,7 \cdot 10^{-6}$ [kg.m²]

J_s -setrvačný moment kuličkového šroubu 12x300mm šroubu [kg.m²]

J -setrvačný moment od pohybu extruderu + setrvačný moment šroubu

$$J = m \cdot \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2 \cdot 10^{-6} + J_s = 5 \cdot \left(\frac{5}{2\pi}\right)^2 \cdot 10^{-6} + 4,7 \cdot 10^{-6} = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ [kg.m}^2\text{]}$$

m -hmotnost extruderu [Kg]

p -stoupání v [mm]

N_{max} -maximální požadované otáčky motoru $N_{max}=1800$ [ot/min]

Výpočet úhlového zrychlení

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi \cdot N_{max}}{60 \cdot t} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N_{max}}{60 \cdot t} = 1884 \text{ [rad/s}^2\text{]}$$

α -Úhlové zrychlení

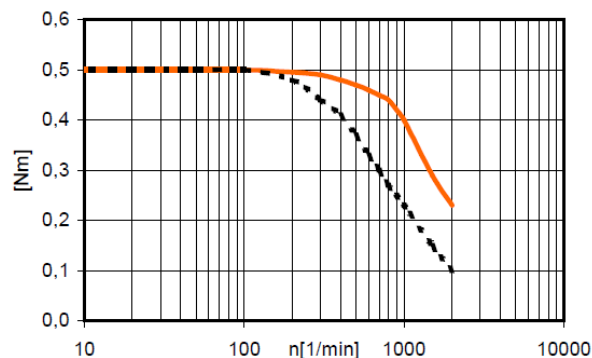
t -čas zrychlení [s]

$$M_s = (J + J_m) \cdot \alpha = (3,1 \cdot 10^{-4} + 3,1 \cdot 10^{-8}) \cdot 1884 = 0,43 \text{ [N.m]}$$

M_s -potřebný kroučící moment krokového motoru pro zrychlení (zpomalení)

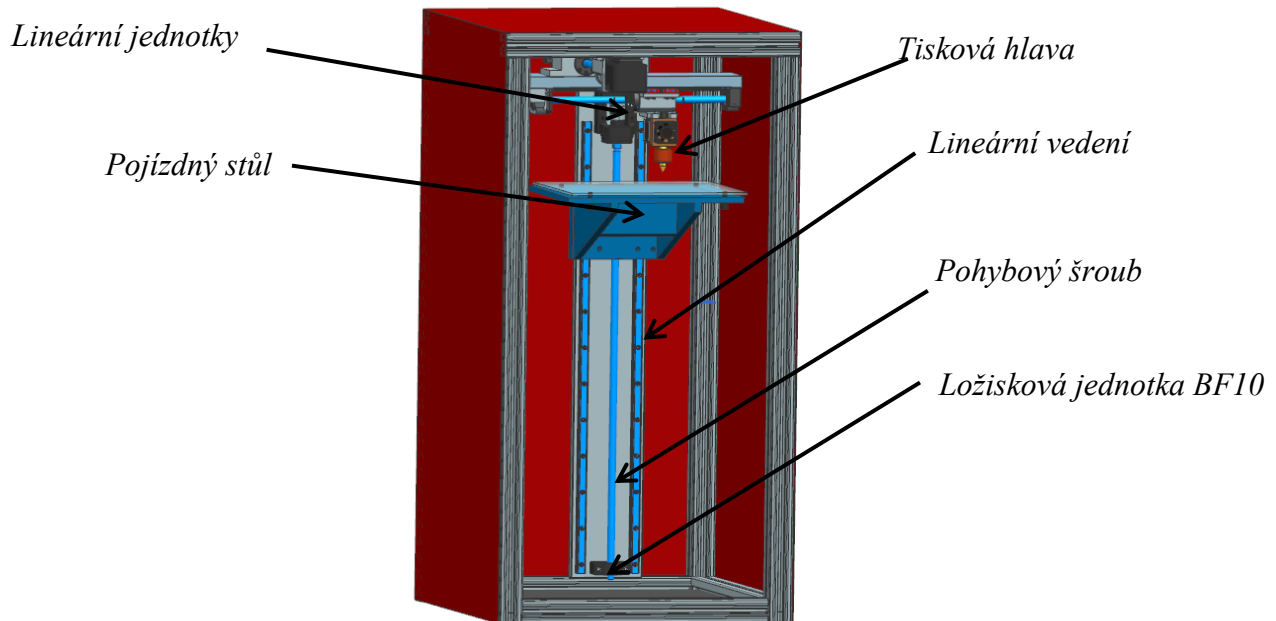
J_m - setrvačný moment krokového motoru

$$J_m = 3,1 \cdot 10^{-8} \text{ [kg.m}^2\text{]}$$



Obrázek č. 25: charakteristika krokového motoru NEMA 17-0,5 N.m

7.5 Konstrukční návrh pohybového šroubu pro svislý pohyb stolu



Obrázek č. 25: Lineární vedení a pohybový šroub pro svislý pohyb stolu

7.5.1 Výběr optimálního pohybového šroubu pro pohyb stolu v ose Z

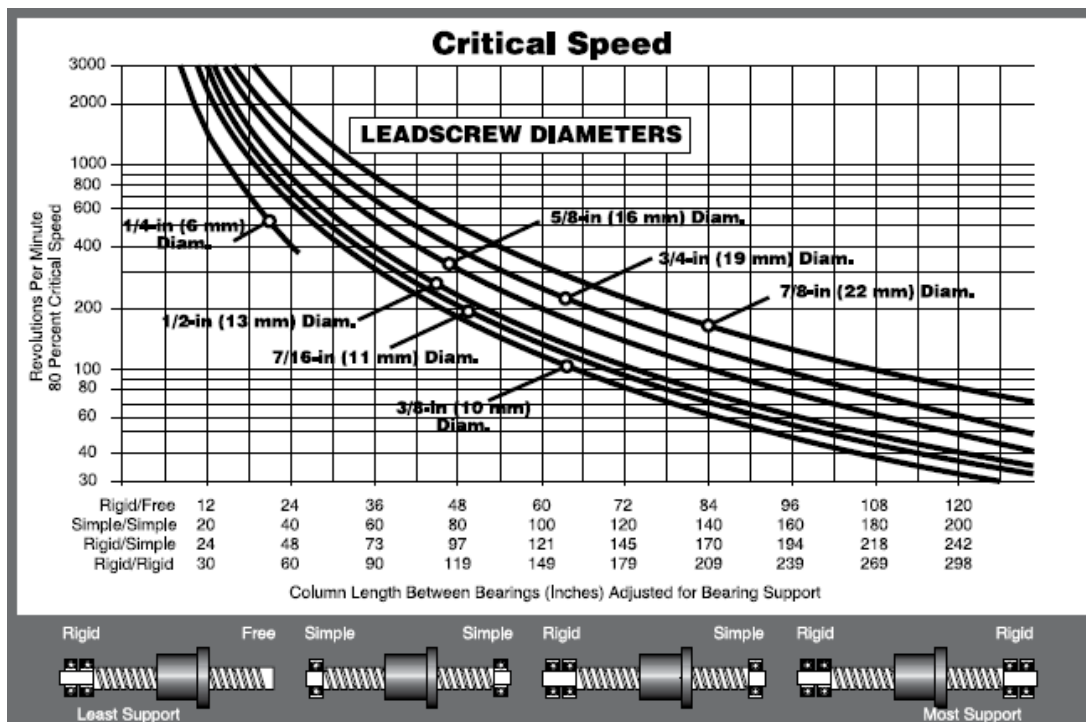
Firma Hydon KERK Motion Solution se specializuje na produkty, kde je zapotřebí dosáhnout vysoké přesnosti pohybu, jako jsou měřicí stroje a přístroje.

