ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a technickým zpracováním polohovacího stolu pro 3D optický profilometr, který má umožňovat posuv ve dvou osách a náklon ložné plochy ve stejných dvou osách. Je zpracována rešerše současných dostupných řešení. Při návrhu je důraz kladen na přesnost nastavení posuvu a náklonu a výškovou kompaktnost konstrukce.

Klíčová slova: polohovací stůl, lineární posuv, naklápěcí plocha, návrh, posuvný stůl, naklápěcí stůl

ABSTRACT

This Bachelor thesis deals with design and technical elaboration of positioning table for a 3D optical profiler, which is supposed to enable linear translation in two axes and tilting in two identical axes. Research of contemporary available solutions is made. Design priorities are precision of translation and tilt adjustment and achieving as low structure as possible.

Keywords: positioning table, linear translation, titling surface, design, translation table, tilting table

Bibliografická citace:
KURUC, M. *Polohovací stůl pro 3D optický profilometr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Šperka.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Šperky s využitím informací a zdrojů, které cituji v seznamu použité literatury.

V Brně dne…… ……

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

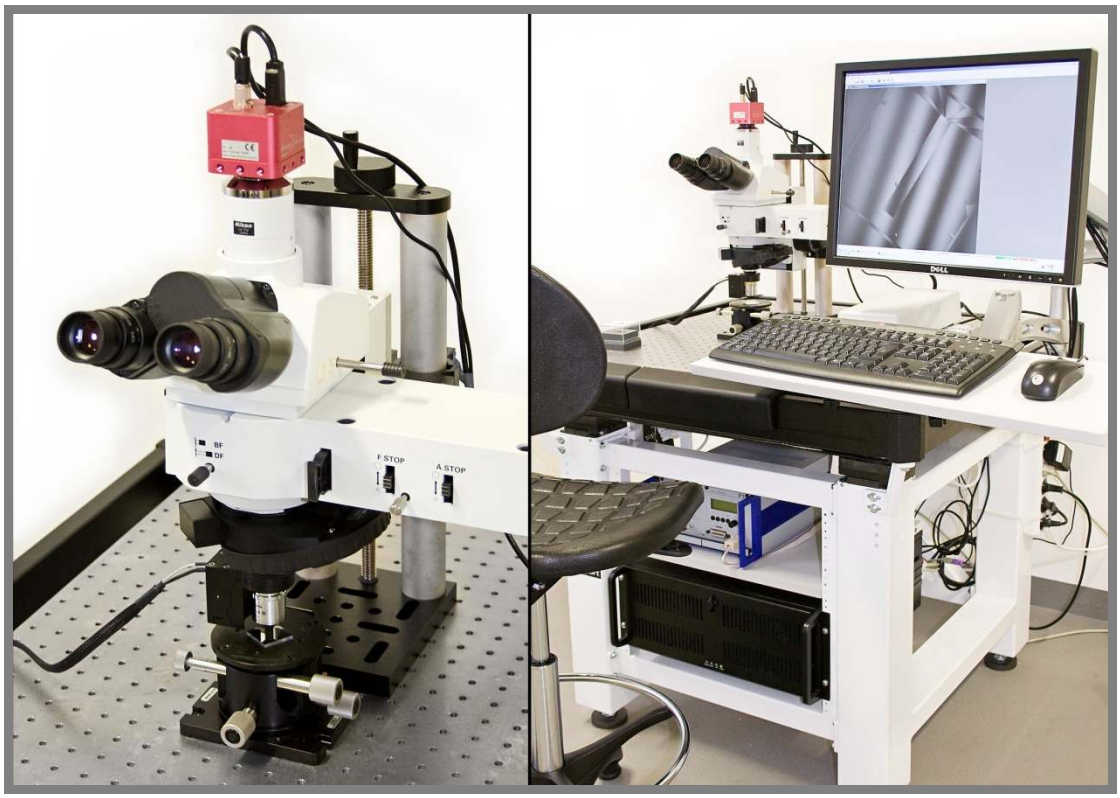
Tímto chci poděkovat vedoucímu práce Ing. Petru Šperkovi za jeho vedení, odborné rady, postřehy a připomínky.

OBSAH

Obsah **9**
Úvod **10**
1 Přehled současného stavu poznání **12**
1.1 Manuální nastavování 12
1.1.1 Posuvné stolky 12
1.1.2 Výklopné plošiny 13
1.2 Motorické nastavování 15
2 Formulace řešeného problému a jeho technická a vývojová analýza **17**
3 Vymezení cílů práce **18**
4 Návrh metodického přístupu k řešení **19**
5 Návrh variant řešení a výběr optimální varianty **20**
5.1 Posuv 20
5.1.1 Vedení 20
5.1.2 Nastavení polohy 21
5.2 Naklápění 21
5.2.1 Čepy 21
5.2.2 Planžety 21
5.2.3 Dvouosé naklápění na kuličce 22
5.2.4 Nastavení úhlu 22
5.3 Ekonomická analýza 23
5.4 Volba varianty 23
6 Konstrukční řešení **25**
6.1 Umístění 25
6.2 Konstrukce 25
6.3 Nastavení posuvu 28
6.4 Nastavení úhlu náklonu 28
6.4.1 Výpočet pružiny náklonu 30
6.4.2 Výpočet citlivosti náklonu 31
6.4.3 Výpočet stavěcích šroubů 32
6.5 Celkové rozměry, hmotnost 33
6.6 Technologie 33
7 Závěr **34**
8 Seznam použitých zdrojů **35**
9 Seznam obrázků a grafů **36**
10 Seznam tabulek **37**
11 Seznam příloh **38**

ÚVOD

Předmětem této práce je konstrukce polohovacího stolu pro 3D optický profilometr (obr. 1), což je zařízení pro měření topografie povrchu s vertikální rozlišitelností v desetinách nm a dynamickým rozsahem do desítek mikrometrů v závislosti na použité měřicí technice. Příčná rozlišitelnost se pohybuje řádově v desetinách mikrometru a zorné pole jednoho měření v jednotkách mm. Zařízení může pracovat ve dvou režimech a podle toho upřednostňovat vyšší rozlišení, nebo vyšší dynamický rozsah.
Základem zařízení je optická soustava založená na průmyslovém mikroskopu Nikon s episkopickým chodem paprsků (tj. pozorování pomocí dopadajícího světla). Mikroskop je vybaven interferenčním objektivem s připojenou piezoelektrickou jednotkou pro jemné posouvání objektivu. Jako zdroj bílého světla se využívá halogenová lampa a v případě monochromatického měření je paprsek filtrován úzkopásmovým filtrem. Interferogramy mohou být snímány monochromatickou CMOS, nebo tříčipovou CCD kamerou. Jako stabilní podklad pro zařízení slouží vzduchem tlumený optický stůl, který redukuje přenos vibrací z okolí. Mikroskop je připevněn k vertikálnímu polohovacímu stojanu a poskytuje zařízení možnost měřit součásti rozličných velikostí (výška v rozsahu 0-250 mm).



Obr. 1 Optický profilometr

V současné konfiguraci se k ustavení vzorku využívá malého naklápěcího stolu Newport, který nevyhovuje především svou malou nosností, malou nosnou plochou, možností ovládat pouze náklon a velkou výškou samotného stolu, která omezuje pracovní rozsah zařízení.

Pro nové zařízení by bylo praktické navrhnout zařízení, které by umožňovalo následující polohování:

1. Naklápění ve dvou osách umožní vyrovnání měřeného povrchu do roviny rovnoběžné s předmětovou rovinou optické soustavy, tím se omezí efekt zastínění topografie a využije se maximální dynamický rozsah metody.
2. Posuv ve dvou osách totožných s osami naklopení, citlivé polohování a zároveň umožňující napojení více měření, tedy rozšíření zorného pole mikroskopu při zachování daného rozlišení a bez nutnosti pořizovat další interferenční objektiv.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

