



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE DOKONČOVACÍHO STROJE PRO VALIVÉ ELEMENTY LOŽISEK

DESIGN OF THE FINISHING MACHINE FOR ROLLING BEARING'S ELEMENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. RADEK CAGAŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DAVID KOŠŤÁL

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Radek Cagaš

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Konstrukční inženýrství (2301T037)**

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

Konstrukce dokončovacího stroje pro valivé elementy ložisek

v anglickém jazyce:

Design of the finishing machine for rolling bearing's elements

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je konstrukční návrh zařízení pro přesné dokončení povrchové geometrie a drsnosti povrchu valivých elementů ložisek, zejména soudečků.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Konceptní řešení
5. Konstrukční řešení
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení

Typ práce: konstrukční; Účel práce: výzkum a vývoj

Výstup práce: užitiný vzor, průmyslový vzor; Projekt: Specifický vysokoškolský výzkum

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků)

Zásady pro vypracování práce:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2015.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam odborné literatury:

- 1) Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Budynas, R. G. (2010). Konstruování strojních součástí. Brno: VUTIUM.
- 2) Stachowiak, G. W. Batchelor, A. W. Stachowiak, G. B. (2004). Experimental Methods in Tribology. 1st edition. Amsterdam: Elsevier B.V., 354 p. ISBN 0-444-51589-5.

Vedoucí diplomové práce: Ing. David Košťál

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 21.11.2014

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem zařízení, které slouží k zlepšení jakosti povrchu soudečků používaných při měření podmínek panujících v EHD kontaktu. Problém u vyrobených soudečků je vysoká drsnost a vlnitost na jejich povrchu. V teoretické části je uveden přehled dokončovacích obráběcích metod, na jejichž základě byla pro obrábění soudečků zvolena kombinace metod lapování a abrazivního leštění. V další části práce je popsán návrh konstrukce, řídicí elektroniky a řídicího systému zařízení pro obrábění soudečků. Závěr práce je věnován testování sestaveného zařízení a ověření jeho funkčnosti. Díky kombinaci zvolených obráběcích metod byla dosažena drsnost na povrchu soudečků vhodná pro úspěšné měření pomocí interferometrie. Konkrétně bylo dosaženo drsnosti $Ra \leq 0,01 \mu\text{m}$ a vlnitosti $Wa \leq 0,022 \mu\text{m}$.

KLÍČOVÁ SLOVA

Abrazivní leštění, lapování, dokončování, valivá tělesa, soudeček, ložiska, úprava povrchu

ABSTRACT

The thesis deals with the design of the device that is used to improve the quality of the surface of spherical rollers. Spherical rollers are used for the measuring of the conditions in the EHD contact. The high roughness and waviness of the spherical rollers' surface is a problem. Several machining methods are described in the theoretical part. The overview in theoretical part has been used for choice of the machining methods (lapping and abrasive polishing). The spherical rollers' machining system, its construction, electronics and control systems are described in the next section. The last part is focused on testing of assembled device, and on checking its functionality. The desired roughness of the spherical rollers' surface, suitable for successful interferometric measurement, was achieved by combining the selected machining methods. The roughness and waviness achieved was $Ra \leq 0.01 \text{ micron}$ $Wa \leq 0.022 \text{ microns}$.

KEY WORDS

Abrazive polishing, lapping, rolling elements, spherical roller, bearings, surface finishing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CAGAŠ, R. *Konstrukce dokončovacího stroje pro valivé elementy ložisek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 87 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Košťál.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci „Konstrukce dokončovacího stroje pro valivé elementy ložisek“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Davida Košťála. Vycházel jsem při tom ze svých znalostí, konzultací, odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne

.....
Radek Cagaš

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval Ing. Davidu Košťálovi za odborné vedení práce, cenné rady a připomínky během konzultací, pomoc při měření a za laskavost a vstřícnost.

OBSAH

Úvod	13
1 Přehled současného stavu poznání	14
1.1 Popis soudečků a způsob jejich výroby	14
1.2 Elastohydrodynamické mazání	15
1.2.1 Vliv povrchových nerovností	16
1.3 Struktura povrchu	17
1.4 Rozdělení metod pro dokončovací obrábění:	17
1.5 Abrazivní metody obrábění vnějších ploch	18
1.5.1 Broušení	18
1.5.2 Lapování	19
1.5.3 Superfinašování	21
1.5.4 Dokončování povrchu magnetoreologickou kapalinou	22
1.6 Beztřískové metody dokončování obrobeneých povrchů	23
1.6.1 Statické válečkování	23
1.6.2 Statické kuličkování	23
2 Analýza problému a cíl práce	25
2.1 Analýza problému	25
2.2 Zhodnocení poznatků na základě současného stavu poznání	25
2.3 Cíl práce	26
2.4 Časový plán práce	26
3 Koncepční řešení	28
3.1 Kinematika obrábění	28
3.1.1 Polohování páky s nástrojem	30
3.2 Abrazivní médium	32
3.3 Nosný rám	32
3.4 Volba typu motorů	33
3.4.1 Motor pro pohon soudečku a nástroje	33
3.4.2 Motor pro naklápění páky	35
3.5 Návrh řídicí elektroniky	36
3.5.1 Řízení krokových motorů	38
4 Konstrukční řešení	41
4.1 Ověřovací experiment	41
4.2 Popis konstrukce	42
4.2.1 Nosný rám	44
4.2.2 Uložení poháněného hrotu	45
4.2.3 Uložení přitlačného hrotu	47
4.2.4 Uložení čepu, na kterém je páka s nástrojem	48
4.2.5 Uložení nástroje	49
4.2.6 Další konstrukční části	51
4.3 Elektronika a řídicí systém	53
4.3.1 Vyráběné plošné spoje	54
4.3.2 Použité motory	55
4.3.3 Krabice pro uložení elektroniky	56
4.3.4 Struktura řídicího systému a ovládání	57
4.4 Testování zařízení a optimální postup lapování a leštění	59
4.5 Finanční zhodnocení	61

5 Diskuze	62
6 Závěr	66
7 Seznam použitých zdrojů	67
8 Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin	70
9 Seznam obrázků a grafů	71
10 Seznam tabulek	73
11 Seznam příloh	74

ÚVOD

Ve strojírenské praxi jsou ložiska jednou z nejčastěji používaných součástí. Nejčastěji slouží k uložení hřídelí a os v rámu stroje.

Proto, aby se zvýšila životnost ložisek, se používá pro výrobu ložiskových kroužků i valivých elementů ložisková ocel, která je kalená a má vysokou odolnost proti opotřebení. Pro zvýšení meze únavy a tím zvýšení životnosti je nutné, aby měly valivé dráhy a valivé elementy odpovídající geometrickou přesnost a jakost povrchu.

Na Ústavu konstruování probíhá výzkum, který se zabývá měřením podmínek v simulátoru kontaktu ve valivém ložisku, ve kterém je nahrazen kontakt valivých elementů s ložiskovými kroužky kontaktem valivého elementu s rovinným diskem. Valivé elementy, které se při měření používají, jsou kuličky (kruhový kontakt) a soudečky (eliptický kontakt). Povrch kuliček je možné dokončit v zařízení, které se skládá ze dvou disků s lapovací pastou, mezi kterými se náhodně pohybují kuličky. To je možné díky tomu, že kuličky mají stejnou křivost ve směru valení a směru kolmém na směr valení. Soudečky tímto mechanismem dokončit nelze, jelikož mají různou křivost. Povrch soudečků je pro měření nevhodný, protože soudečky mají kromě vysoké drsnosti také vysokou vlnitost povrchu. Tyto vlnitosti znemožňují vyhodnocení výsledů.

Cílem této diplomové práce je navrhnout a vyrobit zařízení, které by sloužilo ke zlepšení jakosti povrchu soudečků, aby je bylo možné použít pro měření. Zejména se jedná o snížení vlnitosti a drsnosti povrchu soudečku. Tato práce je řešena, protože v současné době není u výrobce soudečků k dispozici obráběcí stroj, kterým by bylo možné přímo dokončit geometrii soudečků s požadovanou přesností.



Obr. 0-1 Soudeček používaný při měření

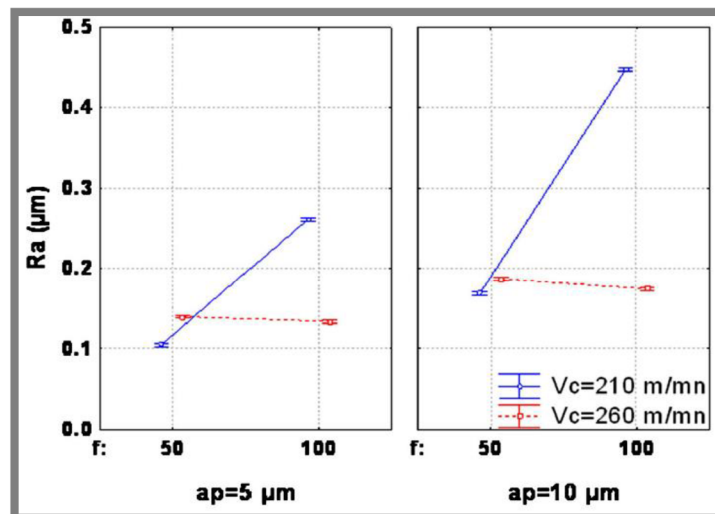
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Jeden z parametrů, který významně ovlivňuje podmínky v elasto-hydrodynamickém (EHD) kontaktu je struktura povrchu součástí. Soudečky, které jsou používány při měření, jsou vyráběny třískovým obráběním. Po tomto obrábění je na povrchu soudeček vlnitost a drsnost, která znemožňuje vyhodnocení měření. Strukturu na jejich povrchu je proto nutné před měřením zlepšit některou z dokončovacích obráběcích metod.

1.1 Popis soudeček a způsob jejich výroby

Soudečky používané při měření, jsou vyráběny soustružením. Soustružením je možné běžně dosáhnout drsnosti povrchu až 1,6 μm . Následně jsou soudečky broušeny. Tím se sníží drsnost jejich povrchu až na 0,2 μm . Tato drsnost je pro měření ovšem stále nedostatečná.

Jouini [1] se ve své experimentální studii zabýval zjišťováním, jaké drsnosti povrchu je možné dosáhnout při soustružení ložiskové oceli. Podle článku se obrábění provádělo na prototypovém soustruhu, který měl hydrostatické posuvy, zajišťující vysokou tuhost, tlumení a nízké tření. Z experimentů se ukázalo, že při použití dokončovacího nástroje firmy Sandvik Coromant je možné dosáhnout drsnosti povrchu až 0,1 μm . Porovnávání vlivu třech parametrů: hloubky řezu, řezné rychlosti a posuvu na dosaženou drsnost povrchu je na obr. 1-1.



Obr. 1-1 Vliv parametrů při soustružení na dosaženou drsnost [1]

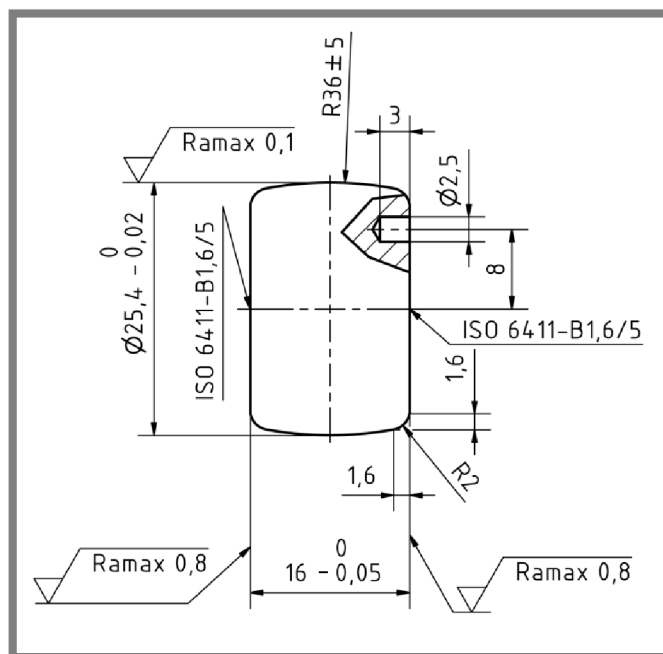
Na obr. 1-2 jsou rozměry soudečku, který se používá při měření. Při měření se používá více typů soudeček. Všechny mají průměr 1", liší se velikostí poloměru ve směru kolmém na směr valení (na obrázku R36±5). Eliptičita kontaktu k , kterou je možné spočítat podle rovnice (1), uvedené v [2], se u používaných soudeček pohybuje v rozmezí 2÷4.

$$k = 1,0399 \left(\frac{R_Y}{R_X} \right)^{0,636} \quad (1)$$

Kde:

R_Y mm poloměr ve směru kolmém na směr valení,

R_X mm poloměr ve směru valení.

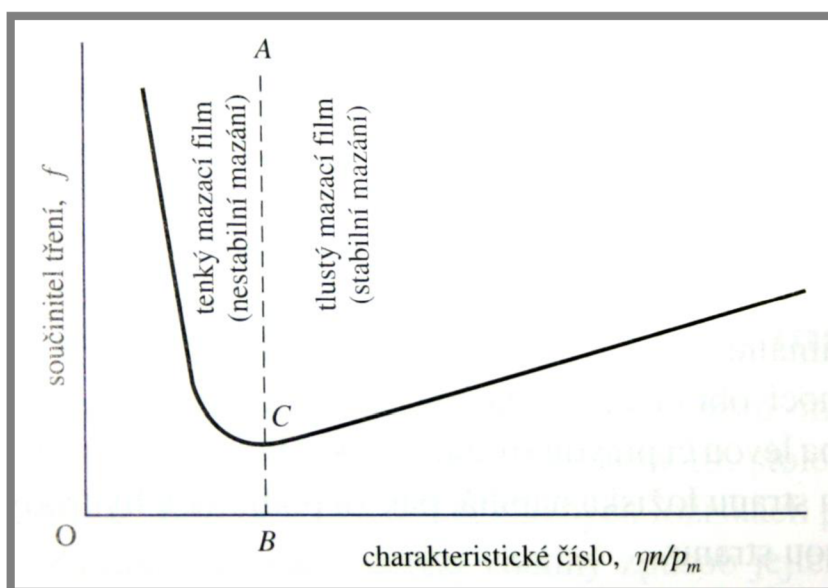


Obr. 1-2 Rozměry soudečku

1.2 Elastohydrodynamické mazání

Na obr. 1-3 je vidět křivku, která znázorňuje průběh součinitele tření v závislosti na charakteristickém čísle $\eta n/p_m$ (η -viskozita, n -otáčky, p_m -měrné zatížení). Oblast tlustého mazacího filmu udává oblast, ve které nastává hydrodynamické mazání [3].

1.2



Obr. 1-3 Průběh součinitele tření f v závislosti na char. čísle $\eta n/p_m$ [3]

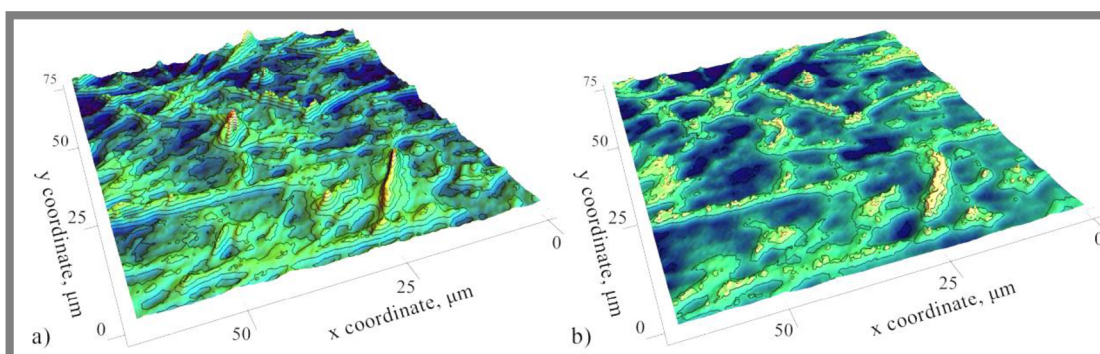
V tomto režimu dochází ke vzniku mazacího filmu, který trvale odděluje oba třecí povrchy. Oblast tenkých mazacích filmů, která se nachází vlevo od přímky AC, zahrnuje režimy mazání, kdy může dojít ke kontaktu jednotlivých třecích povrchů. Jedním z těchto režimů je elasto-hydrodynamické (EHD) mazání [3].

EHD mazání je režim mazání vyskytující se v kontaktu nekonformně zakřivených povrchů jako jsou ozubená kola, valivé elementy ložisek nebo vačky. Jednou z podmínek vzniku EHD mazání je vzájemné odvalování povrchů, které jsou v kontaktu. Při tomto režimu mazání bývá v místě kontaktu vysoký stykový tlak, který má za následek nárůst viskozity maziva a elastické deformace součástí [4]

1.2.1 Vliv povrchových nerovností

Tloušťka vrstvy maziva v EHD kontaktu je stejného řádu jako velikost nerovností na povrchu. Detailní popis vlivu nerovností na chování mazacího filmu poskytuje důležité informace pro lepší pochopení například poruch strojních součástí a jejich předcházení [4].