Pohybové šrouby Kern jsou dostupné v rozměrech od 3,2 mm až do 23 mm se stoupáním 0,3 mm až 92 mm. Většina pohybových šroubů je vyrobena z oceli (UNS S30300).

Minimální požadovaná přesnost šroubu vychází z předchozích požadavků na přesnost tištěného modelu ve svislém směru $\pm 0,1\text{mm}/600$. Přesnost šroubů volím T5 $\pm 0,023\text{mm}$ na délce 300mm. Jedná se o válcovaný šroub. Vyšší přesností se již vyrábějí pouze broušené šrouby a z ekonomického hlediska volíme tento jako dostatečný. To odpovídá přesnosti $\pm 0,053\text{mm}$ na délce 600mm. Přesnost je tedy dostačující.

7.5.1.1 Kritická rychlost (kontrola maximálních otáček)

Pohybové šrouby nesmějí pracovat v oblasti kritických otáček. Kritické otáčky jsou závislé na průměru a délce šroubu a uložení jeho konců. Maximální otáčky by neměly přesáhnout 80% kritických otáček.



Obrázek č. 26: Graf závislosti otáček/ min na délce šroubu [kern.com]

Požadavky na rychlost jsou zanedbatelné. Šroub se bude pohybovat téměř nulovou rychlostí.

Požadujeme však co nejmenší stoupání tak abychom dosáhli co nejmenšího posunutí na jeden krok motoru. Minimální požadavek na přesnost polohování v ose z stanovený v kriteriích pro konstrukci naší tiskárny je 0,05mm a lepší. Volím šroub o průměru 13mm se stoupáním 1,27mm.

Pokud budeme uvažovat krokový motor s přesností 200 kroků na 1 otáčku. Dosáhneme zdvih matice na 1krok až $1,27/200 = 0,006\text{mm}$. Kriterium na stoupání vyhovuje. Požadované maximální zatížení matice je 25Kg. Tomu odpovídá matice VHD s nosností 68kg.

Bezpečnost $68/25 = 2,75 \rightarrow$ vyhovuje.

Kontrola samovolného spouštění (spadávání) vlivem zatížení

Výrobce udává, že k samovolného spadávání matice nedojde, pokud je průměr závitu $\frac{1}{4}$ krát menší, než průměr závitu.

$$\frac{1}{4} \cdot d > P$$

$$\frac{1}{4} \cdot 13 > 1,27$$

$3,25 > 1,27 \rightarrow$ Podmínka je splněna. K samovolnému spadávání nedojde.

P- stoupání šroubu

d- průměr šroubu

Potřebný kroučící moment na motoru:

$$M_m = \frac{F \cdot P}{2\pi \cdot \eta} = \frac{680 \cdot 0,00127}{2\pi \cdot 0,29} = 0,47 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (61)$$

F-axiální síla (uvažujeme max. zátěž 68Kg) F= 680N=

P- stoupání závitu

η - účinnost šroubu a matice → odečteno z katalogu 29%

Tomu odpovídá krokový motor NEMA17 s maximálním kroučícím momentem 0,5N.m,

který je dle předchozího výpočtu dostatečně dimenzovaný.

7.5.1.2 Rychlost posuvu

Použité matice poskytují dlouhou životnost opotřebení v široké škále podmínek. Nicméně, velmi vysoké zatížení anebo hodnota zrychlení má vliv na opotřebení matice. Je třeba se řídit následujícími pokyny pro nepřetržitý provoz rychlostí lineárních posuvů. Pro dosažení optimální životnosti.

Deformace v tahu v případě nepředepnutého šroubu

$$y_t = \frac{F_{ax} \cdot L_t}{E \times S_j} = \frac{285 \cdot 0,7}{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,0098} = 9,6 \cdot 10^{-5} \text{ mm} \quad (61)$$

F_{ax} – zatížení od pohyblivého stolu, břemene, vozíků a matice sil působících na šroub dynamické vlivem pomalého pohybu zanedbáváme.

L_t =délka šroubu namáhaného na tah

S_j = jmenovitý průměr šroubu

Deformaci vlivem natažení šroubu lze zanedbat.

Deformace v krutu přepočtená do axiálního směru:

$$y_k = \frac{M_t \times L_k}{G \times J_k} \cdot \frac{P_h}{2 \times \pi} = \frac{0,5 \times 0,75}{8,1 \times 10^{10} \times 9 \times 10^{-10}} \times \frac{1,27}{2 \times \pi} = 0,001 \text{ mm} \quad (61)$$

Hodnotu deformace v axiálním směru vlivem zkrutu lze také zanedbat.

Polární moment průřezu pro kruh:

$$J_k = \frac{\pi \times D^4}{32} = \frac{\pi \times 0,0098^4}{32} = 9 \times 10^{-10} [\text{m}^4] \quad (62)$$

M_t - kroučící moment krokového motoru

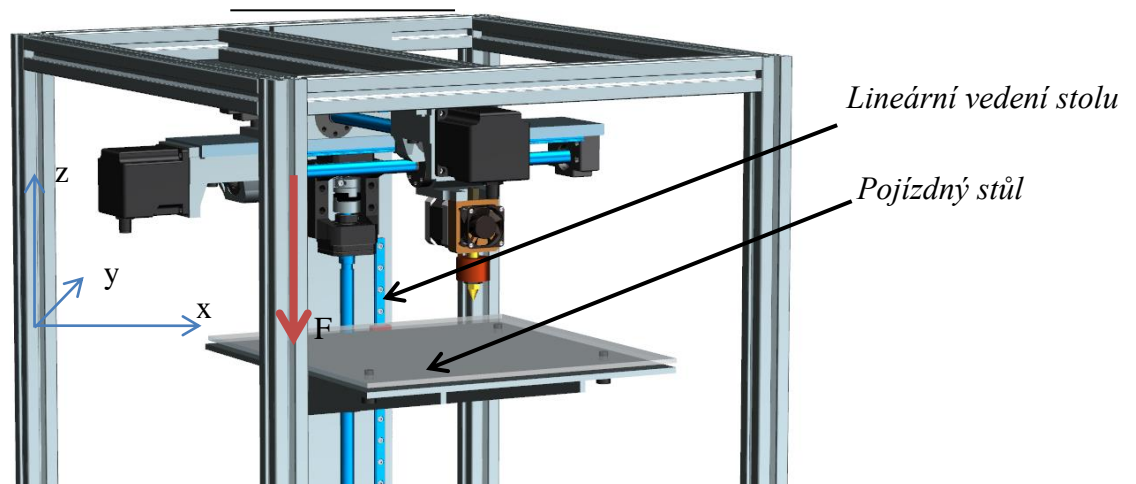
J_k - polární moment průřez pro krut

L_k - délka šroubu

P_h - stoupání závitu

D – průměr jádra šroubu

7.3.3 Návrh lineárního vedení pro jednotku v ose Z (vedení stolu)



Obrázek č. 27: Návrh lineární jednotky- osa z

Síly působící na lineární vedení

Stůl se pohybuje ve vertikální ose velice pomalu řádově v setinách mm, proto zanedbáváme vliv setrvačných účinků.