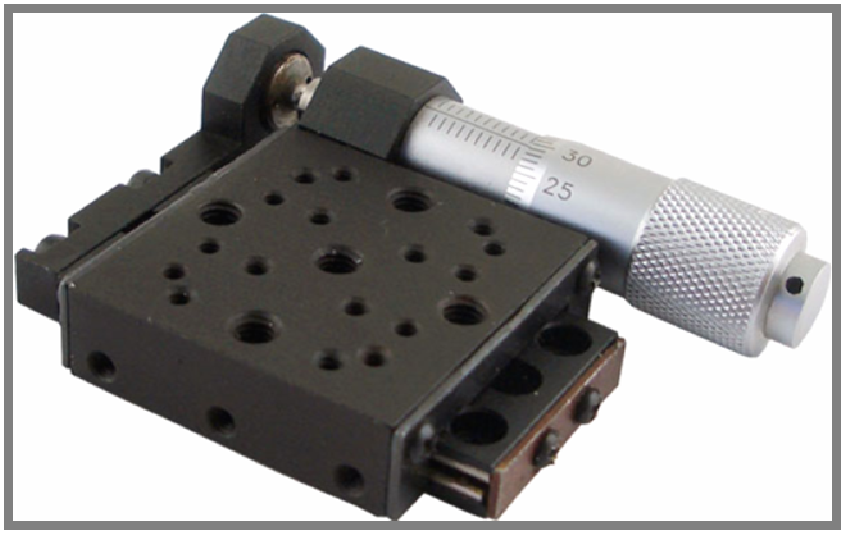
Na trhu se vyskytuje celá řada komerčních produktů, které plní funkci posuvných, výkyvných a rotačních laboratorních konstrukcí od různých firem. Jsou k dostání výrobky v různých velikostech. Dále se vykytují ve všemožných kombinacích jednotlivých funkcí, které v sobě integrují, např. rotace-posuv, posuv-naklápění atd. Prodávají se ve verzích s manuálním nastavením, stejně jako s elektrickým pohonem. Všichni výrobci používají prakticky jen dva materiály, a to buď nerezovou ocel nebo černě anodizovaný hliník. Podobně se napříč firmami používají velmi podobná technická řešení. Část produktů je navržena jako modulární, tzn. tak, aby se na sebe daly skládat podle potřeby. Tím umožňují dosažení požadované konfigurace pro konkrétní použití, tedy počet os posuvu nebo rotace. Za tímto účelem jsou nabízeny různé doplňky a adaptéry, pohyblivé desky jsou vybaveny soustavou montážních děr pro co nejuniverzálnější použití tohoto příslušenství nebo samotného neseného objektu. Tato kapitola se dále zaměřuje na stručný výčet a rozbor vlastností komerčně dostupných řešení v manuální a motorické variantě.

1.1 Manuální nastavování

K obsluze manuálních stolků slouží vestavné mikrometry nebo šrouby. Údaje o hmotnosti, rozměrech a ceně se vztahují k stolkům bez mikrometrů, které se dokupují samostatně.

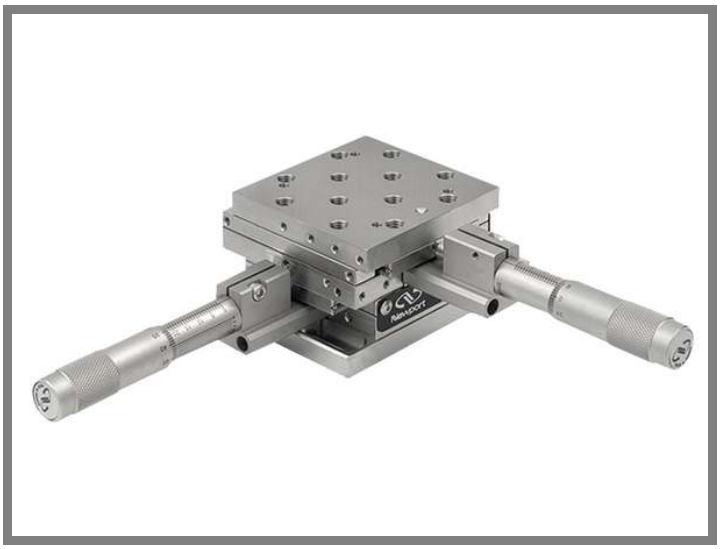
1.1.1 Posuvné stolky

Posuvné stolky se nabízejí buď s posuvem v jedné ose, nebo integrované s posunem ve dvou osách x, y. Jako vodící mechanismus většinou slouží lineární vedení s vodící tyčí nebo kuličky ve vodících klecích. Jednoosé stolky začínají s rozměry plošiny přibližně od 30 x 30 mm (obr. 2). Posuv u nich má rozsah přibližně 13 mm, povolené zatížení 2 kg. Výška funkční plošiny nad montážní rovinou je kolem 10 mm a hmotnost celku vyrobeného z hliníku asi 70 g.



Obr. 2 Jednoosý stolek Focus Optics, rozměr desky 34 x 34 mm

Největší jednoosé stolky mají větší rozměr plošiny kolem 110 mm, přičemž se nabízejí čtvercové i obdélníkové. Rozsah pohybu je kolem 50 mm, povolené zatížení může být až 40 kg. Výška se pohybuje kolem 25 mm a hmotnost kolem 1,1 kg. Ve větších rozměrech se vyskytují i stolky používající rybinové vedení. Ty dosahují většího rozsahu pohybu, až 120 mm, ale za cenu celkových rozměrů. [1-4]
Nabídka dvouosých stolků je podstatně menší. Jejich konstrukce kopíruje jednoosé stolky a v podstatě jen přidává další stejnou vrstvu. Další osa posuvu znamená dvojnásobnou výšku produktu. Běžné rozměry ložné plochy jsou 60 x 60 mm (obr. 3). Posuv se pohybuje kolem 13 mm, nosnost do 10 kg a výška okolo 25 mm. Větší stolky o rozměrech 140 x 140 mm mají nosnost až 45 kg. Existují také výrobky mimo standardizované řady, které se těmto parametrům vymykají a nabízejí mimořádnou velikost, posuv nebo přesnost. [1-3]



Obr. 3 Dvouosý posuvný stolek firmy Newport, rozměr desky 63,5 x 63,5 mm.

1.1.2 Výklopné plošiny

1.1.2

Při řešení výkyvných stolků se téměř výhradně používá výkyvná deska posazená na ocelové kuličce, která tvoří uložení s třemi stupni volnosti (tři rotace). Desky jsou k sobě přitlačovány pružinami. Úhel náklonu se nastavuje nejčastěji pomocí šroubu, kdy jedna deska slouží jako matice a šroub se opírá o druhou desku. Podobně se používají též mikrometrické hlavy. Pro každou osu je potřeba jeden šroub a obvykle i jedna pružina. Kulička je umístěna v rohu, přičemž šroub s ní musí být v jedné ose kolmé na osu rotace. Šroub je umístěn co nejdále, aby nastavení úhlu bylo co nejjemnější [1, 3, 4]. Zároveň je zaručena vysoká stabilita proti převážení desky, tj. zatížení a působiště takové, že kulička ztratí kontakt.
Oddělenou kategorií jsou takzvané goniometry, které na rozdíl od klasických stolků mají střed jejich rotace v bodě nad plochou desky. To umožňuje měnit náklon vzorku, aniž by se měnila pozice místa, na které je zaměřený mikroskop. Goniometry mají větší rozsahy nastavení, od ±10° do ±30°, a jsou vybaveny stupnicí. Využívají rybinové vedení, k ovládání náklonu slouží šnekový převod. Vyrábějí se pouze jednoosé goniometry, ale kombinací dvou kusů s vhodnými parametry lze dosáhnout náklonu ve dvou osách beze změny polohy. [1]

Dalším řešením je deska připevněná k velké kouli. Ta je umístěná v pouzdře vhodného tvaru a v podstatě se jedná o konstrukční variantu kulového kloubu (obr. 4). Koule zajišťuje naklápění a samotné pouzdro se otáčí podél svislé osy. Tyto konstrukce umožňují pouze hrubé nastavení polohy. [3]

Obr. 4 Systém využívající kulový kloub [3]

Ruční výklopné platformy se stejně jako posuvné nabízejí jako jednoosé nebo dvouosé (obr. 5). Většina z nich poskytuje rozsah nastavení ±3° až ±5°. Velikost plošiny se pohybuje od 50 x 50 mm s výškou 22 mm a nosností 0,5 kg. Větší dvouosé platformy o velikosti 75 x 125 mm mají nosnost až 10 kg. Jednoosé výkyvné plošiny bývají obecně větší s vyšší únosností. Největší provedení mají rozměry 120 x 180 mm s výškou 32mm, a nosností až 45 kg.

Obr. 5 Dvouosý výklopný stolek kombinovaný s rotací firmy Newport

1.2 Motorické nastavování

Manuální ovládání posuvu může být nahrazeno elektrickými přímočarými motory (obr. 6). Celý systém se skládá z několika základních částí. První je samotný přímočarý motor. Ten je tvořen nejčastěji krokovým motorem, který je uchycen k nepohyblivé části stolku. Využívá se toho, že krokový motor dokáže přesně nastavit svoji polohu a přes působící síly ji udržet. Rotor krokového motoru je spojen se závitovou tyčí a matice je upevněna k pohyblivé části stolku. Otáčením tyče dochází k posuvu stolu.