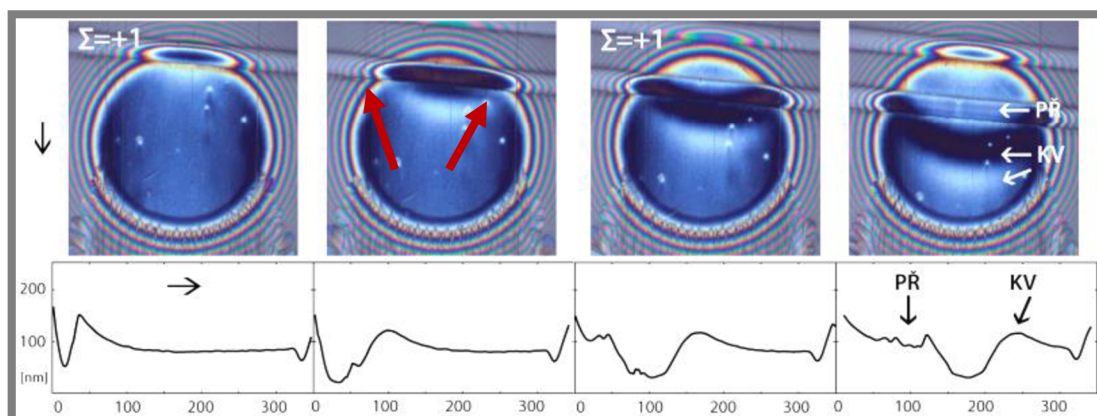
Vlivem povrchových nerovností na chování mazacího filmu se zabýval například Šperka [5] ve své dizertační práci. Na obr. 1-4 je vidět porovnání nedeformovaného povrchu kuličky (a) a povrch kuličky zatížené v kontaktu (b). Díky kontaktnímu tlaku u zatížené kuličky dojde ke stlačení povrchových nerovností a tím ke snížení drsnosti povrchu. V EHD režimu mazání mohou povrchové nerovnosti zapříčinit prolomení mazacího filmu. Díky tomu dojde ke kontaktu povrchu jednotlivých součástí.



Obr. 1-4 a) Nedeformovaný povrch mimo kontakt b) Deformovaný povrch uvnitř kontaktu. [5]

Tloušťku mazacího filmu ovlivňuje velké množství parametrů jako například tvar, orientace a rozložení povrchových nerovností, vzájemná rychlost jednotlivých povrchů a další [5].

Na obr. 1-5 je vidět jak mohou ovlivňovat povrchové nerovnosti tloušťku mazacího filmu. Přes kontakt kuličky s diskem procházejí výstupky, které jsou na povrchu kuličky. Grafy ve spodní části obrázku znázorňují tloušťku mazacího filmu v řezu, který prochází středem kontaktu a má směr valení. Díky výstupku na kuličce dojde ke snížení tloušťky mazacího filmu, čemuž odpovídá deformace kružnic (označeno červenými šipkami). Obdobný vliv na tloušťku mazacího filmu mohou mít i povrchové nerovnosti jako je vlnitost a drsnost na povrchu vzorků [5].



Obr. 1-5 Vliv rýhy na tloušťku mazacího filmu [5]

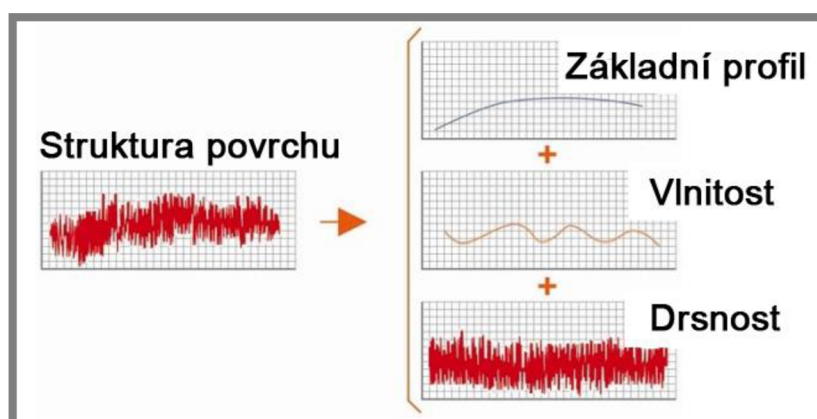
1.3 Struktura povrchu

1.3

Při obrábění vznikají na povrchu součásti stopy, které jsou způsobeny řeznými nástroji, které vnikají do povrchu součásti. Například to může být ostří soustružnického nože nebo zrno v brusném kotouči [6].

Základní rozdělení nerovností na povrchu součásti je možné s ohledem na jejich vznik:

- **nedokonalosti povrchu** – jsou náhodně způsobeny během výroby, jsou to především rýhy, trhliny, póry, staženiny nebo nerovnosti způsobené korozí,
- **struktura povrchu** – na rozdíl od nedokonalostí povrchu vzniká struktura při obrábění a podle vlnové délky profilů nerovností se dělí na: základní profil, vlnitost a drsnost povrchu. Drsnost povrchu má nejmenší vlnovou délku, naopak základní profil má vlnovou délku největší [6].



Obr. 1-6 Struktura povrchu [7]

1.4 Rozdělení metod pro dokončovací obrábění:

1.4

Základní dělení obráběcích metod, které se využívají při dokončovacích operacích, může být podle [8] provedeno s ohledem na to, jestli při obrábění dochází k úběru materiálu nebo pouze jeho přetvoření následovně:

- abrazivní dokončovací metody,
- beztržkové dokončovací metody.

1.5 Abrazivní metody obrábění vnějších ploch

Do této skupiny patří broušení, lapování a superfinišování. Při všech těchto metodách obrábění se využívá nástroj s nedefinovanou geometrií. Abrazivní metody jsou nejčastěji používané z dokončovacích metod. Je pro ně charakteristický nízký úběr materiálu a vysoká dosahovaná přesnost a jakost obrobenej plochy. V tab. 1-1 jsou parametry, kterých je možné dosáhnout abrazivními dokončovacími metodami používanými pro vnější plochy [8].

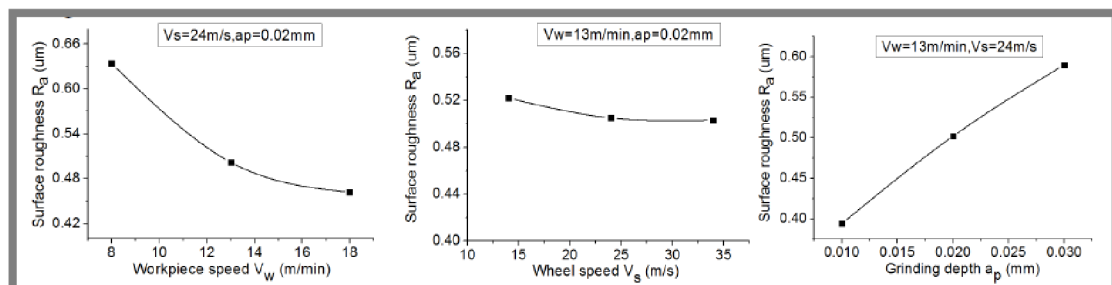
Tab. 1-1 Dosahované parametry přesnosti a jakosti vnějších ploch obrobenejmi abrazivními metodami [8]

Metoda obrábění	Přesnost rozměrů IT		Drsnost plochy R_a (μm)	
	střední	rozsah	střední	rozsah
Broušení				
hrubování	10	9 ÷ 11	1,6	0,8 ÷ 3,2
dokončování	5	5 ÷ 6	0,4	0,2 ÷ 0,6
jemné	4	3 ÷ 5	0,2	0,05 ÷ 0,4
Lapování				
normální	4	3 ÷ 4	0,1	0,05 ÷ 0,2
jemné	2	1 ÷ 2	0,05	0,012 ÷ 0,05
Superfinišování				
dokončovací	4	3 ÷ 5	0,2	0,05 ÷ 0,4
jemné	3	2 ÷ 4	0,1	0,025 ÷ 0,1

1.5.1 Broušení

V praxi se broušení používá především v případech, kdy je potřeba dosáhnout přesnosti a jakosti povrchu, které není možné dosáhnout běžnými metodami třískového obrábění (soustružení, frézování, ...). Další možnost využití broušení je pro obrábění například feritových materiálů, které se vyznačují vysokou křehkostí, která znemožňuje třískové obrábění. Pro broušení je charakteristická vysoká rezná rychlost, malý průřez třísky a schopnost samoostření brousícího kotouče [8].

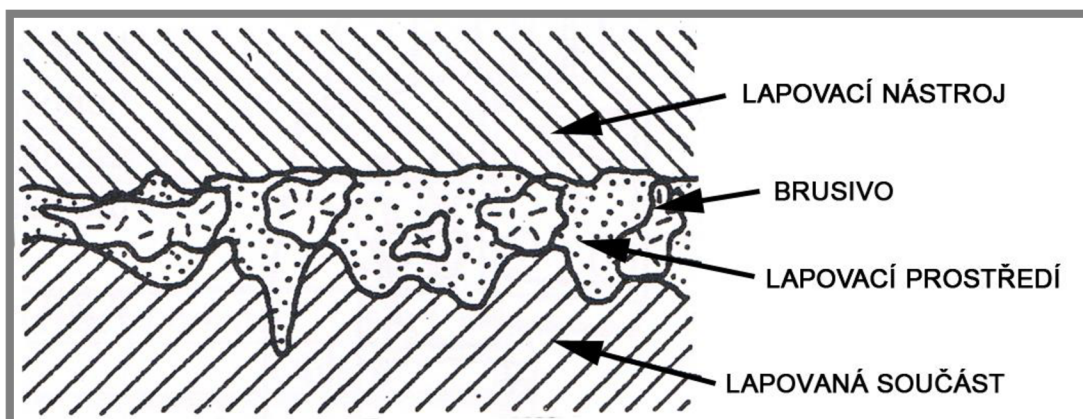
Yao [9] se zabývá hledáním optimálních parametrů pro broušení vysokopevnostní oceli. Výsledky ukazují (obr. 1-7), že drsnost povrchu dosažitelná broušením může být až $0,4 \mu\text{m}$. Nejvíce dosaženou drsnost ovlivňuje rychlost obráběné součásti a hloubka řezu.



Obr. 1-7 Závislost drsnosti na rychlosti obrobku, rychlosti kotouče a hloubky řezu [9]

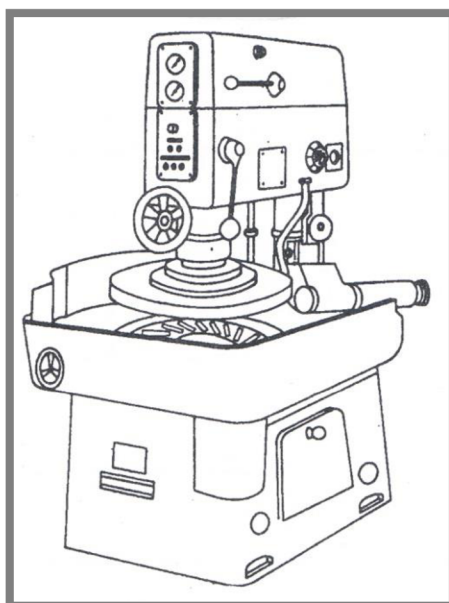
1.5.2 Lapování

Lapování je velmi přesná metoda obrábění, kterou je možné dokončovat vnější i vnitřní povrchy, které mohou být měkké nebo tvrdé. Lapování je možné provádět buď ručně, nebo strojně. Při lapování dochází k relativnímu pohybu lapovacího nástroje a lapované součásti. Mezi nimi se pohybují volné abrazivní částice, které slouží k úběru materiálu a zmenšení povrchových nerovností [8].



Obr. 1-8 Princip lapování [8]

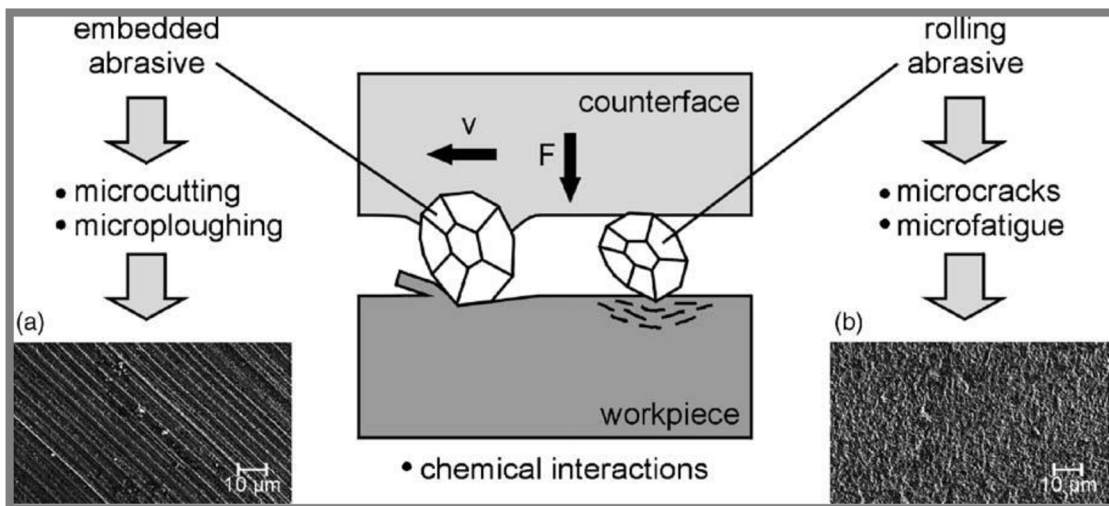
Stroje, které se pro lapování používají, jsou buď univerzální, pro širší škálu výrobků, nebo speciální pro dokončování konkrétního výrobku (např. boky zubů ozubených kol). Na obr. 1-9 je zobrazen stroj pro lapování vnějších válcových a rovinných ploch. Skládá se ze dvou kotoučů, mezi kterými je unášecí deska s otvory, ve kterých jsou vloženy lapované součásti. Unášecí deskou je pohybováno výstředníkem, aby nedocházelo k obrábění součástí stále po stejných drahách [8].



Obr. 1-9 Lapovací stroj [8]

Další možností, jak dokončovat povrchovou geometrii, je metoda abrazivního leštění. Na rozdíl od lapování, při kterém se používají abrazivní částice o velikosti

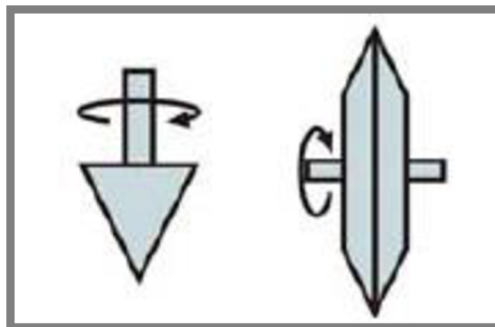
od 3 μm do 10 μm , se používají částice o velikosti menší než 1 μm . Další rozdíl mezi lapováním a leštěním je v materiálu, který je použit pro výrobu nástroje. Lapovací nástroje mají vysokou povrchovou tvrdost. Naproti tomu nástroje pro abrazivní leštění bývají z měkkého materiálu, do kterého se mohou abrazivní částice vtláčovat. Podle tvrdosti nástroje se také mění tvar stop po nástroji. Použití měkkého nástroje způsobí rovnoběžné rýhy po abrazivních částicích. Naopak při použití tvrdého nástroje vzniknou na povrchu důlky od vtačených zrn (obr. 1-10) [10].



Obr. 1-10 Mechanismus úběru materiálu při použití metod s volným brusivem [10]

Brinksmeier [11] se zabývá porovnáním třech různých způsobů dokončování povrchu V drážek s úhlem 150°. Jedna z metod využívá při práci dva druhy nástrojů (obr. 1-11), lapovací hrot a lapovací disk, které jsou vyrobeny z polyamidu PA6, který má relativně vysokou tvrdost a zároveň dostatečnou houževnatost, aby do nástrojů mohly být vtaženy abrazivní částice. Při leštění byly použity abrazivní částice o velikosti 0,1 μm , relativní rychlost nástroje se pohybovala v rozmezí 0,006 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ až 0,032 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Čas jednotlivých testů byl v rozmezí jedné až deseti minut. Testy ukazují, že touto metodou je možné dosáhnout hodnoty $R_a=4\div 5$ nm.

Další metody, kterými se článek zabývá, jsou leštění laserem a obrábění proudem abrazivních částic. Jakost povrchu dosažená laserem je podle studie v rozmezí 400 nm \div 600 nm. Při použití metody využívající proud abrazivních částic se dosažená jakost povrchu pohybuje okolo 60 nm. Nevýhodou této metody ovšem je, že dochází k zaoblení dna a vrcholů drážek [11].