$$m_1 = 3,5 \text{ kg}$$

m_1 - hmotnost stolu a jeho příslušenství

$$W = m_1 \times g = 35N \quad (63)$$

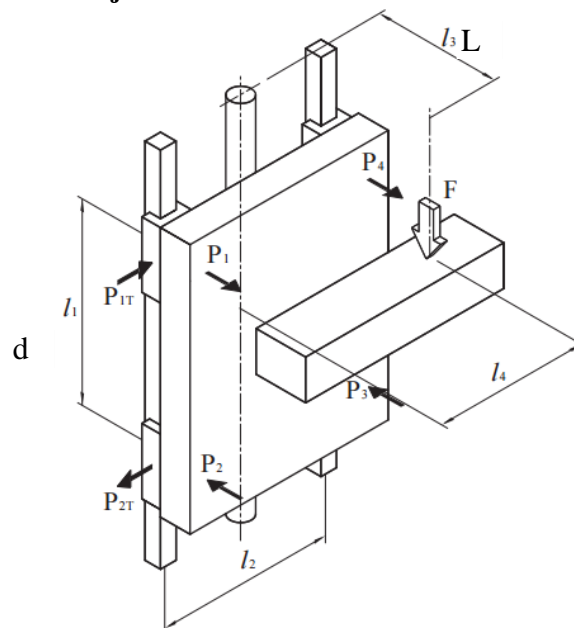
W-hmotnost stolu v [N]

$$m_2 = 25 \text{ kg}$$

m_2 - maximální uvažované zatížení stolu (finální tištěný model z plastu ABS nebo PLA)

$$F = m_2 \times g = 250N \quad (64)$$

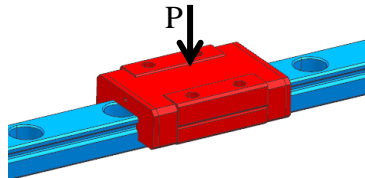
Výpočet zatížení působící na jeden lineární vozík:



Obrázek č. 28: Výpočet zatížení lineárního vozíku⁸

$$F = m_1 \cdot g + m_2 \cdot g = 4,6 \cdot 10 + 25 \cdot 10 = 306N$$

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = \frac{F \times L}{2 \times d} = \frac{35 \times 0,12}{2 \times 0,09} + \frac{306 \times 0,13}{2 \times 0,09} = 203,8N \quad (65)$$



Obrázek č. 29: Lineární vozík

H - vzdálenost těžiště stolu od lineárního vozíku

L - vzdálenost působíště síly F od lineárních vozíků

F - síla od hmotnosti stolu 4,6 kg + maximální hmotnost tištěného modelu (uvažujeme 25 kg)

g - gravitační zrychlení

Výběr vozíku:

Z důvodů požadavku na vysokou tuhost volím lineární vozík od firmy HIWIN **HGL 15 CA** s vysokým předpětím 0,1. C_{dyn}

C_{dyn} – dynamická únosnost (odečtena z katalogu HIWIN) $C_{dyn}=7960N$

Určení deformace:

Pro vozíky 1 a 4 (obrázek č.28)

$$\delta_1 = \frac{P}{K} = \frac{203,8}{290} = 0,7\mu m = +0,0007mm \quad (66)$$

Pro vozíky 2 a 3 (obrázek č.28)

$$\delta_2 = \frac{P}{K} = \frac{203,8}{290} = 0,7\mu m = -0,0007mm \quad (67)$$

p- pracovní zatížení vozík [N]

$\delta_{1,2}$ - hodnota deformace v [μm]

K = tuhost mezi vozíkem a kolejnici při silném předpětí [$N/\mu m$]

pro vozík **HGL 15 CA** s vysokým předpětím 796N odpovídá předpětí $K= 290$ [$N/\mu m$]

⁸ http://www.loziska.com/store/lin_vedeni_pmi.pdf

Výpočet deformace stolu vlivem deformace vozíků ve vzdálenosti 250mm od od vozíků:

$d/2=45\text{mm}$ - Vzdálenost lineárních vozíků

δ_{stolu} –deformace stolu ve vzdálenosti 250mm od lineárních vozíků

l - poloha deformace

$$\delta_{\text{stolu}} = \frac{\delta_1}{\frac{d}{2}} \times l = \frac{0,0007}{\frac{90}{2}} \times 250 = 0,005\text{mm} \quad (68)$$

Životnost a únosnost lineárního vedení HGL 15 CA

Výpočty jsou obdobné jako u předchozích variant vedení

Statická únosnost C_0

Pro normální zatížení vol ($f_{SL}=1,25-3$).

V našem případě se bude jednat o normální zatížení $f_{SL}=1,25-3$.

Statický bezpečnostní faktor

$$f_{SL} = \frac{C_0}{P} = \frac{16970}{203,8} = 83,2 \quad (69)$$

f_{SL} = Bezpečnostní faktor statického zatížení (pro normální zatížení bez rázů $\rightarrow f_{SL}=1,25-3$)

C_0 = Statická únosnost [N]

P = Statické ekvivalentní zatížení [N]

Jmenovitá (nominální) životnost L

Kuličkové provedení

$$L = \left(\frac{f_H \times f_T \times C_{dym}}{f_W \times P} \right)^3 \times 50\,000 = \left(\frac{1 \times 1 \times 11380}{1,2 \times 203,8} \right)^3 \times 50\,000 = 5 \cdot 10^9 \text{m} \quad (70)$$

L = Jmenovitá životnost [m]

C_{dyn} = Dynamická únosnost [N]

P = Dynamicky ekvivalentní zatížení [N]

f_H = faktor tvrdosti

f_T = faktor teploty

f_W = faktor zatížení⁹

Faktory ovlivňující životnost:

- **faktor tvrdosti – f_H**

Tvrdoost drah lineárního vedení je 58 HRC. Tomu odpovídá koeficient tvrdosti 1.

- **faktor teploty - f_T**

⁹ Lineární vedení: Zdroj: http://www.hiwin.cz/media/files/01_Linearni_vedeni.pdf

Hodnota teploty se pohybuje pod 100°C. Tomu odpovídá koeficient 1.

➤ **faktor zatížení** – f_w (tabulková hodnota)

Výpočet doby životnosti v hodinách L_h

$$L_h = L \times \frac{50\,000}{v \times 60} = 5 \cdot 10^9 \times \frac{50\,000}{0,001 \times 60} = 0,8 \cdot 10^6 \text{ hodin} \quad (71)$$

v = rychlost [m/min]

Rychlost posuvu v ose z je zanedbatelná proto volím hodnotu 0,001 [m/min]