Další variantou je posuv založený na kuličkových šroubech. V tomto případě se používá matice s vnitřním oběhem kuliček připevněná k pohyblivé desce. Jejich výhodou je tichý a hladký chod, navíc některé systémy eliminují vůle. Nevýhodou je vyšší cena. [9]

Krokové motory mají běžně 200 kroků na otáčku, ale v případě potřeby mohou mít i dvojnásobek. Při použití závitů s velmi malým stoupáním je umožněno dosáhnout rozlišení polohy (tzn. nejmenší možné velikosti posuvu) v řádu mikrometrů. Opakovatelnost se pohybuje v blízkých hodnotách. [1-4]

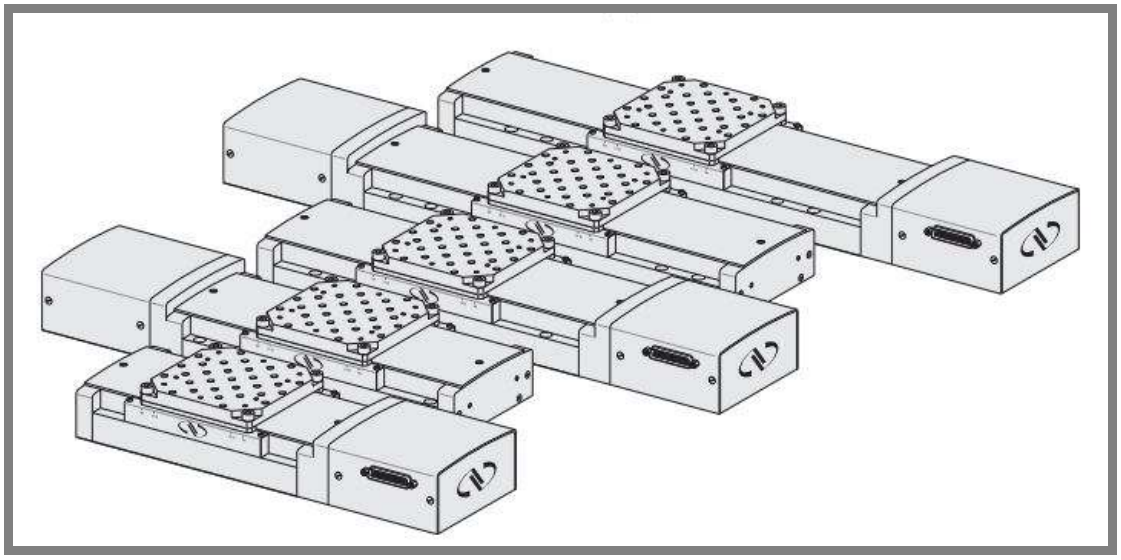
Obr. 6 Dvouosý posuvný motorizovaný stolek firmy Focus Optics, rozměr desky 300 x 300 mm, výška 108 mm

Pro zprovoznění motorického posuvu je nutné zajistit další dvě klíčové funkce; napájení a ovládání. Existují dvě varianty komponent, které plní tyto funkce: driver, nebo kontrolér. Driver je výkonový prvek, který zajišťuje napájení a pro ovládání je potřeba ještě další ovládací člen, například počítač, který vysílá signály. Kontrolér je programovatelný automat, který obsahuje jak výkonovou část, tak ovládací prvky pro řízení motoru a rozhraní pro připojení k počítači. Po naprogramování kontroléru dovede zařízení pracovat bez počítače. [2-4]

Motorické stolky mají kvůli integrované elektronice souhrnně větší rozměry než varianty manuální. Nabízejí se většinou pouze jako jednoosé, ale s možností kombinace více kusů do potřebných konfigurací.

Výrobky se od sebe liší více než u manuálních stolků, a to jak mezi výrobci, tak mezi výrobky jedné firmy. To je samozřejmě způsobeno použitím rozdílných elektronických součástí, ale i konstrukčním přístupem. Výrobci nabízejí odlišné způsoby vedení desek. Vyskytují se zde vodící tyče s lineárními ložisky, lineární vedení s kuličkovými šrouby, pomocí zkřížených válečků ve vodící tyči atd. Některé

stolky ponechávají vedení odhalené, zatímco u jiných jsou skryty a ložné plochy jsou zarovnány se zbytkem konstrukce. Vyrábí se velké množství různých typů, často v normalizovaných řadách, odstupňované podle velikosti pojezdu a desek (obr. 7).



Obr. 7 Příklad modularity výrobků [5]

Velikosti posuvných desek začínají na 25 x 48 mm, přitom mají rozsah posuvu 25 mm a nosnost 5 kg. Rozměry celého stolku jsou 134 x 45 x 20 mm a hmotnost 0,7 kg. Největší varianta má rozměr pohyblivé desky 160x160 mm s délkou pojezdu 500 mm. Jeho celkové rozměry jsou 670 x 160 x 61 mm a nosnost 50 kg při hmotnosti 12 kg.

2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA

Na základě rešerše nabídky komerčních řešení lze učinit závěr, že žádná z nabízených konstrukcí neodpovídá požadavkům zadání. Stolky nabízejí menší rozměry, než jsou požadované, i když mají často dostatečnou únosnost. Většina z nich jsou jednoúčelové a žádný z nich neintegruje požadovanou kombinaci pohybů do jediného zařízení. Tento nedostatek se nemění, ani pokud přihlédneme k modularitě mnohých výrobků. Požadovanou variabilitu lze dosáhnout kombinací několika zařízení, výsledná sestava by však ve výsledku narostla do nepřijatelné výšky a do značné míry by omezovala pracovní prostor mezi vrchní plochou stolu a mikroskopem. Proto neexistuje řešení, které by vyhovělo daným specifickým požadavkům. Je tedy nezbytné navrhnout stolek na míru, při kterém budou použity poznatky získané studiem současných řešení.

3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je konstrukční návrh polohovacího stolu určeného k nastavení polohy měřeného vzorku v 3D optickém profilometru. Má disponovat funkcemi posuvu ve dvou osách x, y a výkyvu jeho nosné desky vůči shodným dvěma osám. Požadovaná nosnost stolu je 15 kg, velikost 300 x 300 mm, rozsah posuvu v řádu desítek milimetrů a rozsah naklápění ±1°. Důležitým požadavkem je celková kompaktnost konstrukce, především její výšky.

4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

Pro řešení daného problému byla zpracována metodika přístupu rozčleněná na tyto dílčí etapy řešení:

- zpracování rešerše způsobů řešení daných strojních součástí, která slouží k získání základní představy o problémech a používaných koncepcích,
- rozbor možných variant řešení zásadních uzlů konstrukce a popis jejich vlastností, výhod a nevýhod,
- tvorba koncepčních variant řešení,
- volba výsledné varianty s ohledem na jejich ekonomické a technické parametry,
- analýza a optimalizace zvolené varianty, ověření nezbytných funkčních členů výpočtem,
- konečné zpracování zvolené varianty do podoby výrobních výkresů s využitím modelování v parametrickém CAD systému

5 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY

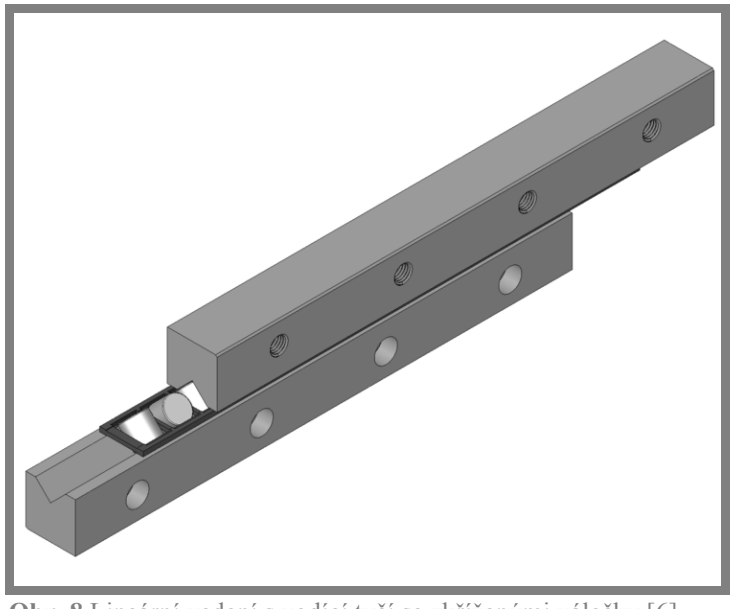
Nabízejí se tři varianty řešení pro posun desek a tři varianty pro naklápění horní desky. Pro posuv ve dvou osách připadá v úvahu jako jediná možnost umístění dvou desek nad sebou. Spodní se pohybuje v jedné ose a na ní je další deska, která se pohybuje ve směru kolmém na první.

5.1 Posuv

Při posunu je potřeba zajistit tři funkce: vedení desek v požadované dráze, přesné nastavení vzájemné polohy desek a zajištění desek v nastavené poloze.