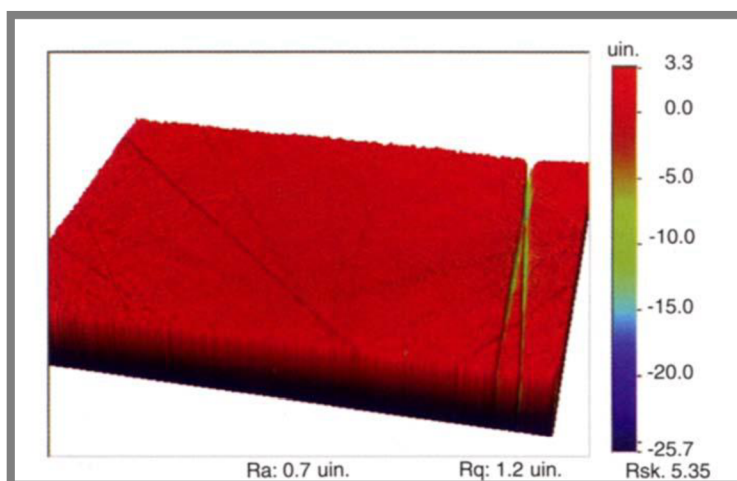
Obr. 1-11 Lapovací nástroje [10]

FriCSO Super-Finishing (FSF) je další operace která využívá abrazivní leštění speciálně vyvinutým polymerem a abrazivní pastou. Výsledné povrchy jsou význačné vysokou rovinností a hladkostí [12].

Použití polymerového nástroje je výhodné ze dvou důvodů:

První je, že abrazivní částice nedrží v polymeru tak pevně jako při použití ocelového nástroje. Jakmile dojde k jejich otupení, naroste třecí síla mezi zrnem a obráběnou součástí, která způsobí uvolnění zrna. Jakmile je povrch všech zrn otupen, je povrch materiálu plasticky tvářen [12].

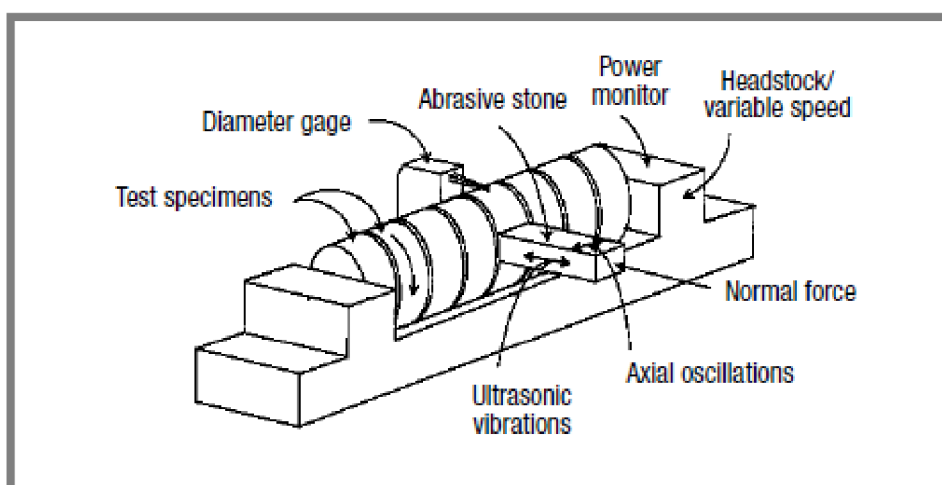
Na obr. 1-12 je výsledná struktura po FSF lapování. V jednom kroku bylo Ra zlepšeno z 0,4 na 0,02 μm [12].



Obr. 1-12 Povrch leštěný metodou FSF [12]

1.5.3 Superfinašování

Superfinašováním je možné dokončovat vnější a vnitřní rotační plochy. Jedná se o velmi produktivní dokončovací metodu. Na obr. 1-13 je vidět princip superfinašování. Součást, která se obrábí, vykonává rotační pohyb. Z boku je k součásti přitlačován brusný nástroj, který vykonává kmitavý pohyb ve směru osy rotace obráběné součásti [13].



Obr. 1-13 Princip superfinašování [13]

Podle Varghese [13] má na drsnost obrobené plochy zásadní vliv zrnitost použitého brusného kamene. S rostoucí zrnitostí klesá dosažitelná drsnost. Na zrnitosti také závisí optimální tlak, kterým je brousící kámen přitlačován k obráběné součásti, který s rostoucí zrnitostí také roste. Při použití kamene se zrnitostí 1200 a optimální rychlosti otáčení a rychlosti kmitání je možné touto metodou dosáhnout drsnosti povrchu až $0,08 \mu\text{m}$.

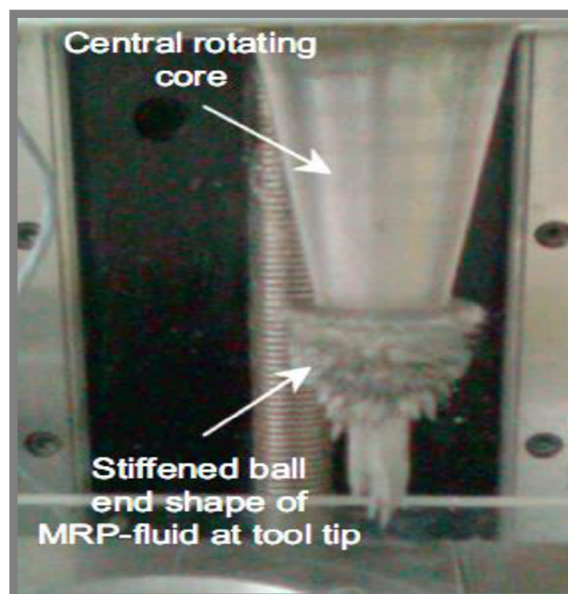
Dále z článku vyplývá, že velikost úběru značně ovlivňuje rychlost axiálního kmitání a rychlost otáčení součásti tak, že s rostoucími otáčkami a s rostoucí rychlostí kmitání superfinišovacího kamene roste množství odebíraného materiálu a klesá drsnost povrchu [13].

Grzesik [14] se zabývá vlivem nerovností, které vzniknou při soustružení, na výslednou strukturu, kterou je možné dosáhnout následným superfinišováním a leštěním kuličkou. Z výsledků je vidět, že pokud je soustružením vytvořen kvalitnější povrch (v článku: $R_a=0,18 \mu\text{m}$) je možné superfinišováním dosáhnout drsnosti povrchu až $R_a=0,08 \mu\text{m}$.

1.5.4 Dokončování povrchu magnetoreologickou kapalinou

Další možností jak dokončovat povrchovou geometrii je obrábění magnetoreologickou kapalinou. Je to pokročilá metoda, kterou je možné dokončovat povrchy bez vzniku povrchových a podpovrchových vad. Často je tato metoda používána pro dokončování konvexních, konkávních, rovinných a asférických optických komponentů. Normálová síla, která působí na částice je relativně malá v porovnání s jinými dokončovacími metodami [15].

Singh [15] se zabývá dokončováním povrchu magnetoreologickou kapalinou a nástrojem, který je na obr. 1-14. Na nástroji je vlivem magnetického pole vytvořena kulička magnetoreologické kapaliny. Celý nástroj se otáčí kolem své osy a vykonává pohyby ve všech třech osách. Výsledky ukazují, že touto metodou je možné dosáhnout na rovném povrchu drsnosti $R_a = 16,6 \text{ nm}$. A na zakřiveném povrchu drsnosti $R_a = 123,7 \text{ nm}$.



Obr. 1-14 Nástroj pro obrábění MR kapalinou [15]

1.6 Beztržiskové metody dokončování obrobených povrchů

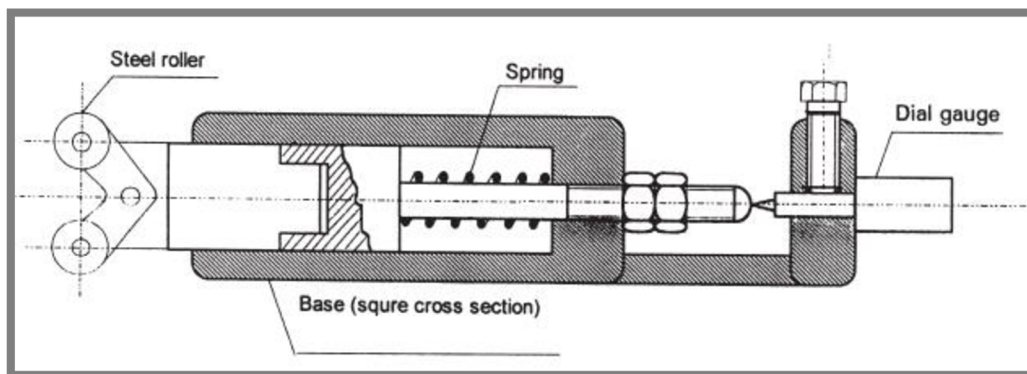
Na rozdíl od abrazivních dokončovacích metod nedochází u beztržiskových metod k úběru materiálu, ale pouze k plastické deformaci jeho povrchových vrstev. Povrch součásti je plasticky tvářen do hloubky setin až desetin milimetru, čímž zároveň dochází ke vzniku tlakových napětí v povrchové vrstvě a tím ke zlepšení mechanických vlastností, především velikosti meze pevnosti, meze únavy, únosnosti nebo velikosti součinitele tření. Tyto parametry záleží z velké části na jakosti povrchu součásti [8, 16].

1.6.1 Statické válečkování

U statického válečkování je váleček přitlačován k povrchu válečkované součásti statickou silou. Na zvoleném průměru válečku a průměru válečkované součásti závisí výsledná hloubka zpevnění. Obecně platí, že při menším průměru válečku se dosáhne větší hloubky zpevnění, naopak s větším válečkem má výsledný povrch nižší drsnost [16].

Podle El-Axira [16] jsou hlavní parametry, které ovlivňují jakost výsledného povrchu a jeho mikrotvrdot: rychlost válečkování, přitlačná síla, velikost posuvu a počet průchodů nástrojem. El-Axirova studie se zabývá výzkumem závislosti mikrotvrdoti a jakosti povrchu na těchto parametrech. Při testech se používal nástroj (obr. 1-15) s průměrem válečku 22 mm a šířkou 6 mm. Testované součásti měly před obráběním drsnost povrchu v rozmezí $5,5 \div 6,6 \mu\text{m}$ a povrchovou tvrdost 22 Hv.

Z článku vyplývá, že optimální tvrdosti a jakosti povrchu je možné dosáhnout při: otáčkách $150 \div 230 \text{ s}^{-1}$, posuvu 0,6 mm, přitlačná síla 34 N pro vysokou tvrdost, nebo 24 N pro nízkou drsnost a při 3 až 4 průchodech. V průběhu testování se podařilo zlepšit průměrnou aritmetickou úchylku profilu z původních $4,5 \mu\text{m}$ na $0,5 \mu\text{m}$ [16].



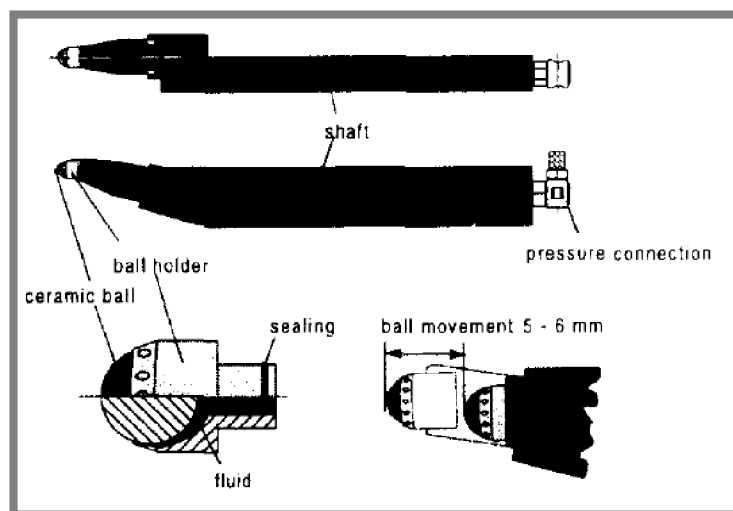
Obr. 1-15 Válečkovací nástroj [16]

1.6.2 Statické kuličkování

Tato metoda je velmi podobná statickému válečkování s tím rozdílem, že se používá jedna nebo více kuliček, které jsou často uloženy v kroužku nebo držáku. Kuličkováním je možné dokončovat vnější i vnitřní rotační plochy [17].

Statické kuličkování může být podle Klockeho [17] realizováno například keramickou kuličkou, která je k povrchu obráběné součásti přitlačována hydraulickým tlakem kapaliny, aby se mohla volně otáčet ve všech směrech. Přitlačná síla má veli-

kost 500 bar, což odpovídá přitlačné síle 1 400 N. Kombinací přesného soustružení a statického kuličkování je možné nahradit operace leštění nebo honování. Pro testování byl použit materiál 100 Cr 6 s tvrdostí 60 HRC. Článek udává, že průměrná aritmetická úchylka profilu, kterou je možné dosáhnout tímto nástrojem po předchozím soustružení je při vhodné volbě parametrů až $0,9 \mu\text{m}$. Další přínos, který tato dokončovací operace má, je zbytkové povrchové napětí, které je tlakové a má za následek zvýšení meze pevnosti a meze únavy.



Obr. 1-16 Nástroj pro statické kuličkování [17]

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

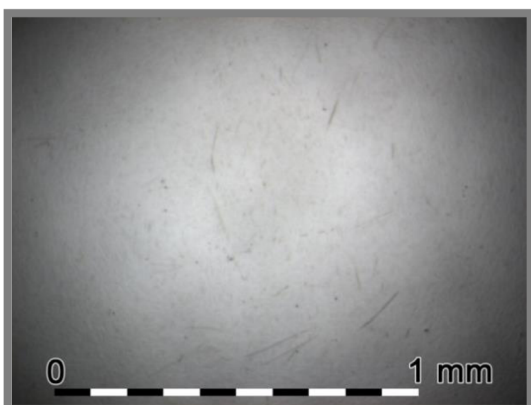
2

2.1 Analýza problému

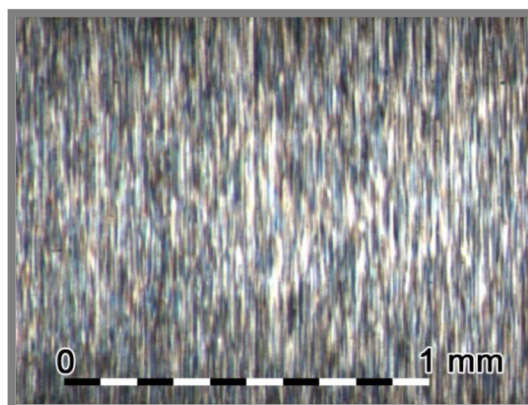
2.1

Soudečky valivých ložisek jsou vyráběny s určitou jakostí povrchu, která je dostatečná pro dosažení životnosti ložisek, která je deklarovaná výrobcem. Je ovšem nedostatečná pro měření podmínek panujících v EHD kontaktu. Povrchové nerovnosti totiž znemožňují provést kalibraci, která je nutná pro vyhodnocení měření. Při pokusech dokončit povrch soudečků stejným způsobem, jakým se dokončuje povrch kuliček, došlo pouze k odstranění drsnosti na soudečcích, tedy nerovností s nejmenší vlnovou délkou. Charakteristická struktura povrchu po broušení (obr. 2-2) nebyla odstraněna. Oproti soudečkům mají kuličky (obr. 2-1) již z výroby výrazně lepší jakost povrchu. Drsnost povrchu kuliček bývá běžně nižší než 50 nm. Takto vysoká jakost povrchu je dosažena zejména díky jiné technologii výroby, kterou je možné použít pouze pro kuličky.

Dalším problémem jsou zakřivené plochy na soudečcích. Proměnlivý poloměr ve směru kolmém na směr valení znesnadňuje zlepšení povrchu soudečků. Běžně používané obráběcí stroje neumožňují obrábět jiné než rovinné nebo válcové plochy s požadovanou přesností. Z tohoto důvodu je nutné navrhnout zařízení, díky kterému bude možné snížit povrchové nerovnosti na soudečcích na přijatelnou úroveň.



Obr. 2-1 Snímek neobrobené kuličky



Obr. 2-2 Snímek neobrobeného soudečku

2.2 Zhodnocení poznatků na základě současného stavu poznání

2.2

Z obráběcích metod, jejichž přehled je uveden v kapitole 1 se jeví jako nejvhodnější dokončovací metoda kombinace lapování a abrazivního leštění. Lapováním je možné dosáhnout drsnosti povrchu až $R_a = 50$ nm [8] a abrazivním leštěním až $R_a = 4$ nm [11]. Obě obráběcí metody je možné provádět buď čelem, nebo obvodem kotouče. V literatuře je častěji používáno abrazivní leštění čelem kotouče. Dále je pro obě metody možné navrhnout shodné konstrukční řešení stroje, rozdíl mezi metodami je pouze v použitém materiálu nástroje (tvrdý materiál pro lapování a měkký pro abrazivní leštění) a ve velikosti abrazivních částic ($3 \div 10$ μm pro lapování a menší než 1 μm pro abrazivní leštění [10]). Lapování soudečků tvrdým nástrojem by mělo sloužit k odstranění vlnitosti jejich povrchu a následující abrazivní leštění by mělo sloužit ke zlepšení drsnosti povrchu, která vznikne při lapování.

Ostatní obráběcí metody jsou nevhodné, protože jimi není možné dosáhnout požadované drsnosti povrchu. Při kombinaci různých metod s abrazivním leštěním by bylo nutné vyrobit dvě různá zařízení, protože ostatní metody se liší rozdílnou kinematikou při obrábění.

2.3 Cíl práce

Tato diplomová práce se zabývá návrhem metody pro zlepšení povrchové geometrie soudečků, které se používají pro měření v simulátorech elasto-hydrodynamického kontaktu.