Třecí odpor

$$F_R = \mu \times F = 0,003 \times 203,8 = 0,6N \quad (72)$$

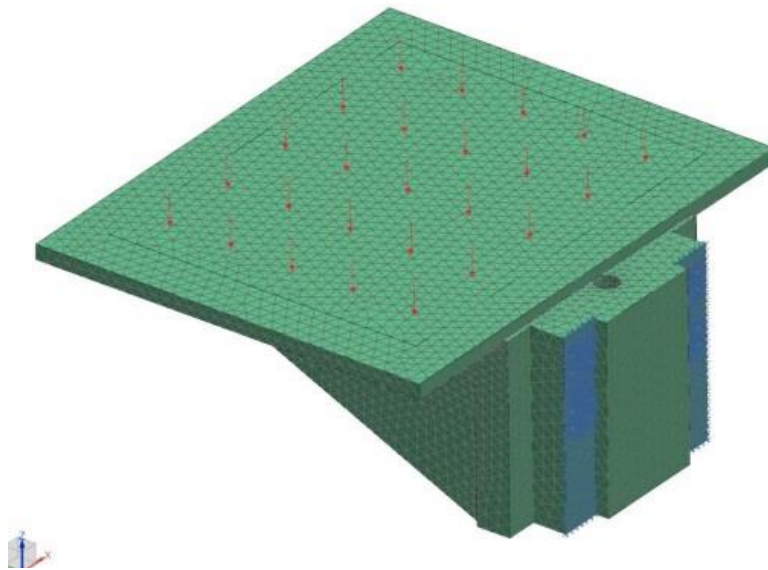
μ = koeficient tření [0,002 – 0,004]

F = zatížení [N]

Výpočet deformace stolu

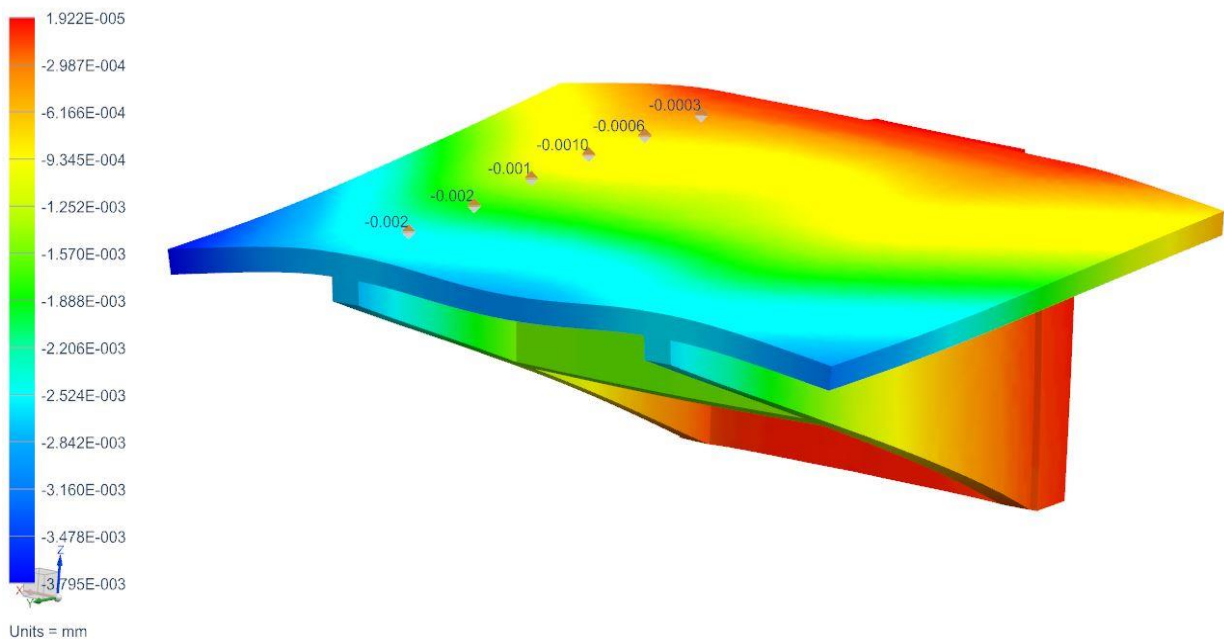
Stůl je vyrobený kombinací hliníkových výpalků o tloušťce 10mm a vozíku pro přišroubování lineárního vedení a matice pohybového šroubu. Hliníkové výpalky a vozík jsou přivařené metodou TIG.

Metodou konečných prvků je proveden výpočet deformace stolu. Uvažujeme plošné zatížení stolu maximální vahou tištěného modelu (250N). Stůl je fixně uchycený v místě lineárních vozíků. Tato úloha je zjednodušena na pouhý výpočet deformace stolu. Výpočet tuhosti lineárního vedení je určeno zvlášť ve vzorci (68).



Obrázek č. 30: Nasíťovaný model stolu s počátečními podmínkami

mkp_sim1 : Solution 1 Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Z
Min : -3.795E-003, Max : 1.922E-005, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek č. 31: Deformace stolu ve svislé ose z od zatížení 250N

Uvažujeme spojitě zatížení stolu tíhou břemene 250N. Takové zatížení pravděpodobně nenastane a odpovídá plnému využití tiskového prostoru. Z MKP výpočtu lze odečíst, že ve vzdálenosti 250 mm od vetknutí odpovídá hodnota průhybu ve směru osy z $\delta_3 = -0,002\text{mm}$.

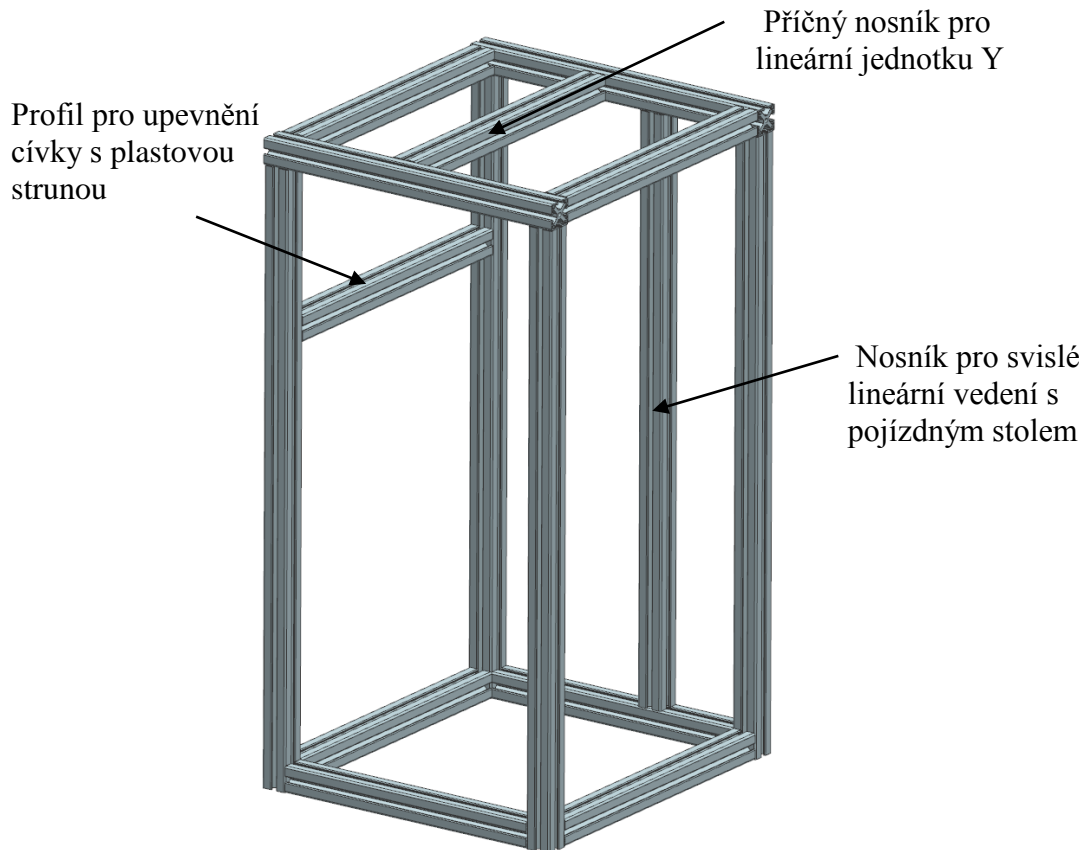
K této hodnotě je nutné přičíst deformaci mezi lineárním vozíkem a lineárním vedením, která odpovídá: $\delta_{\text{stolu}} = 0,005\text{mm}$ (vzorec (68))