5.1.1 Vedení

Na vedení se klade několik požadavků. Jsou to maximální přesnost a minimální vůle ve vedení, malý odpor vůči posuvu. Výrobci nabízejí široký sortiment řešení, ze kterých se jako nejvhodnější pro naše účely jeví lineární vedení s vodící tyčí. Pracují na principu podobném lineárnímu ložisku. Valivé členy se podle konkrétních potřeb volí kuličky, křížově uložené válečky, jehly atd. Tyto členy pracují mezi dvěma tyčemi, které mají na svém boku drážku ve tvaru V, v níž je umístěna klec, která obsahuje válečky. Ty jsou umístěny střídavě tak, že jejich osy mají mezi sebou úhel 90°. Každý lichý váleček se odvaluje na levé vodící tyči, každý sudý na pravé. (viz obr. 8) Touto kombinací jsou zachyceny síly ve všech směrech. Pohyb je umožněn valením a ne třením, díky tomu klade vedení malý odpor a má vysokou životnost. Výhodou je poměrně jednoduchá konstrukce a montáž a kompaktní rozměry.



Obr. 8 Lineární vedení s vodící tyčí se zkříženými válečky [6]

Další možností je použití lineárních ložisek založených na kruhové tyči. Jejich nevýhody oproti předešlému typu jsou podstatně větší rozměry a nižší tuhost pohybových součástí.
Další varianta je lineární vedení s profilovou tyčí. Skládá se z přesné kalené vodicí tyče se čtyřmi broušenými oběžnými drahami, po kterých se pohybují vozíky s

vnitřním oběhem kuliček. Nabízí vysokou přesnost i tuhost, ale má neodpovídající rozměry.

5.1.2 Nastavení polohy

5.1.2

V zadání je požadováno, aby bylo možné desky posunovat ve dvou osách. Tento posuv je zároveň potřeba velmi přesně nastavit a měřit. Toho lze dosáhnout dvěma základními způsoby, a to mechanicky nebo elektronicky pomocí počítače.

5.1.2.1 Mechanický posuv

Posouvat desky a zároveň tento posuv velmi přesně měřit umožňují vestavné mikrometry. Mikrometr je připevněn k jedné z desek. Při otáčení bubínkem se vysouvá jeho měřící vřeteno a vymezuje vzdálenost od druhé desky. K zajištění desky ve výsledné poloze a vymezení vůlí je vhodné použít tažnou pružinu působící proti vřetenu. Tento pohyb je zároveň měřen na stupnici mikrometru, běžně s přesností 0,01 mm. Montáž na místo je jednoduchá a nenáročná.
Existují také digitální varianty mikrometrů s výstupem dat. Přes příslušné rozhraní jsou data posílána přímo do počítače, takže je možné s polohou pracovat přímo, např. v tabulkovém procesoru. Nevýhodou je vyšší cena řešení a nutnost přídavné elektroniky, především datového rozhraní.

5.1.2.2 Elektronický posuv

Elektronická varianta využívá krokového motoru řízeného počítačem. Tento krokový motor (lineární motor) se pohybuje na jemném závitu (rozlišení je až 0,001 mm na jeden krok motoru). Motor je připevněn k jedné z desek a závitová tyč ke druhé. Při otáčení motoru se mění vzájemná poloha motoru vůči tyči. Toto řešení v sobě spojuje jak samotný posuv tak jeho měření. Vymezení vůle je i tomto případě řešeno pomocí pružiny. Nevýhodou tohoto řešení je nutnost doplnit sestavu o výkonovou, řídící elektroniku a speciální software. Tedy se jedná řešení s vyšší cenou.

5.2 Naklápění

5.2

Požadovaná konstrukce má umožňovat naklápění honí nosné plochy ve dvou osách. Systém naklápění se skládá ze dvou částí; mechanismus umožňující naklápění a nastavování velikosti úhlu. Pro mechanismus naklápění lze použít dři prvky; klouby s využitím čepů, planžety nebo kuličku.

5.2.1 Čepy

5.2.1

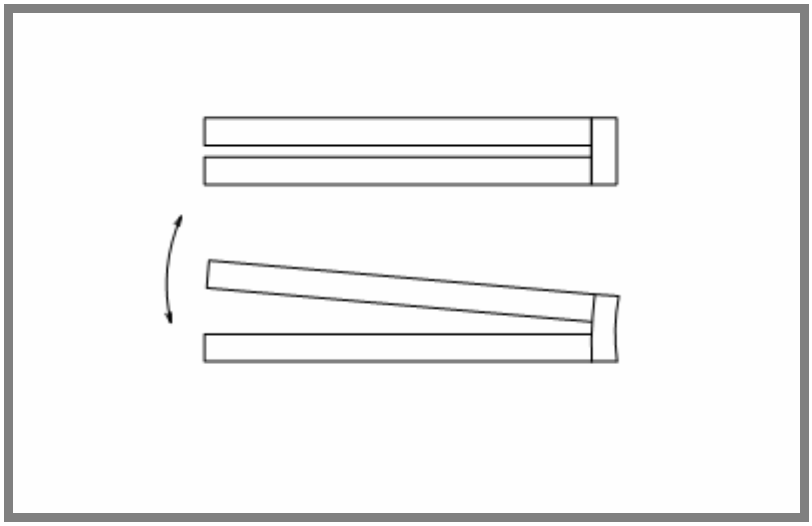
Klasické řešení otočného uložení dvou prvků je pomocí čepů. Obě desky mají otvory v ose otáčení, kterými je veden čep. Je potřeba naklápění ve dvou osách, proto se musí použít dvě desky nad sebou, které mají osu otáčení navzájem otočenou o devadesát stupňů. Všechny funkční prvky desek musí být vyrobeny velmi přesně, ale přesto se nelze po montáži vyhnout vůlím, které je obtížné odstranit. Pro vymezení axiální vůle připadá v úvahu použití pružin. Odstranění radiální vůle je ale příliš složité. Toto řešení je pro náš účel nevhodné.

5.2.2 Planžety

5.2.2

Protože požadovaný rozsah naklápění desek je jenom kolem dvou stupňů, je možné použít planžety. Ty plní funkci kloubů. Planžety jsou v podstatě tenké pružné kovové

pásy. Dvě desky, které se mají otáčet, se spojí pomocí této planžety. Díky její pružnosti je deskám umožněn vzájemný rotační pohyb v ose planžety (obr. 9). Opět je potřeba dvou desek nad sebou, protože planžeta umožňuje pohyb jen v jedné ose. Toto řešení má výhodu v tom, že při instalaci eliminuje všechny vůle a řeší tím zásadní nedostatek uložení v kloubech. Navíc k tomu není potřeba zvýšená přesnost jednotlivých dílů.



Obr. 9 Schéma planžety

5.2.3 Dvouosé naklápění na kuličce

Další možností je umístit jedinou naklápěcí desku na kuličku. Používá se ocelová kulička z ložisek. Pro ni je v obou deskách vytvořen kuželový důlek. Popsané uložení umožňuje otáčení ve dvou osách zároveň (třetí osa otáčení je cíleně odebrána). Díky tomu je potřeba jen jedna naklápěcí deska, což se příznivě projeví na celkové výšce stolu. Aby se desky udržely v trvalém kontaktu s kuličkou, jsou přitlačovány pružinami, které je stahují k sobě. Toto řešení se běžně používá v optice a jeho výhodou je menší výška než u obou předchozích možností a absence vůlí bez jakéhokoliv seřizování nebo přílišné přesnosti s minimem dílů.

5.2.4 Nastavení úhlu

Z důvodu zachování jednoduchosti přichází v úvahu použití nastavovacího šroubu. Jeho otáčením se zasouvá do horní výklopné desky a opírá se o desku pod ním. Toto řešení je jednoduché a spolehlivé. Jiné možnosti zahrnují použití například klínů klouzajících po sobě nebo převod pohybu excentrem nebo vačkou. V těchto případech ale nastává problém se složitostí a následnou úsporností místa. Tyto řešení jsou rozměrnější než pouhý šroub a vznikaly by nežádoucí síly v různých směrech.

Tab. 1 Srovnání konstrukčních prvků manuální a motorizované varianty

Manuální varianta	**Motorizovaná varianta**
Posuv lineárním vedením	Posuv lineárním vedením
Nastavení posuvu mikrometrem	Nastavení posuvu krokovým motorem
Odečet posuvu mikrometrem	Odečet posuvu kontrolérem/PC
Vymezení vůle posuvu pružinou	Vymezení vůle posuvu pružinou
Nastavení úhlu náklonu šroubem	Nastavení úhlu náklonu šroubem

Výhodou motorické varianty je snadné elektronické zpracování dat, jeho nevýhoda spočívá ve vyšší ceně, značně menší mobilitě. Oproti tomu manuální verze je mnohem levnější a mobilnější.

5.3 Ekonomická analýza

5.3

Při srovnání cen obou druhů pohonů se ukazuje zřejmá výhoda manuální varianty.