Tyto soudečky jsou používány na Ústavu konstruování pro měření tenkého olejového filmu nekonformně zakřivených povrchů. Hlavním cílem práce je navrhnout a vyrobit zařízení, které bude schopné zpřesnit povrchovou geometrii soudečků.

Požadavky na zařízení:

- Finální vlnitost povrchu soudečků ≤ 25 nm,
- finální drsnost povrchu soudečků ≤ 10 nm,
- možnost dokončovat soudečky průměru 1" a elipticity $k = 2 \div 4$,
- možnost dokončovat soudečky se středícími důlky,
- možnost dokončovat soudečky s hřídelkou,
- maximální celkové náklady na výrobu a nákup součástí 30 000 Kč.

Dílní úkoly jsou:

- Návrh přípravků pro testování zvolených metod,
- výroba přípravků,
- testování zvolených metod,
- návrh lapovacího zařízení,
- výroba a montáž lapovacího zařízení,
- testování zařízení a ověření zadaných parametrů.

2.4 Časový plán práce

Výstupem této diplomové práce je funkční vzorek, který je nutno vyrobit a otestovat. Z tohoto důvodu byl vytvořen časový harmonogram, který je možné vidět na obr. 2-3. Praktická část práce byla rozdělena do třech hlavních etap. První etapou bylo testování zvolených obráběcích metod s cílem zjistit, jaké jakosti povrchu je jimi možné dosáhnout. Druhou hlavní etapou byl návrh leštícího zařízení. V této etapě byla zahrnuta dostatečná časová rezerva nutná pro výrobu součástí. Během této rezervy byl navržen a vytvořen řídicí systém. Poslední etapa byla věnována otestování a optimálnímu nastavení zařízení.

2014										2015				
III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	I.	II.	III.	IV.	V.
Studium problematiky														
Návrh přípravků														
Výroba dílů														
Testování metody														
Návrh finální konstrukce														
Návrh řídicí elektroniky														
Tvorba řídicího systému														
Výroba dílů														
Montáž														
Testování a optimalizace														
Tvorba textové části práce														

Obr. 2-3 Časový harmonogram práce

3 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Celkový rozpočet na realizaci funkčního vzorku by neměl přesáhnout částku cca 30 000 Kč. Z této částky budou realizovány následující položky:

- Výroba potřebných součástí,
- nákup motorů,
- nákup elektroniky,
- nákup potřebných polotovarů,
- nákup ložisek a spojovacího materiálu.

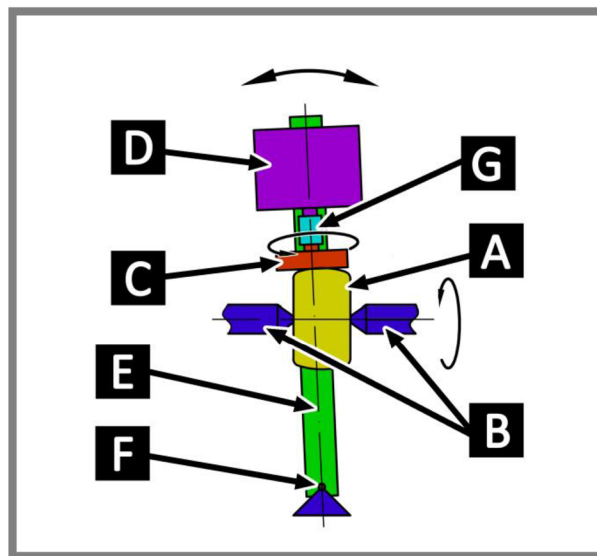
Tento rozpočet bylo nutné zohlednit již při návrhu zařízení.

3.1 Kinematika obrábění

Při volbě kinematiky obrábění je vhodné zajistit, aby se abrazivní částice pohybovaly náhodně mezi povrchem soudečku a nástroje. Pokud by se částice pohybovaly po stejných drahách, nedocházelo by ke zlepšení jakosti povrchu.

- Lapování čelem kotouče

Při lapování a abrazivním leštění čelem kotouče (obr. 3-1) je soudeček (A) upnut mezi hroty (B) a otáčí se okolo své osy. K jeho povrchu je přitlačován nástroj (C), který je poháněn motorem (D) a zároveň se kýve společně s pákou (E) okolo čepu (F). Pro přitlak nástroje k soudečku je použita pružina. Proto je nástroj uložen v kluzném pouzdru (G), které umožní, aby se nástroj zároveň otáčel a pohyboval ve směru osy rotace nástroje.

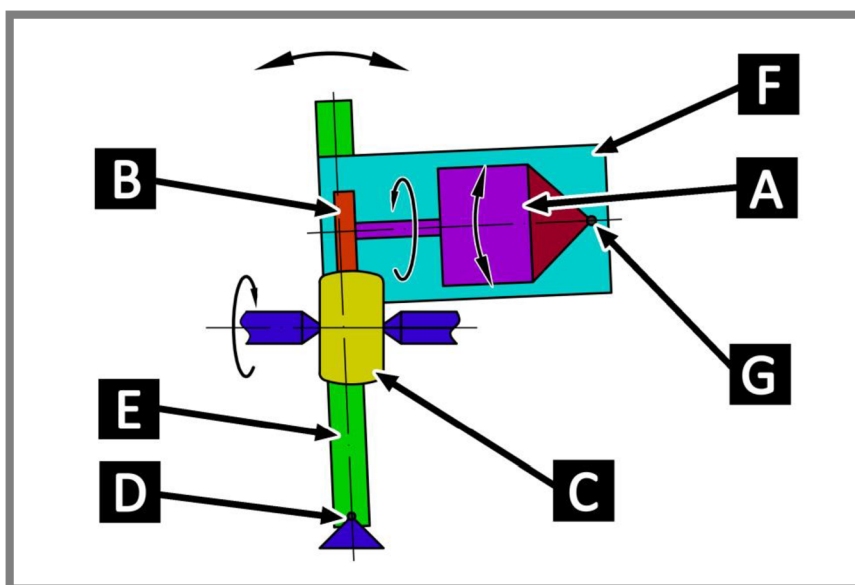


Obr. 3-1 Schéma pro lapování čelem kotouče

- Lapování obvodem

Rozdíl oproti předchozí variantě je zejména v uložení motoru (A), který pohání nástroj (B). Osa rotace nástroje je rovnoběžná s povrchem soudečku (C). Díky tomu je povrch soudečku v kontaktu s obvodem nástroje. Okolo čepu (D) se naklápí páka (E), ke které je připevněna základna motoru (F). Pro přitlačení nástroje k soudečku se motor i s nástrojem otáčí okolo čepu (G). Výhodou této varianty je dosažení vyšší

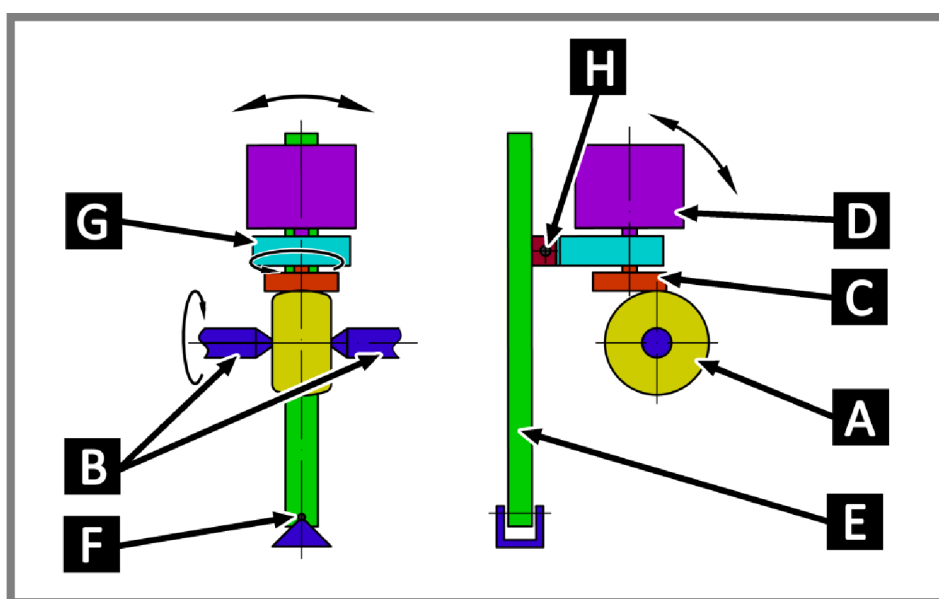
řezné rychlosti při zachování stejných otáček. Nevýhodou ovšem je složitější mechanismus pro přítlak nástroje k povrchu soudečku.



Obr. 3-2 Schéma pro lapování obvodem kotouče

- Přítlak pomocí kloubu

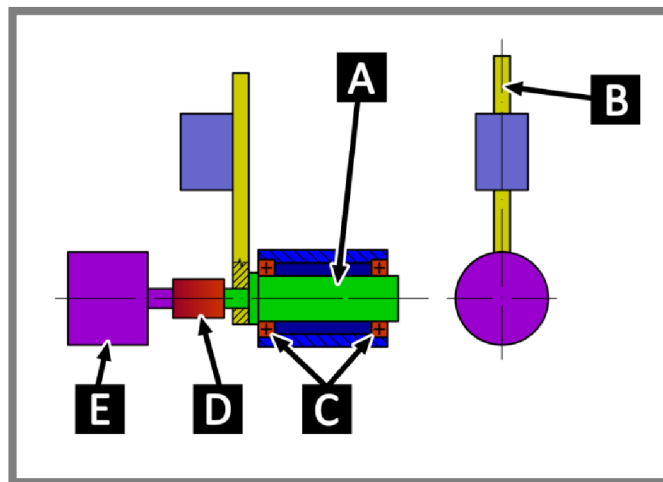
U této varianty (obr. 3-3) je soudeček (A) upnut mezi hroty (B) a otáčí se okolo své osy. K jeho povrchu je přitlačován nástroj (C), který je poháněn motorem (D) a zároveň se kýve společně s pákou (E) okolo čepu (F). Rozdíl oproti první variantě je ten, že se nástroj otáčí v ložisku, které je uloženo v tělesu (G), které se naklápí okolo čepu (H) pro zajištění přítlaku je těleso k povrchu soudečku přitlačováno zkrutnou pružinou.



Obr. 3-3 Přítlak pomocí zkrutné pružiny

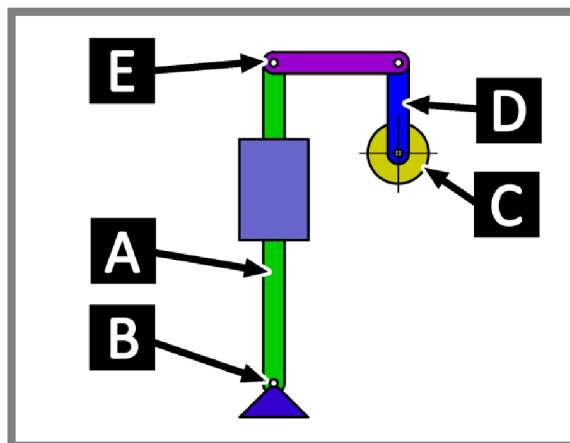
3.1.1 Polohování páky s nástrojem

Motor pro pohon páky, na které je připevněn nástroj, se nemusí otáčet o celých 360° podle zvoleného mechanismu pohonu páky. První varianta, která je na obr. 3-4 uvažuje spojení motoru s čepem na kterém je páka uložena. Čep (A), na kterém je nasazena páka (B) je otočně uložen v ložiscích (C). Pomocí spojky (D) je k čepu připojen motor (E), který otáčí čepem. Tato varianta je konstrukčně jednoduchá. Úhel natočení motoru pro tuto variantu by se pohyboval do 90° . Nevýhodou této varianty je vyšší krouticí moment, který je způsoben délkou páky a rozložením hmotnosti na ní. Další nevýhodou je nutnost snímání natočení motoru nebo polohy páky, aby nedošlo vlivem překmitu k poškození stroje.



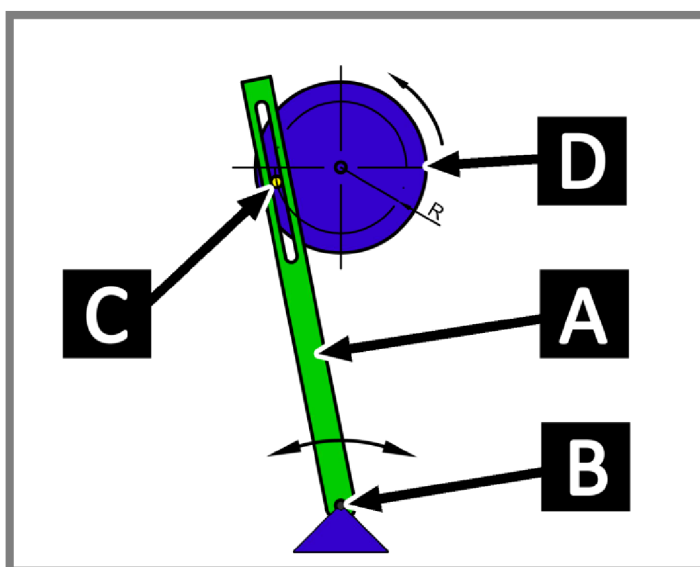
Obr. 3-4 Uložení páky na hřídel motoru

Druhá varianta je zobrazena na obr. 3-5. Jedná se o čtyř-kolbový mechanismus. Páka (A) je uložena na čepu (B) stejně jako v předchozím případě. K hřídeli motoru (C) je připevněna klikka (D). Ke spojení páky s klikou je použita další páka (E). Tato varianta je také konstrukčně poměrně jednoduchá. Její výhodou je snížení potřebného krouticího momentu. Ani v tomto případě by se motor neotáčel o 360° , ale podle velikosti jednotlivých pák do maximálního úhlu 180° . Nevýhodou je stejně jako u předchozí varianty nutnost snímat polohu páky nebo úhel natočení hřídele motoru.



Obr. 3-5 Čtyř-kolbový mechanismus

Třetí možností, jak přenést otáčivý pohyb motoru na kývavý pohyb páky, je použití kulisového mechanismu, který je zobrazen na obr. 3-6. Páka (A) je uložena na čepu (B) obdobně jako v předchozích případech. Rozdíl je v tom, že v páce je drážka, ve které se pohybuje čep (C), který se otáčí s kolem (D). U této varianty se motor může otáčet dokola stále stejným směrem. Nevýhodou ovšem je, že k tomu, aby se změnil úhel, o který se páka kýve na jednotlivé strany, je nutné přenastavit vzdálenost čepu (C) od osy otáčení disku. Směr, ve kterém se toto přenastavení musí provést, je vyznačen na obr. 3-6 jako souřadnice R. Další nevýhodou této varianty je proměnná rychlost páky a nemožnost nastavit různé úhly výkyvu na jednotlivé strany.



Obr. 3-6 Kulisový mechanismus

Tab. 3-1 Výhody a nevýhody jednotlivých možností pohonu páky

		Výhody	Nevýhody
Způsob přitlaku	Leštění čelem kotouče	<ul style="list-style-type: none"> Jednoduchá konstrukce 	<ul style="list-style-type: none"> Obtížnější výměna nástrojů
	Leštění obvodem kotouče	<ul style="list-style-type: none"> Snadnější výměna nástrojů Snadnější leštění celého povrchu soudečku 	<ul style="list-style-type: none"> Složitější vyvození přitlaku nástroje k soudečku
	Přítlak pomocí zkrutné pružiny	<ul style="list-style-type: none"> Snadnější výměna nástrojů 	<ul style="list-style-type: none"> Obtížné nastavení velikosti přitlaku
Pohon páky	Páka na hřídeli motoru	<ul style="list-style-type: none"> Jednoduchá konstrukce 	<ul style="list-style-type: none"> Vysoký krouticí moment Zpětná vazba polohy
	Čtyř-klobový mechanismus	<ul style="list-style-type: none"> Jednoduchá konstrukce 	<ul style="list-style-type: none"> Zpětná vazba polohy
	Kulisový mechanismus	<ul style="list-style-type: none"> Bez zpětné vazby 	<ul style="list-style-type: none"> Složitější konstrukce

Tab. 3-1 shrnuje výhody a nevýhody jednotlivých variant kinematického uspořádání. Na základě tohoto shrnutí se jako nejvhodnější jeví konstrukce, kdy je nástroj k povrchu soudečku přitlačován čelem a je uložen v kluzném pouzdru. Pro vyvození kývavého pohybu páky byl zvolen čtyř-kloubový mechanismus. Krouticí moment motoru pro tuto variantu je nižší než v případě, že by byl motor přímo připojen k čepu, okolo kterého se páka otáčí. Oproti variantě s kulisovým mechanismem je čtyř-kloubový mechanismus konstrukčně jednodušší.

3.2 Abrazivní médium

Proto, aby docházelo k úběru materiálu při lapování a abrazivním leštění je potřeba mezi soudeček a nástroj dopravovat leštící pastu (obr. 3-7), nebo leštící kapalinu (obr. 3-8), ve kterých jsou rozptýleny diamantové částice o různé zrnitosti, která se běžně pohybuje od 20 μm do 1 μm . Nevýhodou leštící pasty je její vysoká viskozita. Při nanesení pasty na nástroj a následném leštění se pasta rychle dostane mimo kontakt soudečku a nástroje. Nejčastěji se pasta hromadí na čelech soudečku a obvodu nástroje. Proto se musí proces přerušit a pasta se musí znova nanést do kontaktu. Další nevýhoda je vysoká cena balení několika gramů pasty.