Celková deformace stolu ve vzdálenosti 250mm od vetknutí ve svislém směru je potom:

$$\delta_{\text{celk}} = \delta_{\text{stolu}} + \delta_3 = 0,005 + 0,002 = 0,007\text{mm} \quad (73)$$

7.6 Konstrukční návrh rámu

Pro návrh rámu jsme zvolili dostupnou a lehce smontovatelnou konstrukci z hliníkových profilů od společnosti Item. Ta nabízí stavebnicový systém, kde hlavním konstrukčním prvkem je hliníkový profil opatřený drážkami, které umožňují použití spojovacích prvků. Všechny profily jsou navrženy tak, aby dosahovali maximální pevnosti ve vztahu k použitému materiálu.

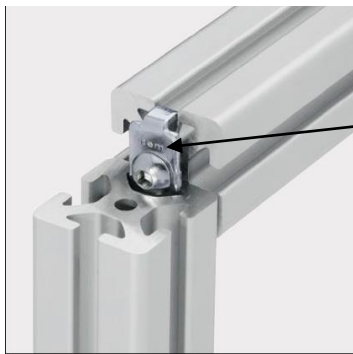


Obrázek č. 32: Navrhovaný rám 3D tiskárny

Pro naši konstrukci volíme standardní profil 40x40 mm se šířkou drážky 8mm. Profil je vyrobený z hliníkové slitiny AL Mg Si 0,5 F25 a jeho mechanické vlastnosti jsou následující:

E- modul pružnosti $E = 70\,000\text{N/mm}^2$
I-kvadratický moment $I_x = I_z = 9\text{cm}^4$
váha profilu- 2,47kg/m

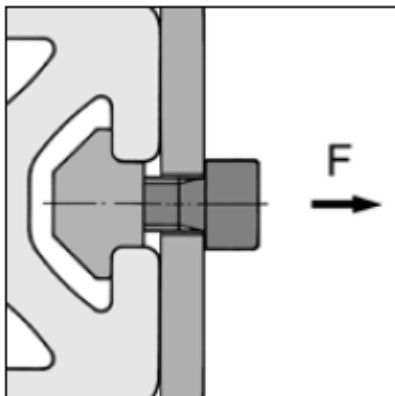
Půdorysné rozměry rámu 550x500mm jsou přizpůsobeny konstrukčním prvkům lineárních jednotek. Ty jsou umístěné na příčném nosníku v horní části rámu. Výška rámu (980mm) je odvozena tak, aby vznikl požadovaný prostor 600mm pro tištěný model mezi tryskou extrudéru a deskou stolu.



Spojka se šroubem
s půlkulatou hlavou
ISO 7380 - M8x20

Obrázek č.33: Spoj standardní spojkou

Spojení profilů je provedeno pomocí standardní spojky. Do dutiny profilu se vyřeže závit M8 do hloubky 16mm. Do druhého profilu se vyvrtá otvor pro šroubovák o průměru 7mm. Následně se profil sesadí a utáhne momentem 25N.m.

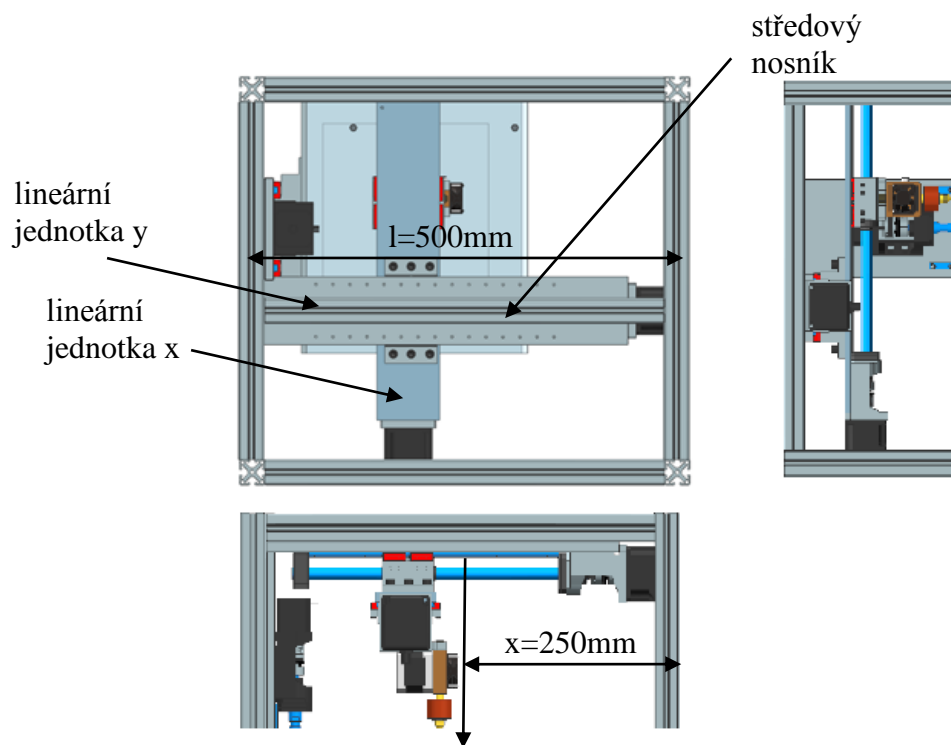


Obrázek č. 34: Řez drážkovou maticí a šroubem

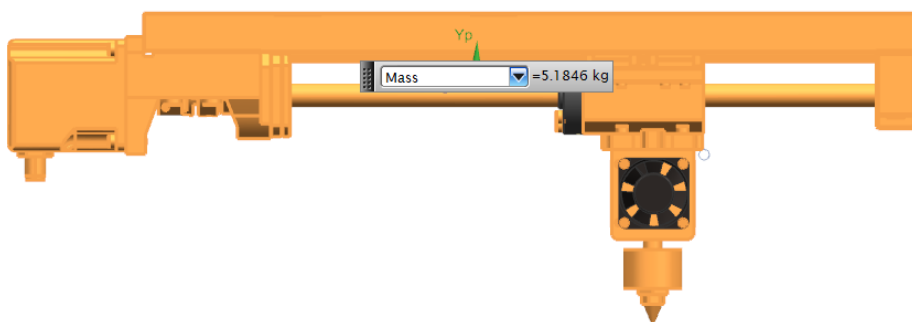
Všechny ostatní spoje jsou provedeny pomocí drážkových matic a šroubů M8. Zaručují dostatečnou pevnost i tuhost propojení. Základní spojení drážkové matice a šroubu M8 má dovolené provozní zatížení $F=4000\text{N}$. Doporučený utahovací moment je 20N.m.