Manuální varianta

Kolejnice	35 000 Kč
Mikrometry	7 800 Kč
Šrouby	500 Kč
Desky, nastavovací šrouby	20 000 Kč
Celkem	63 300 Kč

Motorická varianta

Kolejnice	35 000 Kč
Šrouby	500 Kč
Desky, nastavovací šrouby	20 000 Kč
Krokové motory	15 000 Kč
Kontrolér	18 000 Kč
Celkem	88 500 Kč

5.4 Volba varianty

5.4

Z několika možných variant je potřeba vybrat tu, která splňuje požadavky zadání při současném zvážení technických a ekonomických aspektů každé z variant. Při volbě jsou porovnány přínosy jednotlivých variant vzhledem k jejich předpokládané ceně.
Po zvážení všech možností byl nakonec zvolen posun pomocí lineárního vedení s vodící tyčí od firmy SKF. Jeho konstrukce je optimální pro podobné aplikace. Toto řešení je prostorově nejúspornější a je velice přesné. Pohyb pomocí valení zaručuje nízký odpor. Vedení prochází celou délkou stolu a tak je rovnoměrně rozloženo zatížení, což slibuje dlouhou životnost. Stejný systém používají podobné stoly v laboratořích Ústavu konstruování, kde se osvědčil.
Pro nastavování polohy byl vybrán vestavný mikrometr firmy Mitutoyo s rozsahem měření 50 mm. [8] K vymezení vůlí a k udržení desek v nastavené poloze bude sloužit tažná pružina.

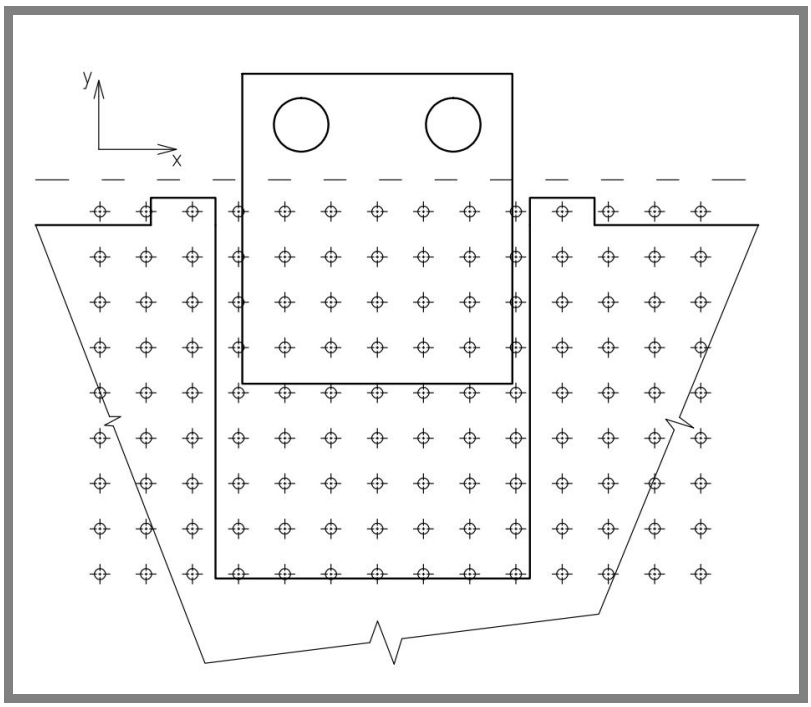
Manuální varianta byla zvolena kvůli výrazně nižší ceně oproti elektromotorům. Zároveň má výsledný celek mnohem větší mobilitu, protože neobsahuje kabely a přídavnou elektroniku.
Jako naklápěcí systém bude použita deska naklápěná ve dvou osách pomocí kuličky. Toto řešení jako jediné vyhovuje požadavkům na přesnost. Navíc je to jediná varianta, kde je potřeba jen jedna výklopná deska, takže celkově je konstrukce stolu nižší.
K nastavení úhlu je použit šroub s jemným závitem. Ve výklopné desce jsou dvě závitové průchozí díry. Každou prochází šroub, který se koncem opírá do spodní desky. Když se šroub otáčí, posunuje se v desce a tím jí naklápí. Každý šroub reguluje jednu osu otáčení. Šrouby mají speciální hlavu zajišťující pohodlné ovládání. Má zvětšený průměr a výšku pro komfortní úchop prsty a je vybavena drážkováním.

6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Hlavními komponenty jsou čtyři nad sebou umístěné desky. V dalším popisu je budeme označovat čísly 1 až 4, přičemž číslo jedna bude úplně spodní deska (viz obr. 11). Všechny desky mají základní čtvercový půdorys o hraně 310 mm a největší tloušťku 9 mm.

6.1 Umístění

Stolek bude umístěn na laboratorním stole, jehož pracovní plošina je vybavena montážními otvory. Jde o závitové díry M6 uspořádané ve čtvercové síti o rozteči 25 mm.



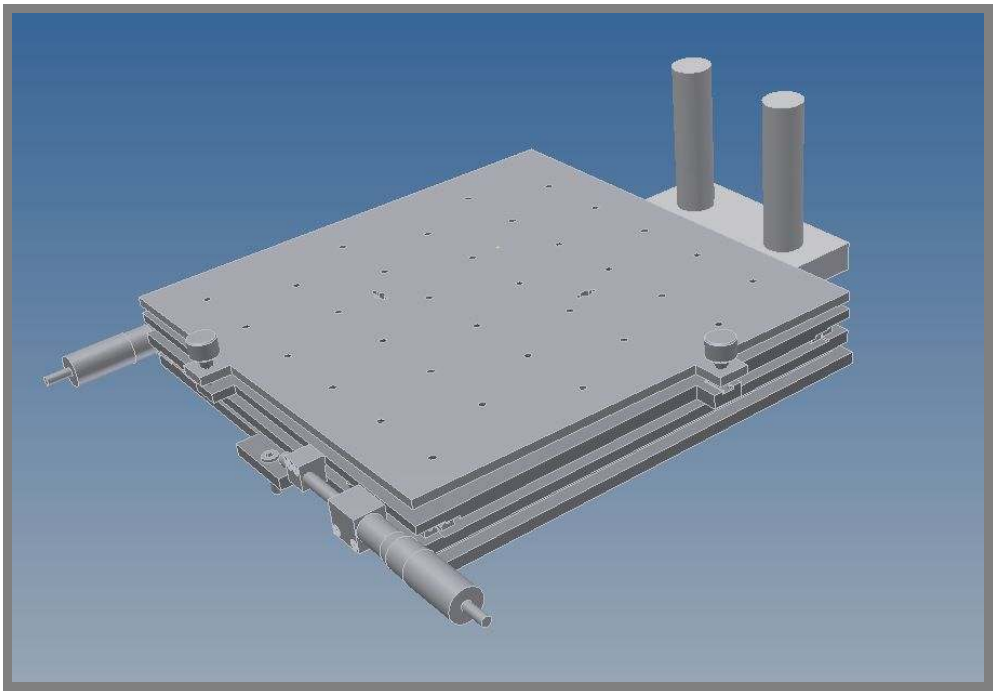
Obr. 10 Umístění stolu vzhledem k pozici podstavce mikroskopu s vyznačenými montážními otvory a nejzazší pozicí desky č. 2

Spolu s polohovacím stolkem bude na stole umístěn i mikroskop. Ten je zavěšen na výškově nastavitelném stojanu, který je ke stolu připevněn podstavcem. Stolek bude umístěn pod tento mikroskop. Proto je nutné spodní desku opatřit vybráním, které poskytuje dostatek místa pro základnu stojanu a zároveň odlehčuje konstrukci při zachování dostatečné pevnosti a tuhosti (obr. 12). Dále byla první osa posuvu orientována tak, aby vedení nekolidovala se základnou a vybrání desky č. 2 poskytovalo dostatek místa pro posuv. Toto řešení podporuje kompaktnost konstrukce. Rozměry podstavce jsou: šířka 146 mm, délka 170 mm, vzdálenost přední hrany od trubek 128 mm a výška 19,5 mm.