Obr. 3-7 Leštící pasta



Obr. 3-8 Diamantová suspenze

Druhou možností je použití suspenze na bázi vody, ve které jsou rozptýleny diamantové částice. Viskozita této suspenze je téměř shodná s viskozitou vody. Díky tomu není nutné suspenzi nanášet na nástroj nebo na soudeček, ale je vhodnější ji dopravovat do místa styku nástroje a soudečku ze zásobníku. Při použití většího zásobníku na suspenzi navíc nedojde k tak rychlému znečištění suspenze. Tím naroste množství materiálu, který je možné odstranit bez výměny suspenze v zásobníku. Z těchto důvodů se jeví tato varianta jako vhodnější a byla použita při konstrukci.

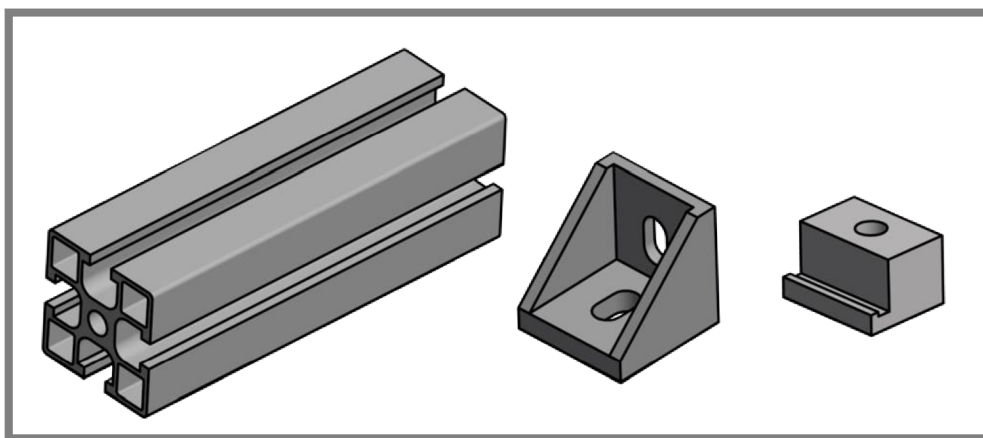
3.3 Nosný rám

Jedním z požadavků zadání je, aby zařízení bylo samostatné a nebylo nutné například připevňovat ke stolu. Jednou z možností je navrhnout zařízení tak, aby se skládalo z plechového krytování, které by zároveň sloužilo jako samonosný rám. Nevýhodou

této varianty by ovšem byla vysoká cena a složitost. Plechové krytování by muselo být vyrobeno velmi přesně a možnosti další modifikace by byly velmi omezené.

Druhou možností jak rám zkonstruovat je použití hutních profilů a rám svařit nebo sešroubovat. Oproti předchozí variantě by konstrukce byla jednodušší, levnější a do jisté míry modifikovatelná.

Jako finální varianta ovšem byl zvolen šroubovaný hliníkový konstrukční systém. Výběr součástí, ze kterých se tento systém skládá je zobrazen na obr. 3-9. Nejčastěji jsou používané čtvercové profily se čtyřmi drážkami, které se spojují pomocí úhelníků nebo pozičních spojek a šroubů se čtvercovými maticemi, které se vsunou do drážek v profilu. Díky tomu je možné na profily přišroubovat libovolné komponenty bez nutnosti profily obrábět. Dalším důvodem, proč byl zvolen tento systém, je jeho snadná modifikace díky výměně jednotlivých profilů.



Obr. 3-9 Součásti hliníkového konstrukčního systému Alutec

3.4 Volba typu motorů

Pro realizaci kinematiky, která je naznačena na obr. 3-1 je nutné použít minimálně tři motory. První pro pohon nástroje, druhý pro pohon soudečku a třetí, který bude kývat nástrojem okolo soudečku tak, aby se obráběl jeho povrch.

Z důvodu použití leštící kapaliny by měly být použity pro pohon nástroje i soudečku motory, jejichž otáčky nepřesahují 500 min^{-1} . S rostoucími otáčkami by se zvyšovalo množství kapaliny, která by byla rozstříkována do okolí, protože prostor okolo soudečku nemůže být utěsněn z důvodu jeho upnutí mezi otáčející se hroty. Protože v žádném zdroji, které se lapováním a abrazivním leštěním zabývaly, nebyly nalezeny přímo řezné podmínky, je žádoucí, aby tyto motory měly vysoké rozpětí pracovních otáček pokud možno s konstantním krouticím momentem.

3.4.1 Motor pro pohon soudečku a nástroje

Podle navržené kinematiky se musí oba tyto motory kontinuálně otáčet. Z důvodu potřeby nižších otáček nejsou asynchronní motory příliš vhodnou volbou. Jsou určeny častěji pro vyšší zatížení (řádově kW) a vyšší otáčky než požadovaných 500. Jejich regulace se nejčastěji provádí frekvenčními měniči, jejichž cena může dosahovat i desítek tisíc korun.

Druhou možností je použití stejnosměrného motoru s převodovkou. Jejich výhodou oproti asynchronním motorům je jejich snadnější regulace. Otáčky motoru jsou přibližně přímo úměrné velikosti stejnosměrného napětí, kterým je napájeno rotorové vinutí. Proto se dají tyto motory snadno řídit PWM regulací. Nevýhodou těchto motorů ovšem je, že otáčky s rostoucím momentem zátěže klesají. Nevýhodou také je jejich vyšší cena. Motor je nutné koupit dohromady s převodovkou, protože jmenovité otáčky motoru se pohybují v řádu několika tisíc.

Další možností je použití elektronicky komutovaných motorů. Od stejnosměrných motorů se liší tím, že jejich vinutí, které je umístěno ve statoru, je napájeno v závislosti na poloze rotoru. Pro napájení se proto používá tranzistorový měnič, který přebírá funkci komutátoru stejnosměrného motoru. Nevýhodou těchto motorů je nutnost snímat úhel natočení rotoru a v závislosti na něm řídit tranzistorový měnič. Z toho plyne i vyšší cena oproti stejnosměrným motorům. Základní cena motoru s převodovkou je přibližně stejná, ovšem je k motoru nutno pořídit řídicí jednotku, jejíž pořizovací cena se pohybuje v řádu několika tisíc.

Poslední uvažovanou variantou je použití krokových motorů. Jejich výhodou je jejich nízká pořizovací cena, která se pohybuje v řádu stovek až tisíců korun. Další výhodou jsou jejich pracovní otáčky, které se běžně pohybují od 0 do 300 s téměř konstantním momentem. Pokud otáčky dále rostou, dochází ke snižování momentu motoru. Z toho vyplývá, že není nutné motor kupovat společně s převodovkou. Pro řízení krokových motorů se používá velké množství driverů, jejichž cena se pohybuje v řádu desítek až tisíců korun. Zejména díky rozvoji 3D tiskáren, které využívají krokové motory, došlo i k rozvoji levnějších driverů pro krokové motory. Díky tomu je možné pořídit motor i s driverem podstatně levněji, než u předchozích variant pohonů [18].

Přehled výhod a nevýhod všech uvažovaných motorů je uveden v tab. 3-2. Z tohoto srovnání se jako nejvhodnější jeví krokové motory. Hlavním důvodem této volby je nízká pořizovací cena motorů a driverů a možnost používat motory bez převodovek.

Tab. 3-2 Přehled pohonů uvažovaných pro pohon nástroje a soudečku

Typ motoru	Výhody	Nevýhody
Asynchronní motor	<ul style="list-style-type: none"> • vysoký moment 	<ul style="list-style-type: none"> • nutnost použít převodovku • vysoká cena • řízení měničem frekvence
Stejnoseměrný motor	<ul style="list-style-type: none"> • Snadné řízení 	<ul style="list-style-type: none"> • nutnost použít převodovku • vysoká cena
Elektronicky komutovaný motor	<ul style="list-style-type: none"> • zpětná vazba otáček 	<ul style="list-style-type: none"> • nutnost použít převodovku • vysoká cena • řízení elektronickým komutátorem
Krokový motor	<ul style="list-style-type: none"> • použití bez převodovky • nízká cena • dostupnost driverů 	<ul style="list-style-type: none"> • nutnost vlastního řízení driverů

3.4.2 Motor pro naklápění páky

Z důvodu použití čtyř-kolbového mechanismu pro pohyb páky je nutné použít motor, který má spojitě odměřování polohy, nebo použít jiný systém, který by dokázal měřit polohu kývajících se páky a v závislosti na úhlu výkyvu motor řídit. Rychlost motoru by měla být taková, aby se páka s nástrojem pohybovala do dvaceti zdvihů za minutu.

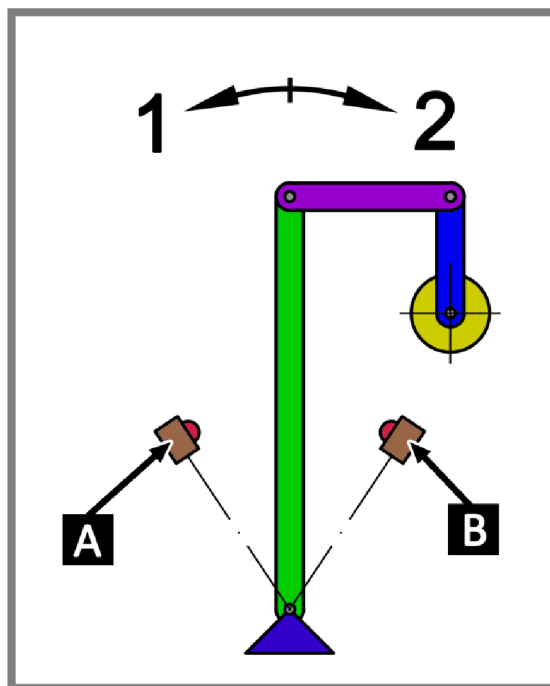
Jednou z možností je použít modelářské servo, které je na obr. 3-10. Tyto serva se používají v dálkově ovládaných modelech například pro přesné nastavení natočení plachet u modelů plachetnic. Modelářská serva jsou řízena analogově nebo digitálně. Uvnitř je motor, převody a řídicí elektronika, která snímá úhel natočení výstupní hřídele serva a podle řídicího signálu nastavuje její správnou polohu. Na výstupní hřídeli je drážkování, díky kterému je možné na ni nasazovat různé páky, které v sobě mají díry a umožňují tak serva snadno připojovat k součástem, kterými mají otáčet.



Obr. 3-10 Modelářské servo

Další možností je použití stejnosměrného motoru s převodovkou a snímači krajní polohy páky. Princip snímačů je patrný ze schématu na obr. 3-11. Motor pohybuje pákou směrem 1, dokud se nedotkne snímače (A). Poté se změní směr otáčení motoru, dokud se páka nedotkne snímače (B). Mezi snímači se motor bude vždy otáčet konstantní rychlostí. Jako koncové snímače navíc mohou být použity mechanické spínače, které jsou levné. Pro řízení rychlosti motoru by poté bylo vhodné použít tranzistor v režimu spínače řízený PWM signálem. Nevýhodou této varianty je, že poloha páky je známa pouze ve dvou bodech, a že pro různé požadované úhly, o které se má páka naklápět bude vždy nutné ručně přenastavit polohu spínačů tak, aby se leštila pokud možno co největší část povrchu soudečku.

Z těchto dvou variant se jako vhodnější jeví použití modelářského serva. Důvodem pro tuto volbu je zejména nižší cena oproti stejnosměrným motorům, kompaktnější rozměry a snadnější připojení motoru k rámu stroje i k pákám čtyř-kolbového mechanismu. Dalším důvodem pro tuto volbu je uživatelsky přívětivější nastavení úhlu výkyvu.

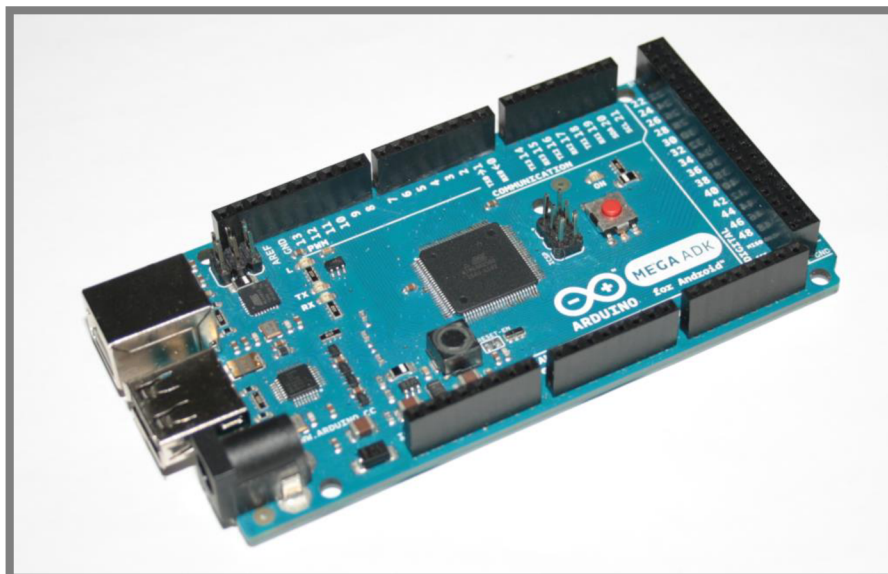


Obr. 3-11 Snímače krajní polohy

3.5 Návrh řídicí elektroniky

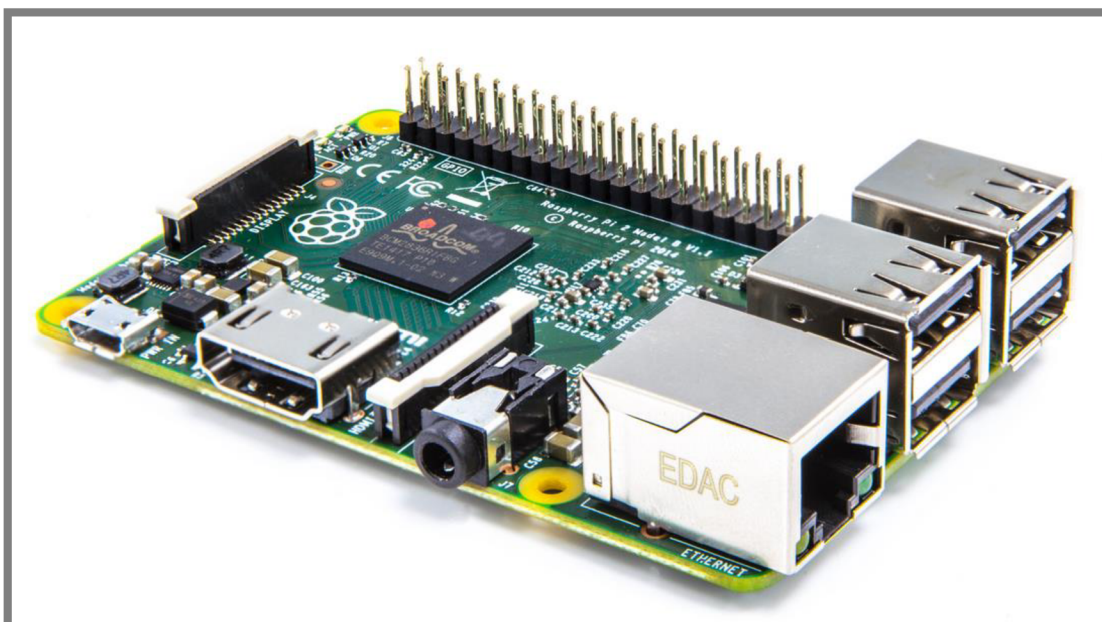
Jedna z dalších výhod krokových motorů je, že se vlastně jedná o synchronní motory, které je možné řídit bez zpětné vazby. Na jejich statoru bývá navinuto dvou nebo více fázových vinutí, které je napájeno stejnosměrným proudem. Pro řízení krokových motorů se používá více druhů driverů, které bývají programovány prostřednictvím počítače. Výhodou tohoto ovládání je jednoduché a přehledné rozhraní. Nevýhodou bývá jejich vyšší cena. Jedním z požadavků zadání ovšem je, aby zařízení mohlo pracovat samostatně bez připojování k počítači. Z tohoto důvodu je nutné použít pro řízení driverů některou z dostupných platforem, kterou je možné programovat.

V současné době je jednou z často používaných mikroprocesorových platforem Arduino, které je zobrazeno na obr. 3-12. Arduino desky jsou často používány pro ovládání RepRap 3D tiskáren. Jedná se o desku, kterou je možné připojit k počítači pomocí USB kabelu a nahrát do ní vlastní program. Díky dutinkovým lištám, které jsou na stranách Arduina je možné připojovat další zařízení jako senzory, displeje, motory nebo mechanické spínače. Výhodou této platformy je jednoduché programování, snadné zapojení, nízká cena a velké množství dostupných programových knihoven, které jsou součástí programovacího rozhraní Arduino IDE. Další předností je možnost použití pulzně šířkové modulace na některých pinech. Díky tomu je možné přímo řídit modelářské servo, které bylo zvoleno pro naklápění páky.