7.6.1 Deformace rámu

V následující části provedeme kontrolu průhybu středového nosníku. Na kterém je přišroubovaná deska s kolejkami lineárního vedení příčné jednotky Y. Ta zároveň nese Lineární jednotku X na které se pohybuje extrúder. Pro výpočet maximálního zatížení, uvažujeme polohu lineární jednotky X uprostřed nosníku. Ve vzdálenosti 250mm od okraje.



Obrázek č. 35: Výpočet průhybu rámu a lineární jednotky x

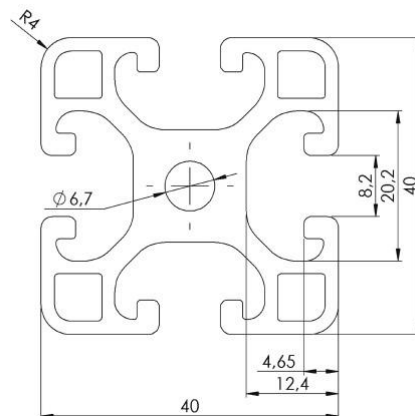


Hmotnost lineární jednotky byla určena pomocí softwaru Siemens NX 9. Kde byly přiřazeny dílům materiálové parametry a následně určena celková hmotnost.

m = hmotnost lineární jednotky
 $m = 5\text{kg} = 50\text{N}$

Pro výpočet průhybu rámu (středového nosníku, na kterém jezdí lineární jednotka) předpokládáme maximální průhyb uprostřed ($x=250\text{mm}$).

Na následujícím obrázku je znázorněn průřez hliníkového profilu 40x40mm, který využíváme pro stavbu rámu. Pro výpočet průhybu budeme potřebovat kvadratický moment, který je uveden v katalogu Item a jeho hodnota je $I_x = I_z = 9\text{cm}^4$.

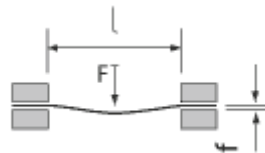


Obrázek č. 36: Průřez hliníkového profilu 40x40mm - Item

Následující zjednodušený vztah pro výpočet průhybu je převzat z katalogu Item a je určen pro výpočet oboustranně vetknutého nosníku se zatížením osamělou silou uprostřed. Průhyb vlastní vahou neuvažujeme.

Oboustranně vetknutý nosník:

$$f_x = \frac{F \cdot l^3}{192 \cdot E \cdot I \cdot 10^4} = \frac{50 \cdot 500^3}{192 \cdot 70\,000 \cdot 9 \cdot 10^4} = 0,005\text{mm} \quad (75)$$



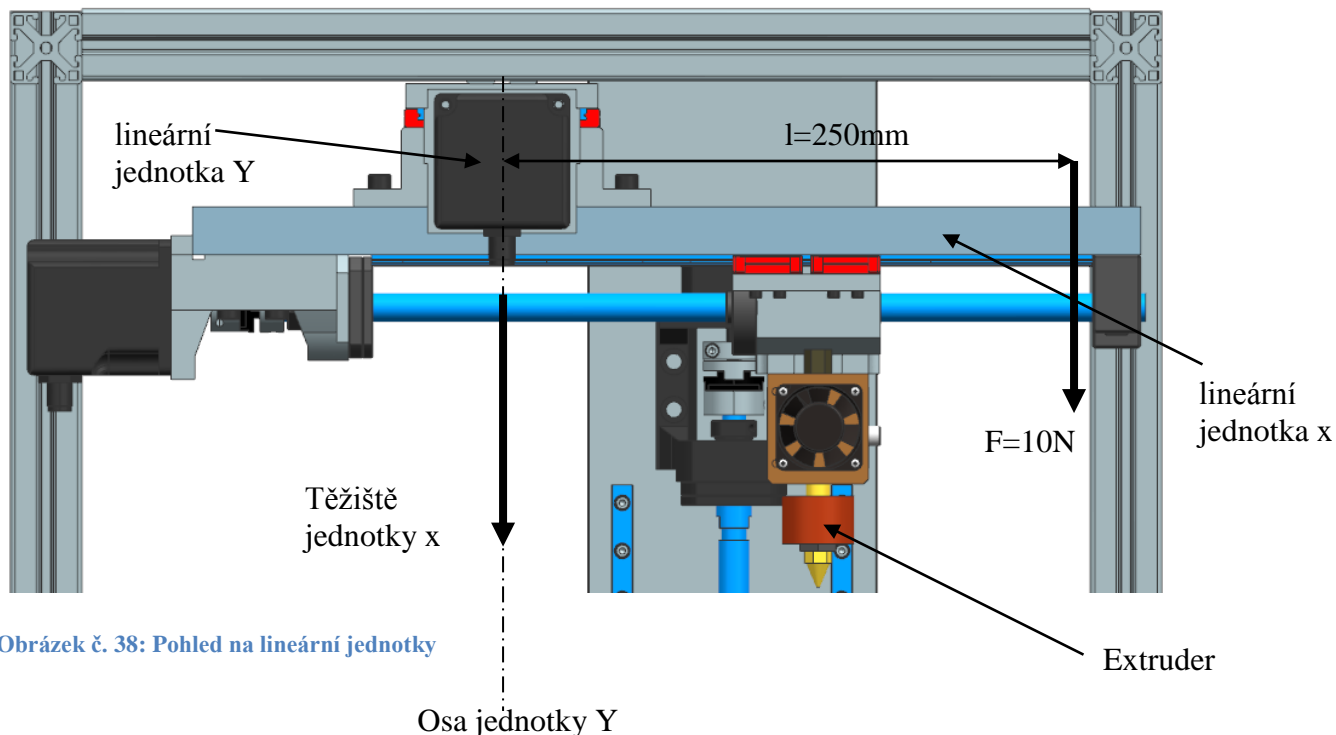
Obrázek č. 37: Oboustranně vetknutý nosník - Item

f_x - maximální průhyb jednotky X
F-zatěžující síla [N]
E- modul pružnosti Al $E= 70\,000[\text{N}/\text{mm}^2]$
l-délka profilu v [mm]
I-kvadratický moment $I_x = I_z = 9[\text{cm}^4]$
váha profilu 2,47 [kg/m]

Výsledná hodnota průhybu je vyhovující.

7.6.2 Výpočet průhybu jednotky x

Nyní se podíváme na průhyb lineární jednotky X.



Obrázek č. 38: Pohled na lineární jednotky

Těžiště jednotky x

Jednotka X je přišroubována k jednotce Y šesti šrouby (M6x25), které zaručují dostatečnou tuhost a není nutné je kontrolovat. Pomocí softwaru NX9 bylo určeno těžiště celé jednotky x, kdy extrudér je ve středové poloze pojezdové dráhy a těžiště jednotky X bylo posunuto do osy jednotky Y. Tím je zajištěna rovnoměrná setrvačná síla jednotky X, která působí na vedení jednotky Y při náhlém zrychlení nebo zpomalení.