6.2 Konstrukce

Zadní strana stolku obsahuje vybrání a je umístěna nad podstavec stojanu. Je tedy špatně přístupná pro obsluhu a neposkytuje žádný prostor pro konstrukční prvky. Proto jsou všechny ovládací prvky umístěny na třech zbývajících stranách. Při

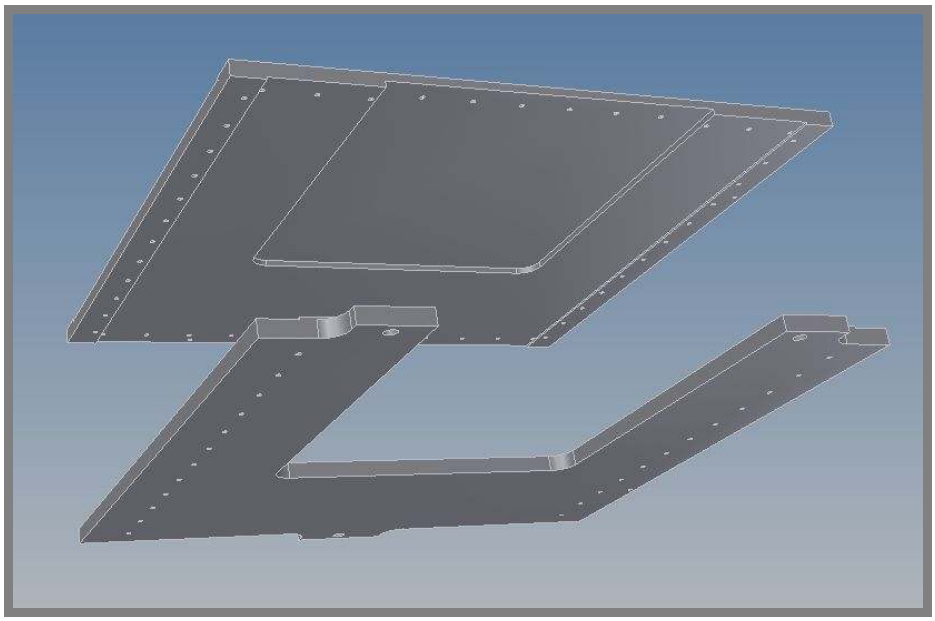
manipulaci se předpokládá, že obsluha bude u přední nebo levé strany stolku. Na těchto místech jsou proto umístěny ovládací mikrometry. Šrouby nastavující náklon desky jsou na přední a pravé straně. Umístění vepředu a vlevo nebylo možné, jelikož potřebný prostor pro výstupky v deskách zabírají opory pro vřeteno mikrometru. Mikrometry vystupují z obrysu stolku, aby byla zaručena dostupnost bubínku pro obsluhu při posuvu desek (obr. 11).



Obr. 11 Celkový pohled na polohovací stůl včetně stojanu mikroskopu v jejich vzájemné poloze

Spodní deska je uchycena ke stolu pomocí tří šroubů M6, jejichž poloha je kompatibilní s otvory na plošině stolu. Za tímto účelem jsou na těle desky tři výstupky, každý s patřičnou průchozí dírou. Přední otvor je umístěn tak, aby k němu při neutrální poloze desek byl volný přístup. Umístění otvorů do výstupků umožňuje velice jednoduchou montáž a demontáž stolku. V zadní části desky je výřez pro podstavec mikroskopu. Jeho rozměry jsou zvoleny s dostatečnou rezervou jak v šířce, tak v délce (obr. 10).
Deska nese soustavu děr pro umístění vodících tyčí, které nesou desku č. 2. Na desce jsou dvě plochy, vyvýšené nad zbytek desky o 1 mm. Toto vyvýšení poskytuje vůli pro párovou vodící tyč. Každá tato plocha nese řadu dvanácti děr M3 pro připevnění kolejnic.
Jsou kladeny zvýšené požadavky na přesnost uložení lineárních vedení. Pro správnou funkci je třeba, aby byly nosné plochy rovné a navzájem rovnoběžné, aby nedocházelo k ohybu vedení. Dále je požadována rovnoběžnost samotných vedení, tj. aby se nerozbíhaly nebo naopak nesbíhaly. Tyto požadavky jsou číselně definovány v dokumentaci výrobce a výrobní tolerance funkčních ploch desek je jim přizpůsobena.

Desky 1 a 2 jsou spojeny lineárním vedením tak, že umožňují pohyb desky 2 v ose y. Na obou deskách jsou vybrání, která poskytují prostor pro podstavec stojanu mikroskopu (obr. 12). Na deskách 1 až 3 jsou na bocích díry M3 pro uchycení mikrometrů a opor vřeten. Mezi deskami 2 a 3 je realizováno spojení stejným způsobem jako v předešlém případě, s tím rozdílem, že umožňuje pohyb v ose x.

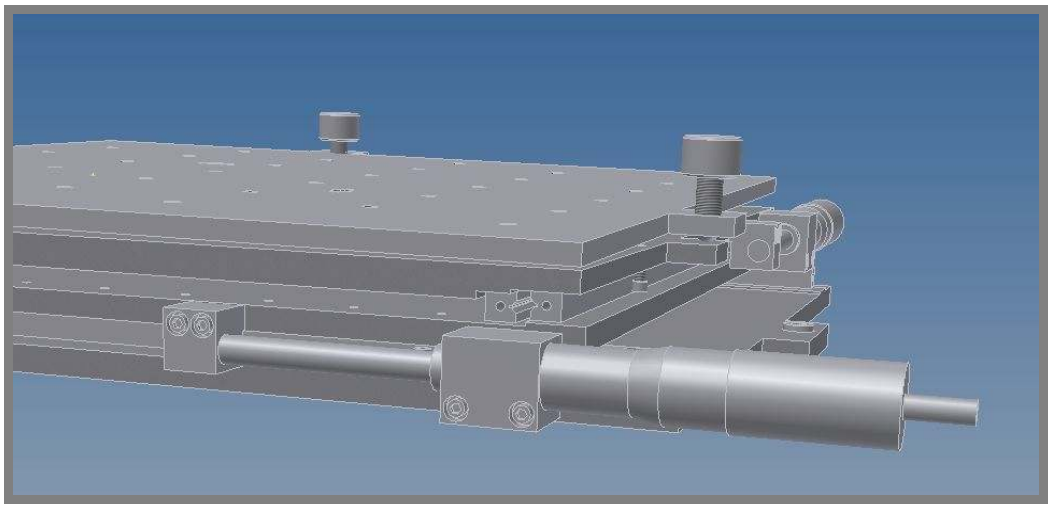


Obr. 12 Spodní dvě desky tvarem přizpůsobené stojanu profilometru

Deska 3 je nosným prvkem naklápěcí desky. Její hmotnost a hmotnost nákladu je přenášena třemi místy: kuličkou a dvěma nastavovacími šrouby. Kulička sedí v kuželovém vyhloubení na horní ploše desky. Pro šrouby jsou na těle desky dva výstupky. První vychází z přední a druhý z pravé stěny a leží na kolmicích k hranám, které procházejí kuželovým vyhloubením. Jeden z nich má na sobě drážku, jejíž význam je vysvětlen níže. Dalším prvkem jsou dvě průchozí díry v osách vyhloubení-výstupek. Slouží pro průchod pružin, které stlačují desku 3 a 4 k sobě a vymezují vůle. Na spodní straně mají díry osazení, ve kterém je umístěn kus drátu, který drží pružinu na místě. Stejné prvky se nachází i na desce 4 (viz obr. 14).
Výklopná deska je kvůli celkové výšce stolku tlustá jen 6 mm. Na bocích má výstupky ve stejných místech jako deska pod ní, ve kterých jsou navíc umístěné závity pro nastavovací šrouby. Ložná plocha je vybavena soustavou 33 děr M6, které slouží pro namontování nákladu. Jsou uspořádány v šesti řadách a v každé řadě je střídavě pět a šest otvorů. Řady jsou od sebe vzdáleny 50 mm, stejná je rozteč děr v řadách. Kratší řady jsou přesazeny proti delším o 25 mm.
Posuvné uložení zajišťují lineární vedení od firmy SKF, která jsou navržená jako vysoce přesná a s vysokou únosností i pro dynamické namáhání [7]. Pro naše účely tedy bezpečně přesahují požadavky kladené na jejich použití. Jako valivé elementy v nich slouží válečky, jejichž osa je střídavě otočena o 90°. Na všech koncích vodících tyčí jsou díly plnící funkci dorazu.