Obr. 3-12 Arduino Mega 2560 R3

Alternativou k Arduino je platforma Raspberry Pi, která je zobrazena na obr. 3-13. Oproti Arduino disponuje vyšším hardwarovým výkonem, díky tomu je možné do Raspberry nahrát jednu z upravených distribucí Linuxu, připojit myš, klávesnici, monitor a síťový kabel. Vytvářené zařízení by poté mohlo být ovládáno takto sestaveným počítačem. Nevýhodou Raspberry oproti Arduino je menší množství pinů na které se připojují vlastní zařízení. Další nevýhodou této platformy je její vyšší cena a menší komunita věnující se projektům využívající tuto platformu [21].



Obr. 3-13 Raspberry Pi 2 [21]

Díky tomu, že Arduino je Open-Source projekt, je možné používat všechna schémata a zdrojové kódy pod licenci Creative Commons. Díky tomu vzniká mnoho napodobenin desek Arduino. Jednou z nich je deska Induino. Jedná se o čínskou na-

podobeninu, která má však oproti originální desce podstatně nižší cenu. Z tohoto důvodu se Induino jeví jako nejvhodnější varianta.

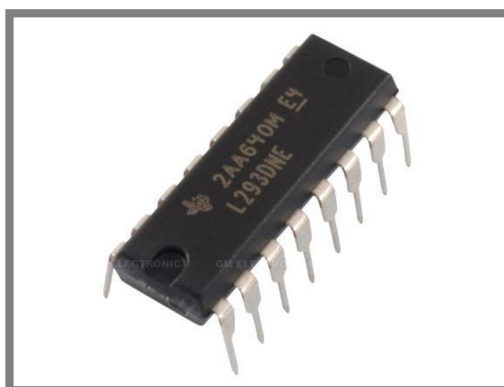
Tab. 3-3 Přehled mikroprocesorových jednotek uvažovaných pro řízení

Název	Výhody	Nevýhody
Arduino	<ul style="list-style-type: none"> • nízká cena • dostupné knihovny • PWM regulace 	<ul style="list-style-type: none"> • menší výpočetní výkon
Raspberry	<ul style="list-style-type: none"> • možnost připojit klávesnici myš a monitor • vyšší výpočetní výkon 	<ul style="list-style-type: none"> • vyšší cena

3.5.1 Řízení krokových motorů

Vinutí krokových motorů bývá napájeno obdélníkovým napětím, které má často velikost $12 \div 48$ V a proud od 0,3 A pro motory s kroučícím momentem pod 0,3 Nm až do několika ampér pro výkonnější motory. Z tohoto důvodu Arduino nedokáže přímo ovládat krokové motory, protože piny, které jsou na Arduinu mají napětí 5 V a proud 40 mA. Proto se používají drivery, do kterých Arduino posílá signály o tom, jak vysokým napětím má napájet příslušné vinutí krokového motoru [19, 20].

Nejjednodušším driverem je integrovaný obvod L293D, který je zobrazen na obr. 3-14. Výhodou tohoto driveru je především jeho nízká cena, která je přibližně 50 Kč. Pro řízení tohoto driveru je možné přímo použít knihovnu Stepper.h, kterou obsahuje Arduino IDE. Jeho zásadní nevýhodou ovšem je maximální velikost proudu, kterým mohou být napájeny motory. Ten dosahuje maximální hodnoty 0,6 A na fázi se špičkovým proudem 1,2 A. Z tohoto důvodu by tímto driverem mohly být napájeny pouze motory s menším kroučícím momentem. Další nevýhodou tohoto integrovaného obvodu je, že nedokáže regulovat velikost proudu pro napájení motoru. Proto by do obvodu mezi integrovaný obvod a napájecí zdroj musel být zařazen regulátor proudu [22].



Obr. 3-14 Integrovaný obvod L293D [22]

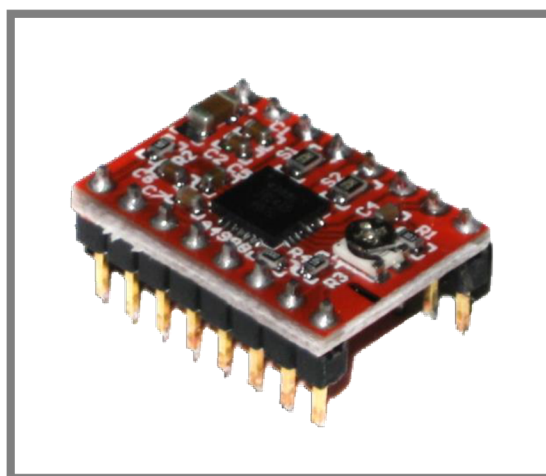
Další možností pro řízení je použití integrovaného obvodu L298N, který je obdobou integrovaného obvodu L293D, s tím rozdílem, že dokáže napájet motory trva-

le proudem 2 A, špičkově až proudem 3 A na každý kanál. Integrovaný obvod je možné zakoupit napájený na plošném spoji, jak je vidět na obr. 3-15. Plošný spoj rovnou obsahuje pasivní chladič a svorkovnice s kolíky pro snadné připojení motoru, zdroje a řídicí jednotky. Programování je stejné jako u předchozí varianty s využitím knihovny Stepper.h. Zásadní nevýhoda ovšem je nemožnost přímé regulace proudu, kterým jsou motory napájeny [28].



Obr. 3-15 Integrovaný obvod L298N

Třetí alternativou je driver, který se často používá pro řízení motorů v RepRap 3D tiskárnách. Jedná se o driver Polu A4988, který je zobrazen na obr. 3-16. Oproti předchozím variantám umožňuje tento driver zapnout mikro-krokování motorů. To znamená, že motor, který má konstrukčně dáno 200 kroků na otáčku se bude chovat, jakoby měl kroků až šestnáctkrát více, tedy 3 200 kroků na otáčku. Díky tomu se zpřesní polohování a zjemní chod motorů. Další podstatnou výhodou driveru je přímé nastavení proudu, kterým jsou napájeny motory pomocí trimru, který se nachází na driveru. Díky tomu nemusí být proud nijak regulován a driver může být napájen přímo ze zdroje. Maximální proud, kterým mohou být motory napájeny, je 2 A. Nevýhodou ovšem je odlišný způsob řízení, oproti předchozím typům driverů. Pro řízení tohoto driveru by totiž musela být vytvořena vlastní knihovna nebo podprogram [20].



Obr. 3-16 Driver Polu A4988 pro krokové motory

Z porovnání jednotlivých driverů, které je uvedeno v tab. 3-4 se jako nejvhodnější varianta jeví driver Polu A4988. Zejména proto, že jím je možné přímo regulovat proud pro napájení motorů a tím se celkově zjednoduší zapojení elektroniky. Zároveň se jedná o nejlevnější variantu právě proto, že k integrovaným obvodům L293D a L298N je nutné zakoupit i regulátor proudu.

Tab. 3-4 Srovnání driverů pro krokové motory

Název	Výhody	Nevýhody
L293D	<ul style="list-style-type: none"> • nízká cena • snadné řízení 	<ul style="list-style-type: none"> • nemožnost přímo regulovat proud • nízký proud na výstupu • nutnost napájet na vlastní plošný spoj
L298N	<ul style="list-style-type: none"> • vysoký proud na výstupu • Snadné připojení 	<ul style="list-style-type: none"> • vysoká cena • nemožnost přímo regulovat proud
Polu A4988	<ul style="list-style-type: none"> • přímá regulace proudu • vysoký proud na výstupu • možnost mikro-krokování • nízká cena 	<ul style="list-style-type: none"> • složitější řízení • nutnost napájet na vlastní plošný spoj

4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Po zvolení kinematiky obrábění byl nejprve navržen přístup, aby mohla být ověřena přesnost zvolené kombinace obráběcích metod. Po testech následovala práce na samostatném zařízení, návrhu pohonů a tvorbě řídicí elektroniky.

4.1 Ověřovací experiment

4.1

Pro ověření přesnosti metody byly vyrobeny dva nástroje. První je vyroben z kalené oceli pro lapování a je zobrazen na obr. 4-1. Druhý nástroj, který je na obr. 4-2, je vyroben z polyamidu PA6. Oba tyto nástroje byly upnuty do vrtačky pomocí přípravku, který je zobrazen na obr. 4-3. Nástroje jsou s přípravkem spojeny pomocí šroubu a kolíku, který zároveň zabraňuje prokluzu nástroje vůči přípravku.



Obr. 4-1 Kalený nástroj

Obr. 4-2 Nástroj z polyamidu

Obr. 4-3 Unašeč

Soudeček byl upnut do soustruhu (obr. 4-4), který se nachází v dílně Ústavu konstruování. Soudeček i nástroj se otáčely okolo své osy. Díky tomu byla shodná kinematika s výslednou konstrukční variantou. Bylo provedeno několik sérií leštění. Nejprve byl povrch lapován ocelovým nástrojem s leštícími pastami se zrnitostí 10 μm a 3 μm . Poté byl povrch leštěn nástrojem z polyamidu s leštící pastou o zrnitosti 1 μm .



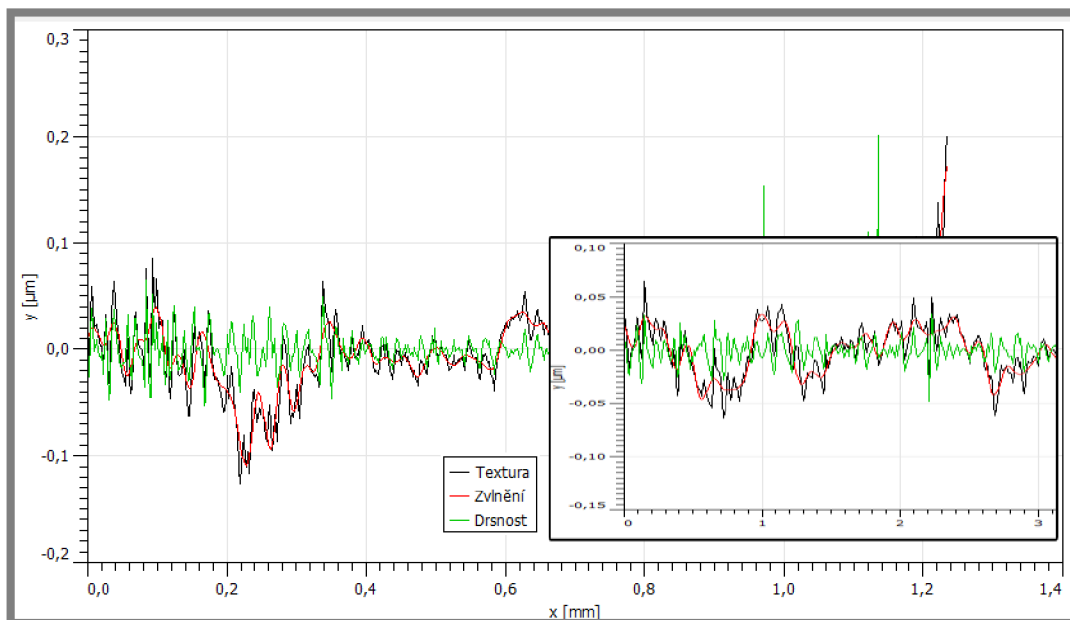
Obr. 4-4 Soustruh v dílně ÚK

Po leštění byl naskenován povrch soudečku pomocí optického profilometru. V tab. 4-1 jsou uvedeny hodnoty vlnitosti a drsnosti, které byly na soudečku naměřeny po jednotlivých leštěních. Z naměřených hodnot je vidět, že dochází k výraznému snížení vlnitosti i drsnosti profilu.

Tab. 4-1 Parametry dosažené po lapování a leštění

Měření	Ra (nm)	Wa (nm)
Před leštěním	64,0	78,0
Po 1. leštění	15,3	26,9
Po 2. leštění	10,5	16,8

Na obr. 4-5 jsou porovnány struktury profilu po prvním (spodní graf) a druhém (horní graf) leštění povrchu. Oba grafy mají na ose y, která udává výšku povrchových nerovností, stejné měřítko. Z grafu je také patrné, že dochází ke snížení nerovností.



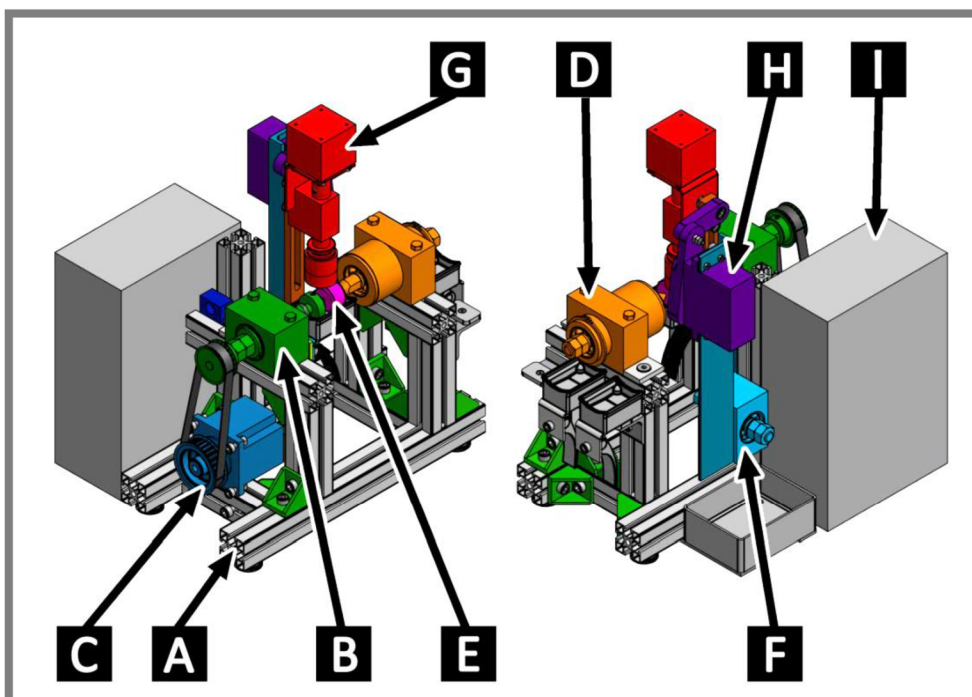
Obr. 4-5 Porovnání povrchu po prvním a druhém leštění

Díky provedení těchto testů bylo ověřeno, že kombinací lapování a abrazivního leštění je možné dosáhnout požadované drsnosti povrchu. Proto mohla pokračovat práce na samotném zařízení.

4.2 Popis konstrukce

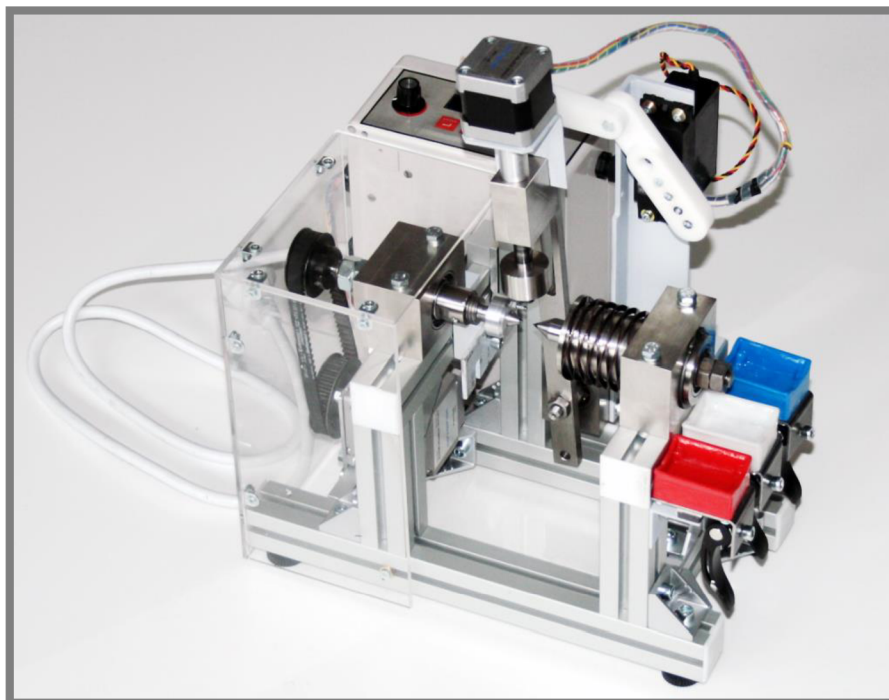
Model výsledného zařízení je vidět na obr. 4-6. Zařízení se skládá z několika podstav. Základ tvoří rám (A), který je sešroubován z hliníkových profilů. Na rámu je přišroubován domek (B), ve kterém je uložen hrot poháněný motorem (C) pomocí ozubeného řemene. Naproti poháněnému hrotu je přišroubován druhý domek (D). V něm je uložena vložka, která se může axiálně posouvat a zajišťuje tak správné upevnění soudečku (E). Pro vyvození přítlaku je použita vlnovcová pružina zvolená tak, aby bylo možné soudečky upínat pouze rukou. V domku (F) je uložen čep, okolo

kterého se kýve páka společně s podsestavou nástroje a motoru (G), který jej pohání. K polohování páky s nástrojem je použito servo (H). K rámu je také připevněna průmyslová plastová krabice (I), ve které je uložena ovládací elektronika.