Výpočet průhybu lineární jednotky X:

Maximální průhyb jednotky uvažujeme v krajní poloze extrudéru.

$$f_y = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I_z \cdot 10^4} = \frac{10 \cdot 250^3}{3 \cdot 70000 \cdot 96354,1 \cdot 10^4} = 0,007 \text{ mm} \quad (76)$$

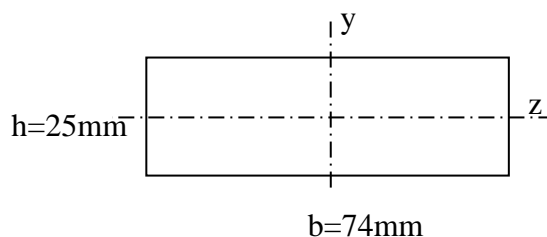
f_y - maximální průhyb jednotky Y

F-zatěžující síla (váha extrudéru $\rightarrow F=10\text{N}$)

E- modul pružnosti pro hliník $E= 70\ 000\text{N/mm}^2$

l- vzdálenost působiště síly od vetknutí [mm]

I-kvadratický moment [mm^4]



$$I_z = \frac{1}{12} b \cdot h^3 = \frac{1}{12} \cdot 74 \cdot 25^3 = 96\ 354,1 \text{ mm}^4 \quad (77)$$

Pokud se podíváme na součet těchto dvou průhybů od lineární jednotky X (vzorec (75)) a lineární jednotky Y (76). Dostaneme následující hodnotu.

$$f_c = f_x + f_y = 0,005 + 0,007 = 0,012mm \quad (78)$$

f_c - celkový průhyb ve svislém směru na špičce trysky extrudéru

Výsledný maximální průhyb se tedy pohybuje okolo 0,01mm. Pokud budeme uvažovat, že maximální tloušťka vrstvy, kterou budeme tisknout je 0,05mm. Je tato hodnota průhybu dostačující a tuhost rámu je také v pořádku.

8 Technicko-ekonomické hodnocení

Vzhledem k tomu, že se jedná o nový prototyp 3D tiskárny, byla zvolena propočtová kalkulace celkových výrobních nákladů produktu. Na základě propočtu by výroba takového prototypu stála 71 385 Kč. Prototyp je určen pro prezentaci na veletrzích a výstavách. Jeho výrobní cena je poměrně vysoká zejména z důvodu, že jednotlivé komponenty byly oceněny v maloobchodních cenách při odběru několika kusů. V případě zájmu potencionálních odběratelů zde vidím prostor pro snížení pořizovací ceny nakupovaných a obráběných dílů v návaznosti na výši poskytnutých množstevních slev. Obvyklý rabat se při odběru většího množství součástí pohybuje v rozmezí od 15 do 30 %. Při uvažování s průměrným rabatem ve výši 20 % by se celkové výrobní náklady na jeden kus produktu snížily na 58 508 Kč.

Při kalkulaci prodejní ceny 3D tiskárny jsem uvažoval s celkovou maximální 20% prodejní marží, kterou je možné rozdělit na základě obchodních dohod mezi výrobcem a distributory. Odhadovaná finální prodejní cena při 20% marži by tak činila 70 210 Kč. Výši marže lze přizpůsobit obchodním podmínkám. Dle mého názoru je tato prodejní cena konkurenceschopná. Obdobná 3D tiskárna Big Bulder od výrobce Bulder se srovnatelnými parametry se prodává za 80 828 Kč.

Kalkulace celkových výrobních nákladů a možné prodejní ceny je rozvedena v tabulkách a textu níže.

Kalkulace celkových výrobních nákladů na produkt

Název	popis	množství	cena/jednotka [Kč]	celkem [Kč]
Nakupované díly		ks		52 885,00
Elektronika Reprap	1 x Základní deska Arduino Mega 2560 control board 1 x kompletně osazený RAMPS 1.4 3 x A4988 driver krokových motorů s 5 x chladiči 3 x optický endstop s propojovacími kabely 1 x Samrt LCD 12864 se čtečkou SD (obsahuje propojovací adaptér a 2ks 20cm kabel mezi LCDxRAMPS) 1 x USB kabel na propojení do PC/Mac.	1	2 495,00	2 495,00
Extruder	tisková hlava	1	1 200,00	1 200,00
Oldham spojka 6-8	spojka motor 6/8	3	480,00	1 440,00
AP+A K12x5x300	kuličkový šroub	2	1 500,00	3 000,00
AP-AP+AK12x5 300	Předepnutá dvojice matic	2	4 220,00	8 440,00
VHS13S	Pohybový šroub s teflonovou úpravou	1	1 800,00	1 800,00
VHS13M	pohybová matice	1	2 500,00	2 500,00
FK10	Ložisková jednotka	3	990,00	2 970,00
BF10	Ložisková jednotka	3	590,00	1 770,00
HGR15	lineární vedení 850mm	2	4 000,00	8 000,00
MGNR9	lineární vedení 300mm	4	1 100,00	4 400,00
HGL15CA	lineární vozíky	4	950,00	3 800,00
MGN9C	lineární vozíky	8	790,00	6 320,00
Spojovací materiál	spojovací materiál Item, matice, šrouby,	1	700,00	700,00
Plech	Al lak 0,6 x 1000 x 2000 mm - RAL 7016	1	500,00	500,00
Hliníkové profily	Item 40x40 -1m	10	250,00	2 500,00
krokový motor Nema 17	krouťící moment 0,5Nm	3	350,00	1 050,00
Obráběné díly		ks		11 500,00
Deska_AL-359x74x20	deska lineárních jednotek x a y	2	1 500,00	3 000,00
Lineární vozík x	Materiál -AL	1	1 500,00	1 500,00
Lineární vozík y	Materiál -AL	1	1 500,00	1 500,00
Stul	svařenec -AL	1	3 000,00	3 000,00
Deska 900x150x10	deska stolu a lineárního vedení	1	2 500,00	2 500,00
Práce		hod		7 000,00
Montáž	sestavení jednotlivých dílů	20	200,00	4 000,00
Oživení stroje	kalibrace, instalace	10	300,00	3 000,00
Celkem	celkové výrobní náklady na produkt			71 385,00

Celkové výrobní náklady se skládají z vlastních nákladů na produkt (nakupované komponenty a práce). Správní a odbytová režie jsou v tuto chvíli neznámé. V tabulce výše je vyčíslena cena nakupovaných komponent, u kterých byla pořizovací cena zjištěna v online e-shopech. Cena obráběných komponent vyrobených na zakázku byla konzultována s firmou Kovo Tomandl CNC s.r.o. Při kalkulaci vlastní práce na montáži a instalaci tiskárny bylo uvažováno se smluvními cenami za práci studentů elektrotechnické fakulty. V kalkulaci jsou uvedeny ceny včetně daně z přidané hodnoty.

Kalkulace prodejní ceny produktu

Název	Nákupní cena před množstevní slevou	Sleva	Nákupní cena po slevě
Nakupované díly	52 885,00	20%	42 308,00
Obráběné díly	11 500,00	20%	9 200,00
Práce	7 000,00	-	7 000,00
Celkem	celkové výrobní náklady na produkt		58 508,00
	Odhadovaná marže	20%	11 701,60
	Prodejní cena		70 209,60

Při kalkulaci prodejní ceny bylo abstrahováno od DPH, ale v případě, že by se 3D tiskárna začala prodávat a výrobce by se stal plátcem DPH, bylo by možné uplatnit nárok na odpočet DPH u pořizovaných komponent. Výsledný dopad na prodejní cenu včetně DPH by tak byl minimální.