6.3 Nastavení posuvu

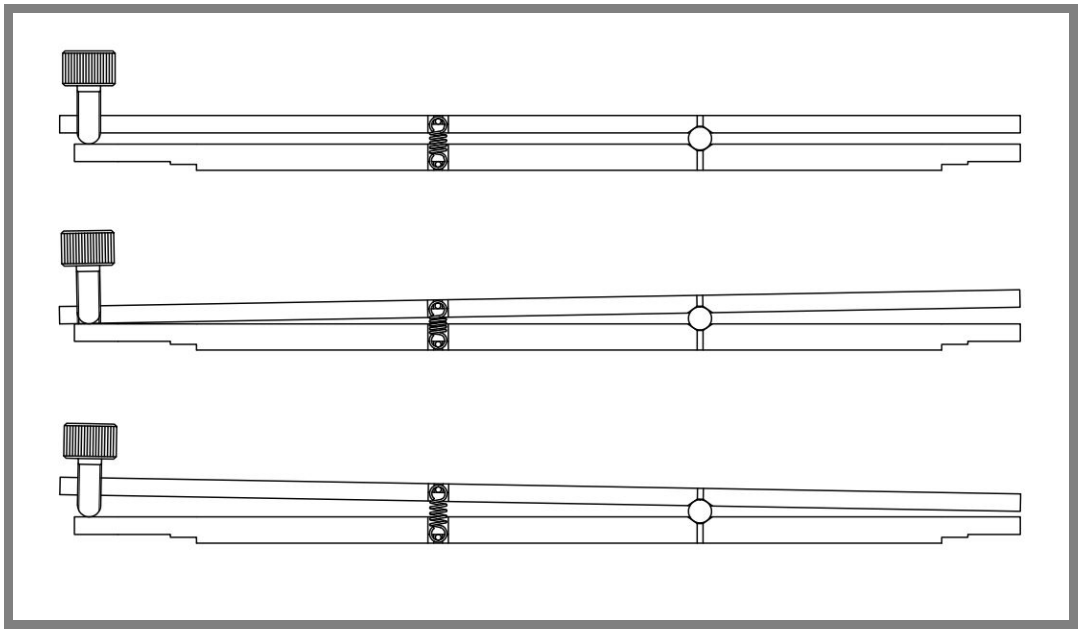
K nastavení posuvu slouží mikrometry firmy Mitutoyo, model 151-255, jehož stoupání je 0,5 mm na otáčku a dělení stupnice 0,01 mm. Jeho rozsah je 50 mm a je využitý symetricky v obou směrech, tzn. posun od neutrální polohy v obou směrech 25 mm. Při vysouvání tlačí vřeteno mikrometru do opory na ovládané desce, která se tím posunuje (obr. 13). Tažná pružina, která je uchycena jedním koncem k posouvané desce a druhým k pevné, má za úkol přitlačovat vřeteno k jeho opoře, čímž se také vymezuje vůle. Parametry použité pružiny se odvíjí z předchozích zkušeností.
Na konstrukci jsou použity dva typy úchytů, které jsou připevněné na boky stolku. První typ jsou úchyty mikrometru. Slouží k připevnění mikrometru, a proto má průchozí díru o průměru 12 mm. Po nasunutí mikrometru zprava se zajistí dodávanou maticí na levé straně. Dále jsou na stolku dvě opory vřetena, připevněné vždy o desku výš než mikrometr. Oba druhy úchytů jsou k deskám připevněné pomocí dvou šroubů M3.



Obr. 13 Posuv desek pomocí vestavného mikrometru

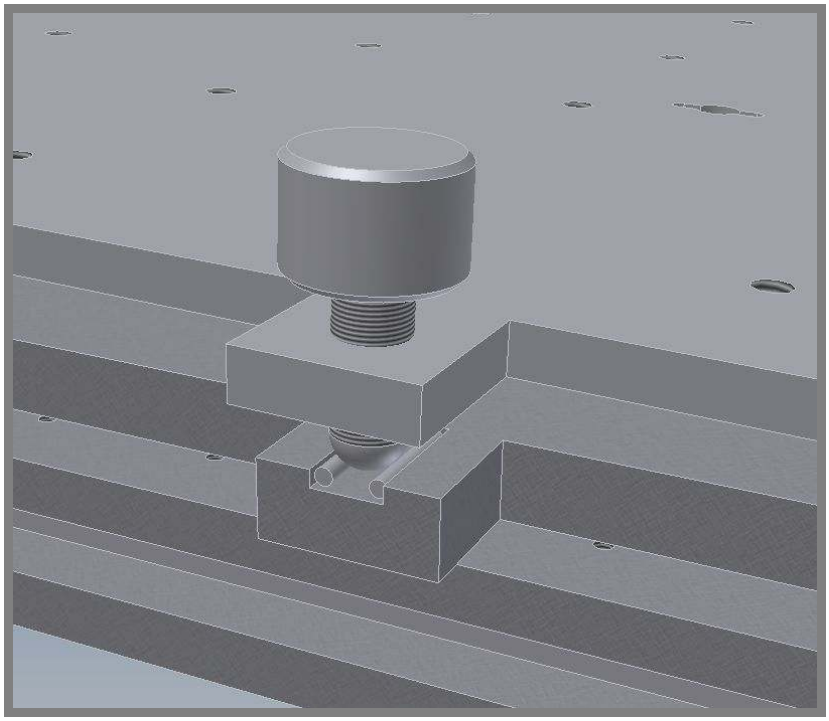
6.4 Nastavení úhlu náklonu

Nastavení úhlu se provádí pomocí dvou šroubů, které zároveň slouží jako nosné body a jsou zašroubovány do průchozí díry v desce č. 4 a opírají se do desky č. 3 (obr. 14). Tyto šrouby tvoří dva opěrné body, třetím bodem je ocelová kulička a dohromady tvoří rovnoramenný trojúhelník. V tomto uspořádání každý šroub zajišťuje jednu osu naklápění.



Obr. 14 Schéma naklánění funkční desky s rozsahem ±1°. Zobrazena kulička a pružiny zajišťující kontakt.

Otočný kloub tvořený kuličkou dovoluje rotaci kolem tří os, přičemž rotace kolem dvou z nich je žádaná a třetí je nutno zamezit. Tou je rotace kolem svislé osy a její zamezení je řešeno kontaktem jednoho doteku šroubu v drážce. Ta je orientována tak, aby zamezila pohybu doteku šroubu ve všech směrech kromě směru kolmém na osu náklonu (obr. 15). Dotykovou plochu vytváří dráty přilepené v drážce. Dotek kulové a válcových ploch umožňuje plynulou rotaci a pohyb šroubu v drážce. Druhý šroub v drážce umístěn není, protože by došlo k přeurčení soustavy.
Stavěcí šrouby plní specifickou funkci, a proto nelze použít standardní katalogové výrobky. Pro dosažení potřebné citlivosti náklonu byl proveden výpočet určující potřebnou jemnost úhlového rozlišení. Dále byl proveden silový výpočet pro optimalizaci hlavy šroubu (viz kap. 6.4.3.). Šroub má speciální hlavu opatřenou rýhováním pro lepší ruční ovládání.



Obr. 15 Detail nastavovacího šroubu se zobrazením drážky zabraňující rotaci desky kolem svislé osy.

Z konstrukčního hlediska jsou největší možné výkyvy omezeny velikostí kuličky a především vzdáleností mezi deskami, přitom se vyžaduje co nejmenší celková výška stolu. Z povahy techniky měření vyplývá požadavek na omezený rozsah náklonu, přitom je důraz kladen na jemnost nastavení. Dle praktických zkušeností je postačující rozsah úhlu ±1°.

6.4.1 Výpočet pružiny náklonu

Výpočet pružiny vychází z požadavku vyvíjené síly přibližně 30 N ve stavu největšího prodloužení, dále rozsahu pracovních délek 15÷20 mm. Je použita pružinová ocel, průměr drátu je vybrán ze standardní doporučené řady.

Výchozí hodnoty

Modul pružnosti ve smyku	G = 80 000 MPa
Modul pružnosti v tahu	E = 210 000 MPa
Průměr drátu	d = 0,71 mm
Vnější průměr pružiny	OD = 6 mm
Počet závitů těla pružiny	$N_b = 4$
Nejmenší délka pružiny při zatížení	$L_1 = 15$ mm
Největší délka pružiny při zatížení	$L_8 = 20$ mm

Vypočítané hodnoty

Střední průměr pružiny $D = OD - d = 5{,}29mm$

Poměr vinutí $C = \frac{D}{d} = 7{,}451$

Bergsträsserův faktor $K_B = \frac{4C+2}{4C-3} = 1{,}187$

Volná délka pružiny $L_0 = d \cdot (2C - 1 + N_b) = 12{,}71mm$

Počet činných závitů $N_a = N_b + \frac{G}{E} = 4{,}381$

Tuhost pružiny $k = \frac{d^4 \cdot G}{8D^3 \cdot N_a} = 3{,}918\frac{N}{mm}$

Síla pružiny při délce L_1 $F_1 = k(L_1 - L_0) = 8{,}97N$

Síla pružiny při délce L_8 $F_8 = k(L_8 - L_0) = 28{,}56N$

6.4.2 Výpočet citlivosti náklonu

Potřebná jemnost nastavení náklonu je dána metodou měření a vychází na 0,005°. Technicky je určena stoupáním závitu, nejmenším možným otočením šroubem a jeho vzdáleností od osy otáčení.

Výchozí hodnoty

Nejmenší otočení šroubu $\alpha_{min} = 5°$

Stoupání šroubu $l = 0{,}5$ mm

Vzdálenost šroub-osa $s = 210$ mm

Vypočítané hodnoty

Změna výšky při otočení šroubem o úhel α_{min}

$$dh = \frac{\alpha_{min}}{360} \cdot l = 0{,}0069mm$$

Změna úhlu při dh $\gamma_{res} = arctg\frac{dh}{s} = 0{,}0018°$

Vypočítaná jemnost nastavení úhlu $\gamma_{res} = 0{,}001\ 8°$ vyhovuje požadavkům.

6.4.3 Výpočet stavěcích šroubů

Při výpočtů stavěcích šroubů se ověřuje jejich zátěž vzhledem k meznímu stavu pružnosti a tlak v závitech. Dále se na základě vypočítaného ovládacího momentu optimalizuje hlava šroubu pro jeho ruční ovládání. Jako maximální zatížení se uvažuje největší hmotnost nákladu při jeho nejméně příznivém umístění, hmotnost naklápěcí desky a síla pružin.