Obr. 4-6 Model výsledného zařízení

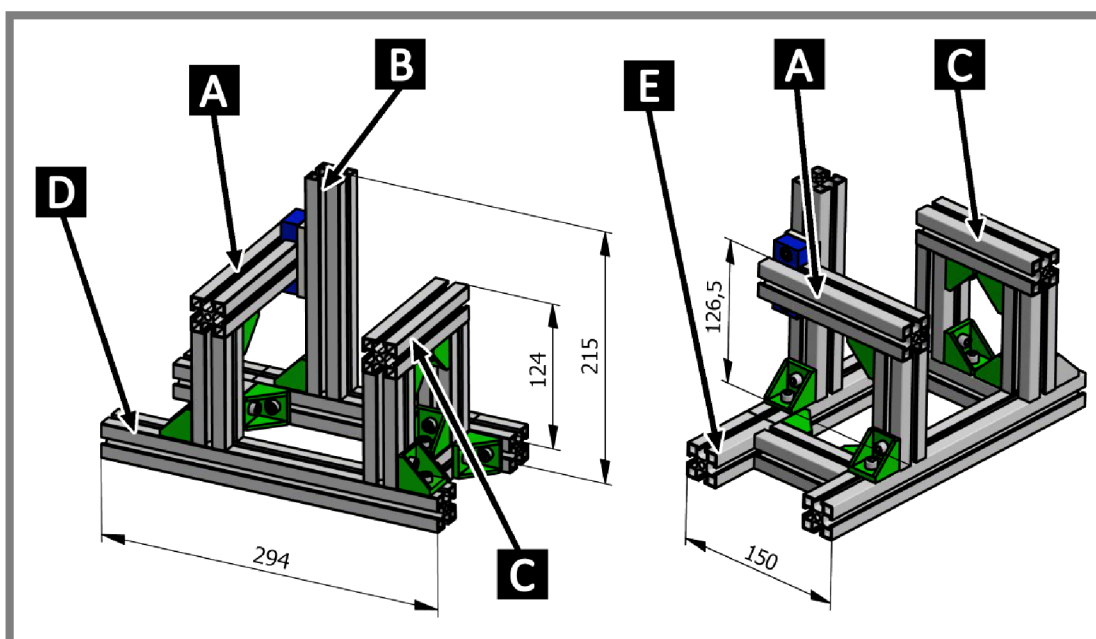
Sestavené zařízení je možné vidět na obr. 4-7. Jednotlivé komponenty jsou detailněji popsány v následujících podkapitolách.



Obr. 4-7 Sestavené zařízení

4.2.1 Nosný rám

Celý rám je sešroubován z hliníkových profilů firmy ALUTEC K&K a.s. Pro rám byly zvoleny profily o velikosti 30 × 30 mm se čtyřmi drážkami. Profily o velikosti 30 mm byly zvoleny z důvodu jejich dostatečné tuhosti a zároveň nízké váze a ceně. Podstava rámu je vidět na obr. 4-8. Na obrázku jsou vyznačeny maximální rozměry rámu, které jsou 294 × 150 × 215 mm. Většina spojů jednotlivých profilů je provedena pomocí dvanácti úhelníků o rozměru 28 × 28 mm se šrouby M6 a čtvercovými maticemi, které přesně odpovídají velikosti drážky v profilu. Tyto úhelníky jsou na obrázku vyznačeny zelenou barvou. Výjimkou je spojení profilů (A) a (B). Pro jejich spojení jsou použity dvě poziční spojky, které jsou označeny modrou barvou. Hroty, mezi které je soudeček upnut, jsou uloženy v domcích, které se přišroubují na profily (A) a (C). Tyto profily jsou zvednuty od spodní roviny rámu o 124 mm a 126,5 mm, z důvodů, které jsou popsány v kapitole 4.2.4.



Obr. 4-8 Nosný rám

Do drážek v profilech (D) a (E) jsou přišroubovány stavitelné patky, které jsou na obr. 4-9. Patky zajišťují stabilitu rámu a navíc díky tomu, že jsou plastové zabrání poškrábání stolu, na kterém bude zařízení umístěno.



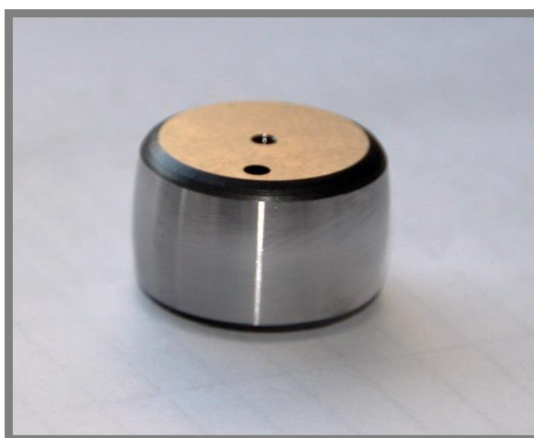
Obr. 4-9 Stavěcí patky

4.2.2 Uložení poháněného hrotu

Jedním z požadavků zadání je, aby zařízení umožňovalo upnutí soudečků se středí-
cími důlky (obr. 4-10) i soudečků s hřídelkou (obr. 4-11). Podsestava poháněného
hrotu je snadno modifikovatelná, aby bylo možné upnout oba typy soudečků.

Soudečky se středí-
cími důlky se používají pro měření, při kterém dochází mezi
soudečkem a diskem k čistému valení. Z důvodu technologie výroby mají tyto sou-
dečky unášecí důlek, který je použit pro přenos otáčivého pohybu z motoru na sou-
deček.

Soudečky s hřídelkou jsou používány pro měření podmínek panujících
v eliptickém kontaktu za podmínek, při kterých nedochází k čistému odvalování sou-
dečku po disku. Z tohoto důvodu je součástí soudečku hřídelka, kterou je soudeček
uložen v ložiscích, a na její konec je připojena spojka přenášející při měření kroutící
moment z motoru na soudeček.

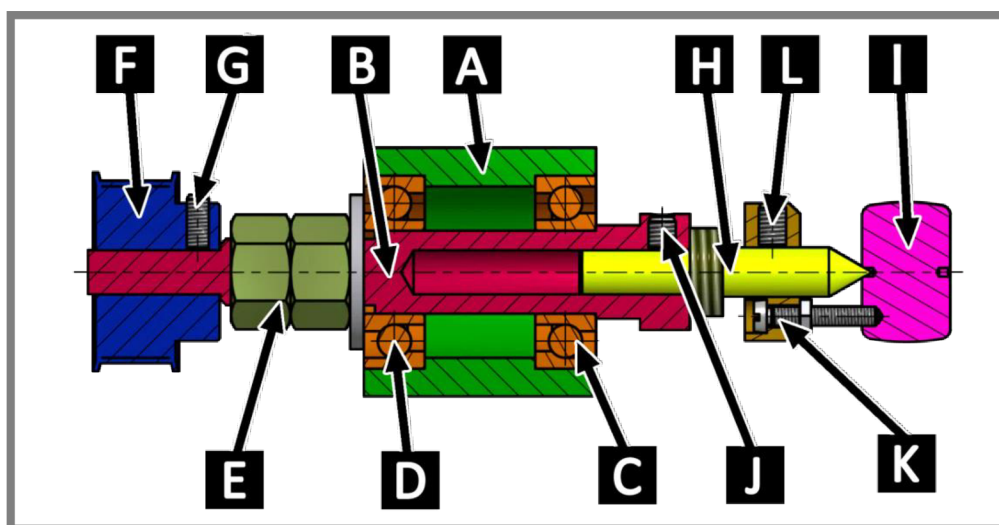


Obr. 4-10 Soudeček se středí-
cími důlky



Obr. 4-11 Soudeček s hřídelkou

Podsestava pro upnutí soudečků se středí-
cími důlky je vidět na obr. 4-12. Celá
tato podsestava je přišroubována přímo k rámu pomocí dvou šroubů. V domečku (A)
jsou vyfrézovány díry, do kterých jsou vnější kroužky zalisována ložiska 7204.
Jedná se o ložiska s kosoúhlým stykem, která jsou uložena do O.

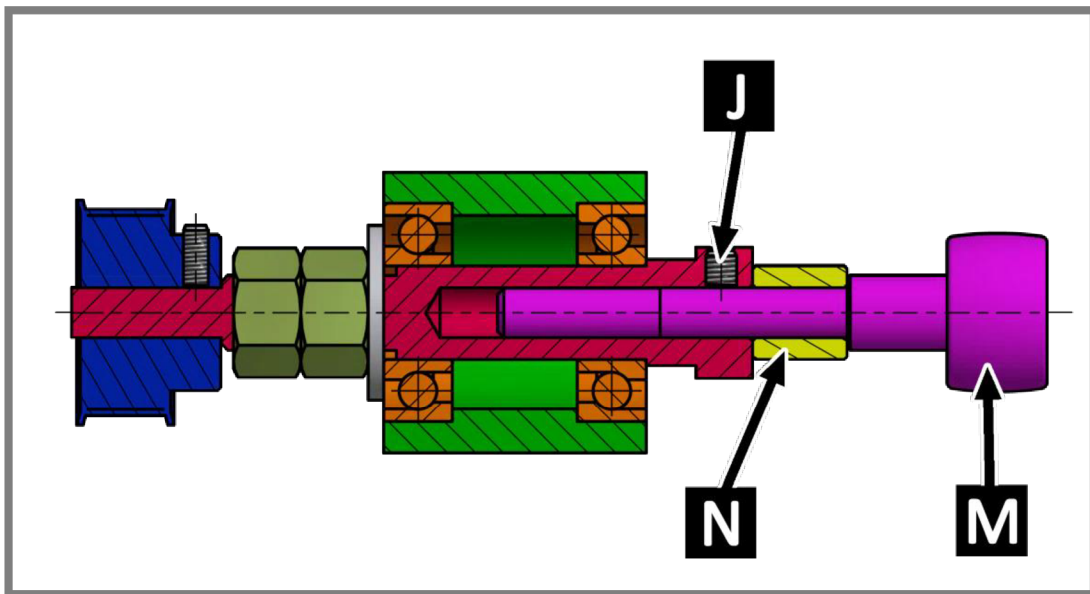


Obr. 4-12 Uložení poháněného hrotu

V ložiscích je uloženo vřeteno (B), které má na jedné straně osazení, o které se opírá vnitřní kroužek ložiska (C). Na druhé straně vřetena je závit na kterém jsou našroubovány dvě matice (E), které se opírají o vnitřní kroužek ložiska (D). Pomocí těchto matic je v ložiscích vymezena vůle, aby bylo uložení dostatečně tuhé a přesné. Na vřeteno je nasazena ozubená řemenice (F), která je pojištěna pomocí stavěcího šroubu M4 (G). Na řemenici je přiváděn krouticí moment od motoru, který je uložen na rámu pod domečkem.

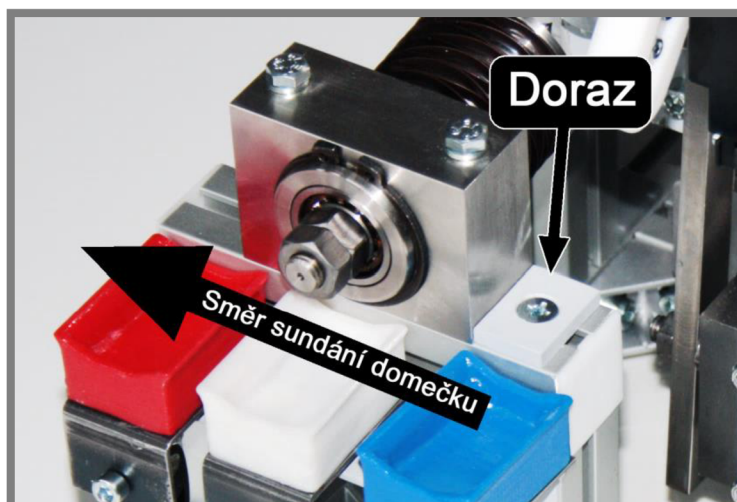
Otvor ve vřetenu (B) slouží k uložení hrotu (H), který podpírá soudeček (I) jak je vidět na obr. 4-12. K pojištění hrotu proti otáčení vůči vřetenu slouží stavěcí šroub M5 (J) zašroubovaný ve vřetenu. Na hrotu je nasazen unašeč (K) pojištěný také stavěcím šroubem M5 (L). V unašeci je zašroubován šroub M3, který zapadá do unašecího důlku v soudečcích.

Pro upnutí soudečku s hřídelkou je nutné z rámu nejprve sundat podsestavu přítlačného hrotu (viz kapitola 4.2.3), která je k rámu připevněna pomocí dvou šroubů. Princip upnutí soudečku s hřídelkou je patrný z obr. 4-13. Nejprve je nutné povolit stavěcí šroub (J) a vytáhnout hrot. Pro jeho snadnější uvolnění z vřetene je na hrotu závit, který hrot vytáhne poté, co se na něj našroubuje matice. Do otvoru ve vřetenu je poté možno vsunout soudeček s hřídelkou (M) a znovu jej pojistit pomocí stavěcího šroubu (J). Proto, aby střed soudečku s hřídelkou byl ve stejné vzdálenosti jako střed soudečku se středíci dílky, je na hřídelce soudečku nasazen distanční kroužek (N). Pro návrh upnutí tohoto typu soudečku byl použit výkres, který kreslil Ing. Frýza, jednoho z již vyrobených soudečků. Tento výkres je odevzdán společně s výkresovou dokumentací s číslem dokumentu TRI-SUD-K=2.5.



Obr. 4-13 Uložení soudečku s hřídelkou

Díky hřídelce není nutné podepírat tento soudeček hrotem z druhé strany. Proto, aby byla sestava přítlačného hrotu vždy přimontována na stejné místo a oba hroty byly naproti sobě, je k rámu připevněn doraz (obr. 4-14), na který je domeček doražen. Doraz je k rámu také připevněn pomocí matice umístěné v drážce profilu. Na obrázku je naznačen směr, kterým je možné domeček sundat. V tomto směru také zamezuje doraz pohybu domečku.

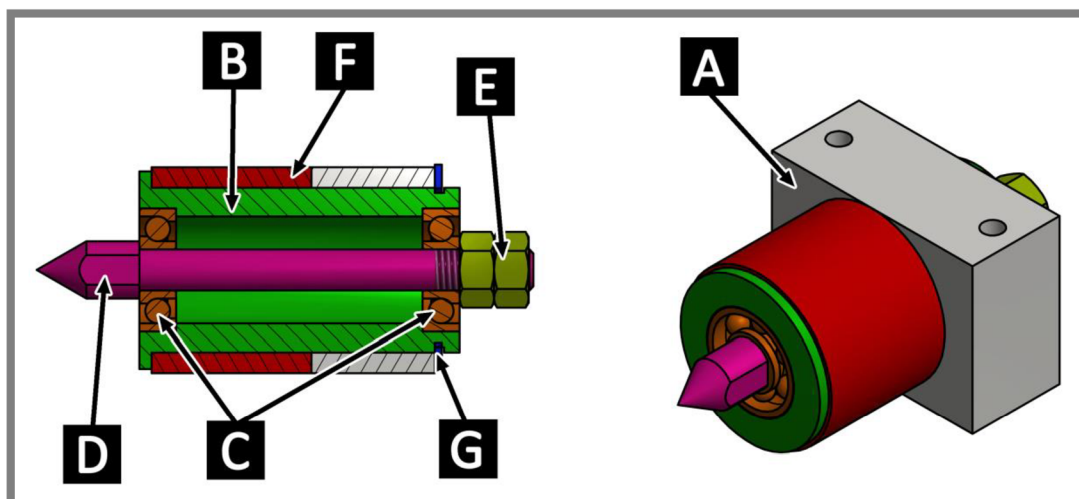


Obr. 4-14 Umístění dorazu na rámu

4.2.3 Uložení přítlačného hrotu

4.2.3

Podsestava uložení přítlačného hrotu je zobrazena na obr. 4-15. Tato podsestava je přišroubována k rámu dvěma šrouby, které se prostrčí do děr v domečku (A). V tomto domečku je kluzně uložena vložka (B), která se může axiálně pohybovat. Uvnitř vložky jsou nalisována ložiska 7200. Jsou to ložiska s kosoúhlým stykem (C), která jsou uložena do O. V ložiscích je uložen hrot (D), který podepírá soudeček z druhé strany. Na tomto hrotu jsou odfrézovány plošky pro klíč 12 mm proto, aby mohla být přesně vymezena vůle v ložiscích. Toto vymezení vůle bylo provedeno po nalisování ložisek dotažením matic (E).