9 Závěr

Již z úvodu práce byl jasným cílem návrh 3D tiskárny za účelem vylepšení stávajících parametrů konkurenčních tiskáren a pokud možno snížit její cenu. Návrh této tiskárny je atypický v tom, že využívá k pohonu stolu i extruderu (tiskové hlavy) pouze pohybových šroubů. Konkurenční tiskárny používají nejčastěji kombinaci pohybového šroubu ve svislé ose z, ale pro polohování extruderu ve vodorovných osách používají ozubené řemeny, které mají podstatně menší tuhost a přesnost polohování oproti předepnutým kuličkovým šroubům, které jsme pro pohon tiskové hlavy použili. Dá se také předpokládat, že v průběhu několikahodinového tisku nebo dokonce několikadenního, může docházet vlivem opotřebení a prodloužení ozubeného řemenu ke vzniku chyby přesnosti. U Kuličkového šroubu tento problém odpadá a z hlediska životnosti ozubený řemen několikanásobně převyšuje.

Zvolená varianta, kdy se stůl s tištěným modelem pohybuje ve svislém směru má nesčetně výhod. Tisková hlava, která se pohybuje ve vodorovných osách, má stále konstantní váhu a působí na ni stejné setrvačné účinky v průběhu celé doby tisku. V porovnání s tiskárnou, kde jeden z pohybů ve vodorovné ose koná stůl. U této varianty v průběhu tisku dochází k nárůstu zatížení stolu vlivem hmotnosti narůstajícího modelu a tím se mění setrvačné účinky působící na pohonný mechanismus. To může mít za následek nepřesný tisk. V našem případě se stůl s narůstajícím modelem pohybuje velice pomalu několik 0,01mm za minutu. Nevznikají tak žádné setrvačné účinky na tištěný model a máme jistotu, že nedojde k odtržení a znehodnocení celého modelu z vyhřívané desky stolu. Pohybový šroub pohánějící stůl ve svislém směru je uložený v radiálně axiálním ložiskovém domku v horní části rámu a s krokovým motorem je propojený napřímo. Tím je eliminována vůle v převodech. Šroub je tak namáhán pouze na tah a vzpěr můžeme zanedbat. U stolu byla provedena kontrola průhybu pomocí MKP výpočtu a určena jeho maximální deformace. Celková deformace stolu a lineárního vedení při uvažovaném maximálním zatížení stolu 250N potom odpovídá $\delta_{celk} = 0,007\text{mm}$. Současně jsme provedli kontrolu deformace Tiskové hlavy a v krajních polohách je její hodnota deformace $f_c = 0,012\text{mm}$. Co se týká přesností pohybu ve vodorovném směru. Předepnuté matice nám zaručuje vysokou tuhost a nepřesnost pohybu je dána pouze přesností šroubu. U lineárních jednotek v osách x a y jsou použity totožné válcované šrouby s přesností IT5 (+-0,023/300 mm) Můžeme tedy říci, že přesnost tištěného modelu o rozměrech 200x200mm se pohybuje maximálně +-0,015/200mm. V ose Z je šroub s totožnou přesností IT5 a jeho hodnota odpovídá +-0,053mm na délce 600mm. V následující tabulce jsou znázorněny požadavky na navrhovanou tiskárnu a porovnání s dosaženými:

Požadavek	Požadované hodnoty	Dosažené hodnoty hodnoty	splněno
Konstrukce			
Rozměry stroje	d,v,š 1000x500x500 [mm]	d,v,š 980x550x500 [mm]	překročeno
Rozměry prostoru pro tisk	200x200x600[mm]	200x200x600 [mm]	splněno
Přesnost polohování v ose z	0,05[mm] a lepší	0,006[mm] bez mikrokrokování	splněno
Přesnost polohování v ose x,y	0,01[mm] a lepší (mikrokrok 32x)	0,00078125[mm] (mikrokrok 32x)	splněno
Minimální přesnost tištěných modelů ve svislé ose z	0,1[mm]/600[mm]	0,053[mm]/600[mm]	splněno
Rychlost tisku	60[mm/s]	60[mm/s] -maximální rychlost 150[mm/s]	splněno
Minimální přesnost tištěných modelů ve vodorovné ose x, y	0,05[mm]/200[mm]	0,015[mm]/200[mm]	splněno
Hlavní rám	Hliníkové profily	Hliníkové profily a hliníkové desky	splněno
Technologie výroby	svařování/ šroubový spoj	svařování/ šroubový spoj	splněno
Hmotnost	maximálně 50 [Kg]	maximálně 55 [Kg]	překročeno
Ekonomické hledisko			
Cena výrobku	maximálně 80 000[Kč]	maximálně 70 200[Kč]	splněno
Konkurenceschopnost	Přednosti oproti konkurenci	použití kuličkových předepnutých matic	splněno

Jak můžeme vidět, až na požadovanou hmotnost tiskárny a vnější rozměrový parametr 3D tiskárna vyhověla ve všech stanovených parametrech a dokázali jsme podstatně zvýšit přesnost. Myslím, že tiskárna by byla konkurenceschopná.

Závěrem bych chtěl říci, že na výslednou přesnost modelu má vliv řada faktorů. Jako je teplota okolního prostředí, teplota vyhřívání desky, velikost použité trysky extruderu, teplota tavení plastu. Všechny tyto parametry a další ovlivňují výsledný tvar přesnost a dosažený povrch modelu. Jediná možnost jak ověřit výslednou přesnost a kvalitu tisku je experimentální cestou. Dále pak probíhá seřízení stroje a kalibrace tisku a až následně by byl vidět dosažený výsledek.

Cíle práce byly splněny.

Použité zdroje a software

1. POUŽITÝ SOFTWARE

Microsoft Office 2010

Siemens NX 9

2. KNIŽNÍ PUBLIKACE

- [1] HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. Příručka strojního inženýra – Obecné strojní části II. Vydání první. Praha: Computer Press, 2000. ISBN 80-7226-202-5
- [2] MAREK, J. a kol. Konstrukce CNC obráběcích strojů. Vydání druhé. Praha: MM publishing, s. r. o., 2010. ISBN 978-80-254-7980-3
- [3] LAŠOVÁ, V. Metoda konečných prvků ve výpočtech obráběcích strojů. Vydání první. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. ISBN 978-80-261-0008-9
- [4] SCHMID, D. a kol. Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku. Přeložil HANDLÍŘ, J. Praha: Europa-Sobotáles cz, 2005. ISBN 80-86706-10-9
- [5] STANĚK, J. Základy stavby výrobních strojů: Tvářecí stroje. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004. ISBN 80-7082-738-6
- [6] MARGOLIS, M. Arduino cookbook. Cambridge: O'Reilly Media, 2011

3. PUBLIKACE NA INTERNETU

- [7] HIWIN Motion Control & Systems, *Katalog lineárního vedení*, [online]. Dostupné z: http://www.hiwin.cz/media/files/01_linearni_vedeni_v2.pdf
- [8] Kuličkové šrouby Kuřim, a.s., *Produktový katalog* [online]. Dostupné z: http://www.ks-kurim.cz/fileadmin/user_upload/Ostatni_pdf_soubory/Ke_stazeni/Produktovy_katalog_2012_CZE.pdf
- [9] *CEL robox, Návod tiskárna CEL robox*. [online]. 2015 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.cel-robox.com/wp-content/uploads/RoboxDocuments/Robox%20User%20Manual%20v1.3.pdf>

4. INTERNETOVÉ ZDROJE

<http://robox.cel-uk.com/robox.html>

Seznam příloh volně ložených

Příloha č. 1: Výkresy konstrukce 3D tiskárny