Výchozí hodnoty

Maximální zatížení	F = 130 N
Rozteč	p = 0,5 mm
Velký průměr závitu	d = 8 mm
Koeficient tření	f = 0,15
Stoupání	l = p = 0,5 mm
Vrcholový úhel závitu	α = 30°
Průměr hlavy šroubu	D_h = 18 mm
Koeficient tření kůže-kov	f_{kk} = 0,6
Počet závitů matice	i = 12

Vypočítané hodnoty

Střední průměr závitu $d_m = d - 0{,}649\,p = 7{,}675mm$

Síla při zvedání břemena $P_R = \dfrac{F\left(\dfrac{p}{\pi \cdot d_m} + f\right)}{l - \dfrac{f \cdot p}{\pi \cdot d_m}} = 22{,}265N$

Moment při zvedání břemena $M_R = \dfrac{F \cdot d_m}{2} = \dfrac{p \cdot \cos\alpha + \pi \cdot d_m \cdot f}{\pi \cdot d_m \cdot \cos\alpha - f \cdot p} = 0{,}097N.m$

Tečná síla na hlavě šroubu $F_h = \dfrac{2M_R}{D_h} = 10{,}79N$

Normálová síla na hlavě šroubu $F_N = \dfrac{F_h}{f_{kk}} = 17{,}983N$

Malý průměr závitu $d_f = d - 1{,}226869\,p = 7{,}387mm$

Průřez šroubu pro výpočet napětí $A_t = \dfrac{\pi}{4} \cdot \left(\dfrac{d_m + d_f}{2}\right) = 44{,}545mm^2$

Normálové napětí v tlaku $\sigma = \frac{F}{A_t} = 2{,}918 MPa$

Tlak v závitech $p_z = \frac{4F}{\pi\left(d^2 - D_1^2\right) \cdot i} = 1{,}645 MPa$

Povolený tlak se pohybuje v rozmezí 5÷15 MPa. V extrémních pozicích výkyvu nese zatížení jenom 6 závitů. V tom případě činí zatížení 3,3 MPa. V obou situacích zatížení vyhovuje. Vhodný průměr hlavy vychází 18 mm.

6.5 Celkové rozměry, hmotnost

Celkové rozměry stolku v neutrální poloze všech desek jsou: délka 397 mm, šířka 408 mm a výška pracovní plochy 50 mm, celková po hlavu šroubů pak 72 mm. Rozsah posuvů je ±25 mm ve dvou osách, ale celkové rozměry to ovlivňuje jen nepatrně, protože desky přejíždějí nad dalšími prvky. Rozlišení posuvu je 0,01 mm. Rozsah náklonu ložné desky je ±1° s rozlišením úhlu 0,001 8°. Celková hmotnost je 21 kg.

6.6 Technologie

Stolek je plánován na výrobu v jednom kuse a tomu je přizpůsobena technologičnost konstrukce. Jedinou výrobní operací je obrábění, které je v kusové výrobě jednoznačně nejvýhodnější. V maximální možné míře je využito sériových dílů, na zakázku je potřeba vyrobit jen desky, pružiny a nastavovací šrouby.

Ze tří možných variant byla jako materiál zvolena nerezová ocel, protože odolává případným chemikáliím, kterým může být vystavena. Hliník byl vyloučen kvůli nižší pevnosti, při jeho použití by vzrostly rozměry konstrukce. Ocel opatřená nátěrem je nevhodná, protože nátěr znemožňuje dodržení rozměrových a geometrických tolerancí funkčních ploch.

Desky jsou zdaleka největšími komponenty. Všechny mají tloušťku nejvýše 9 mm, takže jdou vyrobit z jednoho druhu polotovaru. Vnitřní hrany mají zaoblení o poloměru 10 mm pro jednoduchou výrobu frézou.

7 ZÁVĚR

Tato práce se zabývala navržením polohovacího stolku doplňujícího 3D optický profilometr. V této práci byla provedena rešerše za účelem zjištění současných komerčních výrobků. Nabídka byla vyhodnocena jako nevyhovující a proto bylo přistoupeno k návrhu řešení na míru. Byly navrženy a rozpracovány jednotlivé konstrukční uzly, a některé z nich byly aplikovány na základní varianty návrhu. Na základě uvážení jejich vlastností, výhod a nevýhod poté byla zvolena výsledná varianta. Pak byly zhodnoceny technické, ekonomické a ergonomické parametry návrhu. Všechny poznatky byly nakonec zapracovány do výrobní dokumentace výsledného řešení.

Konečným výsledkem této práce je polohovací stůl z nerez oceli integrující lineární posuv ve dvou osách a naklápění ložné plochy ve dvou osách. Celkové rozměry stolku činí 397 x 408 x 50 mm, hmotnost je 21 kg a nosnost 15 kg. Posuv je realizován pomocí vestavných mikrometrů v rozsahu 50 mm, naklápění má rozsah ±1°.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] Optics Focus. *Optics-Focus | Translation Stages, Rotation Stages, Optical Mounts, Optical Tables* [online]. c2005 [cit. 2010-04-12]. Dostupné z WWW: <http://www.optics-focus.com/>.

[2] Thorlabs, Inc. *Thorlabs, Inc.* [online]. c1999 [cit. 2010-04-12]. Dostupné z WWW: <http://www.thorlabs.de/>.

[3] Newport Corporation. *Newport Corporation* [online]. c2010 [cit. 2010-04-12]. Dostupné z WWW: <http://www.newport.com/>.

[4] Edmund Optics GmbH. *Edmund Optics* [online]. c2010 [cit. 2010-04-12]. Dostupné z WWW: <http://www.edmundoptics.com/DE/>.

[5] Barth, Bernard. *High-Performance Mid-Range Travel Linear Stages* [online]. [s.l.] : Newport Corporation, 31.7.2008 [cit. 2010-03-27]. Dostupné z WWW: <http://www.newport.com/images/webDocuments-EN/images/12577.pdf>.

[6] *Wikipedia Commons* [online]. 3 January 2010 [cit. 2010-05-02]. File:Rail-guides DIN644 crossed-roller.png - Wikimedia Commons. Dostupné z WWW: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rail-guides_DIN644_crossed-roller.png>.

[7] SKF. *SKF Linear Motion Czech Republic* [online]. 2010 [cit. 2010-05-05]. LWR 3300. Dostupné z WWW: <http://www.linearmotion.skf.com/en/59/datasheet-pid456306cat1220-LWR_3300.html>.

[8] Mitutoyo. *Ruční měřidla* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2008 [cit. 2010-05-08]. Dostupné z WWW: <http://www.mitutoyo-czech.cz/pdf/katalog/cz/002-313.pdf>.

[9] Servo-Drive. *Krokové lineární pohony, krokové aktuátory* [online]. 2010 [cit. 2010-05-08]. Servo-Drive rotační a lineární pohony a technologie. Dostupné z WWW: <http://www.servo-drive.com/krokove_linearni_pohony_krokove_aktuatory.php>.

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Optický profilometr 10
Obr. 2 Jednoosý stolek Focus Optics, rozměr desky 34 x 34 mm 12
Obr. 3 Dvouosý posuvný stolek firmy Newport, rozměr desky 63,5 x 63,5 mm. 13
Obr. 4 Systém využívající kulový kloub [3] 14
Obr. 5 Dvouosý výklopný stolek kombinovaný s rotací firmy Newport 14
Obr. 6 Dvouosý posuvný motorizovaný stolek firmy Focus Optics, rozměr desky 300 x 300 mm, výška 108 mm 15
Obr. 7 Příklad modularity výrobků [5] 16
Obr. 8 Lineární vedení s vodící tyčí se zkříženými válečky [6] 20
Obr. 9 Schéma planžety 22
Obr. 10 Umístění stolu vzhledem k pozici podstavce mikroskopu s vyznačenými montážními otvory a nejzazší pozicí desky č. 2 25
Obr. 11 Celkový pohled na polohovací stůl včetně stojanu mikroskopu v jejich vzájemné poloze 26
Obr. 12 Spodní dvě desky tvarem přizpůsobené stojanu profilometru 27
Obr. 13 Posuv desek pomocí vestavného mikrometru 28
Obr. 14 Schéma naklánění funkční desky s rozsahem ±1°. Zobrazena kulička a pružiny zajišťující kontakt. 29
Obr. 15 Detail nastavovacího šroubu se zobrazením drážky zabraňující rotaci desky kolem svislé osy. 30

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Srovnání konstrukčních prvků manuální a motorizované varianty 23

11 SEZNAM PŘÍLOH

Polohovací stůl	1-2010-01.00
Deska 1	1-2010-01.01
Deska 2	1-2010-01.02
Deska 3	1-2010-01.03
Deska 4	1-2010-01.04
Úchyt mikrometru	4-2010-01.07
Opora vřetena	4-2010-01.06
Stavěcí šroub	4-2010-01.05
Pružina 1	4-2010-01.08
Pružina 2	4-2010-01.09
Seznam položek	4-2010-01.K