Obr. 4-15 Přítlačný hrot

Na vložce je nasazena vlnovcová pružina o vnitřním průměru 40 mm (F), která je zobrazena na obr. 4-16. Pružina zajišťuje přítlak hrotu k soudečku. Jedná se o tlačnou vlnovcovou pružinu firmy Smaley, která je vinuta z plechového pásu. Důvodem pro použití této pružiny je její vysoký poměr L_0/L_9 , kde L_0 je volná délka a L_9 je dél-

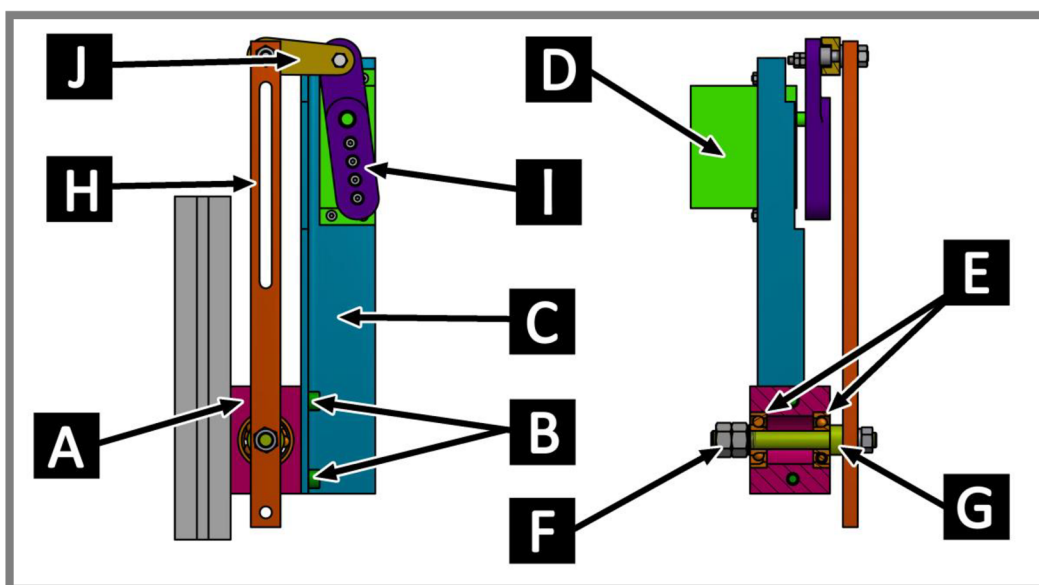
ka, kdy dosedají jednotlivé závity na sebe. Tuhost pružiny byla zvolena tak, aby upnutí soudečku mezi hroty mohlo být provedeno pouze rukou. Upnutí se provede zatlačením celé vložky směrem proti vlnovcové pružině. Poté se umístí soudeček tak, aby hroty zapadaly do středících důlků a šroubem v unašeci do unášecího důlku. Proto, aby vložka nemohla vypadnout z domečku, nebo aby do sebe upínací hroty nenarazily, je na vložce vysoustružená drážka pro pojistný kroužek (G), který tomu zabrání.



Obr. 4-16 Vlnovcové pružiny firmy Smaley

4.2.4 Uložení čepu, na kterém je páka s nástrojem

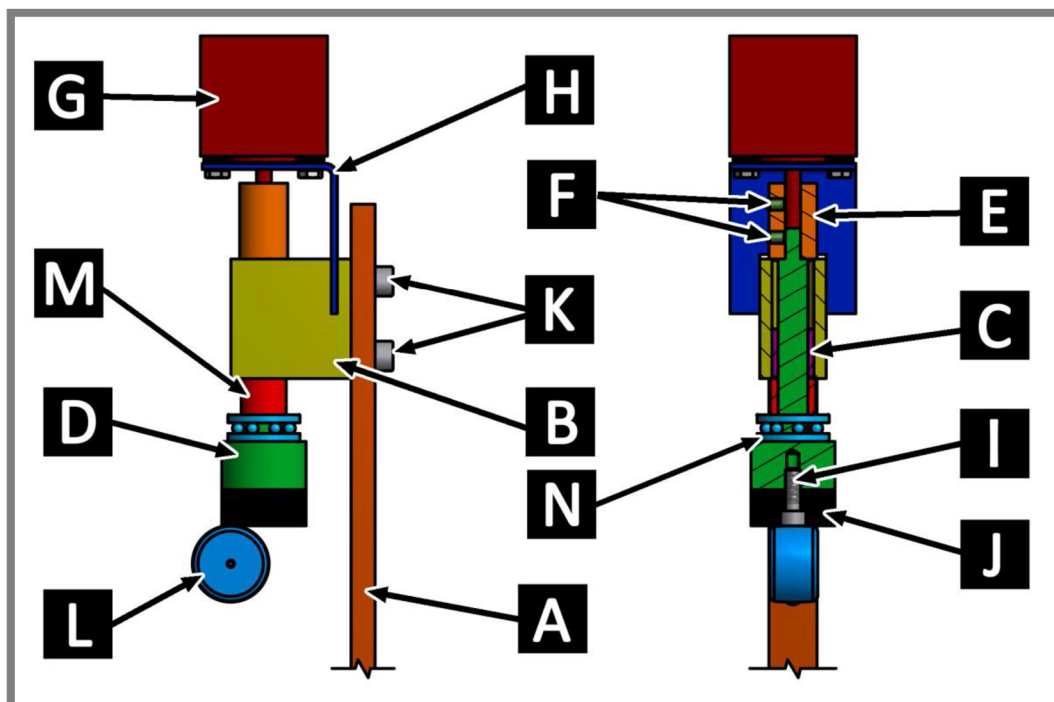
Na obr. 4-17 je vidět podsestava uložení čepu, okolo kterého se otáčí páka, která nese podsestavu nástroje. Domeček (A) je přišroubován k rámu pomocí dvou šroubů (B). Tyto dva šrouby také drží L profil 40 × 25 × 4 mm (C), na kterém je připevněno modelářské servo (D). Uvnitř domečku jsou uložena dvě ložiska 7200 s kosouhlým stykem (E). Ložiska jsou uložena do O a předepnuta pomocí matic (F). V ložiscích je uložen čep (G), na kterém je páka (H) nesoucí podsestavu s nástrojem. Převod kývavého pohybu ze serva na páku nesoucí nástroj je realizován pomocí dvou pák (I) a (J). Obě tyto páky byly z důvodu úspory nákladů vytištěny na 3D tiskárně metodou FDM.



Obr. 4-17 Uložení čepu páky

4.2.5 Uložení nástroje

Na obr. 4-18 je zobrazeno uložení nástroje. Jak bylo řečeno v kapitole 4.2.4 je celá tato podsestava uložena na páce (A). K páce je pomocí dvou šroubů (K) přišroubován domeček (B), ve kterém je nalisováno kluzné pouzdro (C). Jedná se o kluzné pouzdro vyrobené z mosazné slitiny se zalisovanými tuhými částicemi grafitu. Tolerance jeho vnitřního průměru je E7. Po zalisování pouzdra do domečku dojde ke zmenšení tohoto průměru na toleranční pole H7 [24]. V pouzdru je uložena pinola (D), která se otáčí okolo své osy a zároveň se pohybuje ve směru osy rotace. To je důvod, proč bylo použito pro uložení kluzné pouzdro. Při použití valivých ložisek by došlo ke zvětšení rozměrů a nárůstu hmotnosti celé této podsestavy. Což by mělo za následek zvýšení dynamických sil, které vznikají při kývavém pohybu páky. K pinole je připojen pomocí spojky (E) a dvou stavěcích šroubů (F) krokový motor SX17-1005 (G), který se společně s pinolou pohybuje ve směru osy otáčení pinoly. K přírubě motoru je přišroubován plech (H), který zabraňuje tomu, aby se motor otáčel vůči domečku. Plech má v sobě drážku, do které zapadá domeček s kluzným pouzdrům.

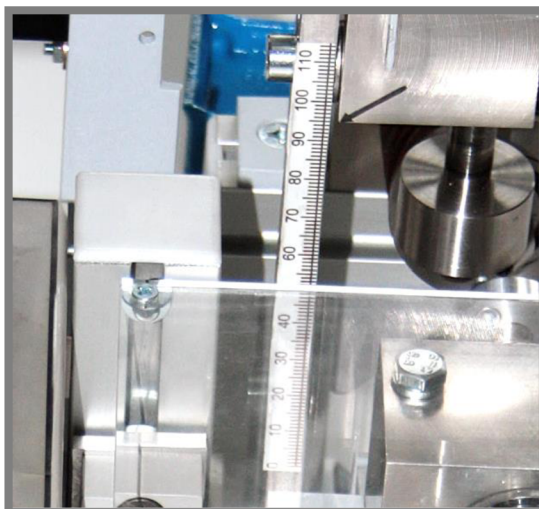


Obr. 4-18 Uložení nástroje

K pinole je jedním šroubem (I) přišroubován nástroj (J). Pro tento účel je použit šroub s válcovou hlavou, který je zapuštěn do nástroje, takže nemůže dojít k tomu, že by šroub poškodil povrch soudečku (L). Díky tomuto uspořádání je navíc možné vyměňovat jednotlivé nástroje bez nutnosti demontovat jiné části zařízení. Na pinole je nasazena vlnovcová pružina (M) firmy Smaley o vnitřním průměru 10 mm, která zajišťuje stálý přítlak nástroje k povrchu soudečku. Aby se zamezilo otáčení pružiny společně s pinolou je na pinole také nasazeno axiální ložisko (N), o které se pružina opírá. Maximální přítlačná síla použité pružiny je 50 N.

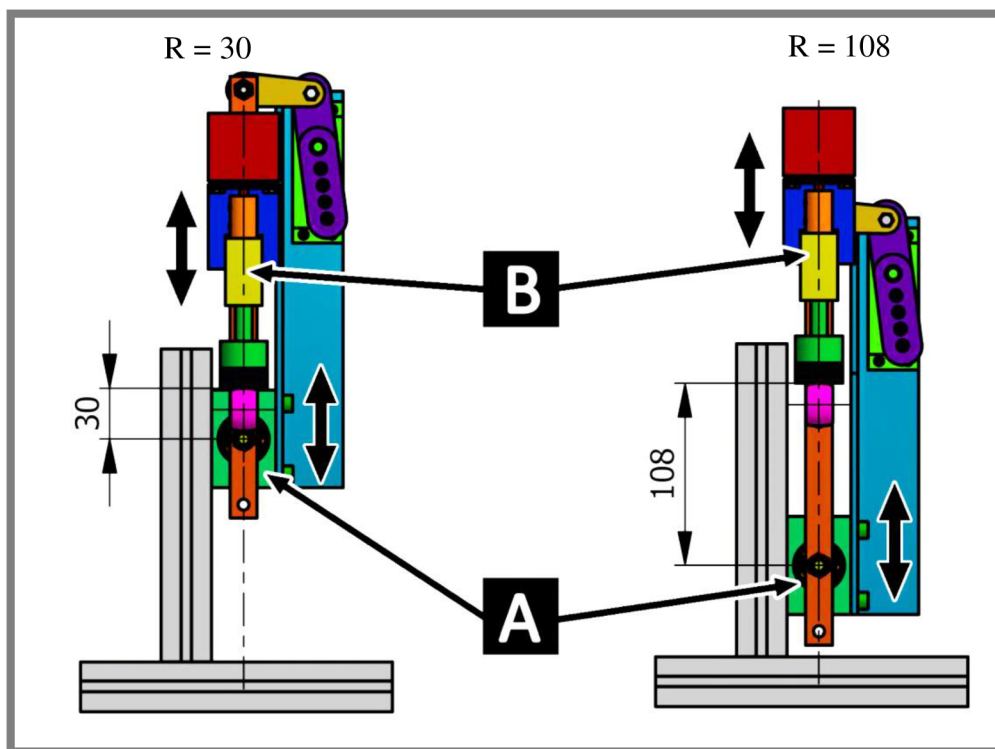


Obr. 4-19 Stupnice na rámu



Obr. 4-20 Stupnice na páce

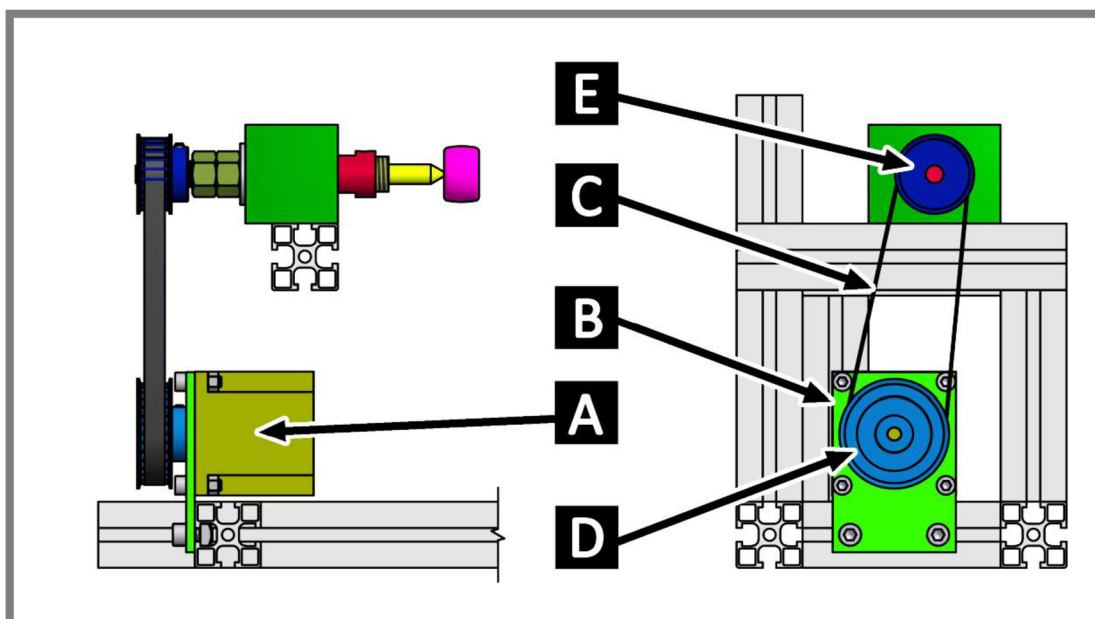
Aby bylo možné zařízení používat pro různé křivosti soudečků, je nutné měnit poloměr, po kterém se pohybuje nástroj. Změna poloměru se provede nejprve přesunutím domečku (A) po rámu stroje ve směru svislé šipky, jak je vidět na obr. 4-21. Pro správné nastavení výšky domečku je na hliníkovém profilu nalepena stupnice (obr. 4-19). Poté se výškově přenastaví domeček (B) podle stupnice (obr. 4-20), která je nalepena na páce (C). Na obr. 4-21 je vidět poloha podstavy nástroje a uložení páky při minimálním poloměru křivosti $R = 30$ mm (vlevo) a maximálním poloměru křivosti $R = 108$ mm (vpravo). Minimální, respektive maximální poloměr může být případně zvětšen prodloužením drážky, která je vyfrézována v páce, na které je uchycena podstava nástroje.



Obr. 4-21 Změna poloměru křivosti soudečku

4.2.6 Další konstrukční části

Jednou z dalších součástí, která je připevněna k hliníkovému rámu, je motor pohánějící soudeček. Jedná se o krokový motor SX23-1414. Uložení motoru je vidět na obr. 4-22. Motor (A) je přišroubován čtyřmi šrouby k hliníkovému plechu (B). Připevnění tohoto plechu k rámu je provedeno dvěma šrouby M6 a čtvercovými maticemi v drážkách profilu. Pro přenos krouticího momentu z motoru na soudeček je použit řemenový převod s ozubeným uzavřeným řemenem HTD - 5M o délce 375 mm a šířce 9 mm (C). Řemenice, která je nasazena na hřídel motoru (D), má 30 zubů. Hnaná řemenice (E) má 22 zubů. Převodový poměr je 0,73. Obě řemenice jsou na hřídelích pojištěny stavěcími šrouby M4. Řemen byl při montáži předeprnut posunutím motoru po rámu.

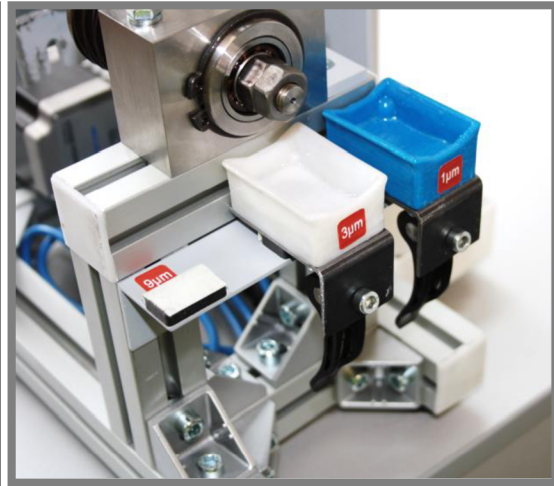


Obr. 4-22 Pohon soudečku

Jak bylo uvedeno v kapitole 3.2, abrazivní médium, které bude použito pro lapování a leštění, je diamantová suspenze. Proto, aby byla suspenze dopravována do místa kontaktu soudečku s nástroji, byly metodou FDM vytištěny vany, které slouží jako zásobník. Při otáčení se soudeček brodí v diamantové suspenzi, která je ve vaně. Celkem byly vytištěny tři vany, které jsou použity pro suspenze o zrnitosti 9, 3 a 1 μm . Aby nedošlo k záměně jednotlivých van, má každá vana jinou barvu a jsou také označeny, pro jakou zrnitost jsou určeny, jak je vidět na obr. 4-23. Všechny vany jsou pomocí čtyř vrutů přišroubovány k plechu o tloušťce 2 mm. Plech slouží k upnutí vany na správné místo. Na rámu je připevněn hliníkový L profil se třemi magnety, kam se mohou odkládat vany, které se právě nepoužívají. Tento držák je vidět na obr. 4-24.

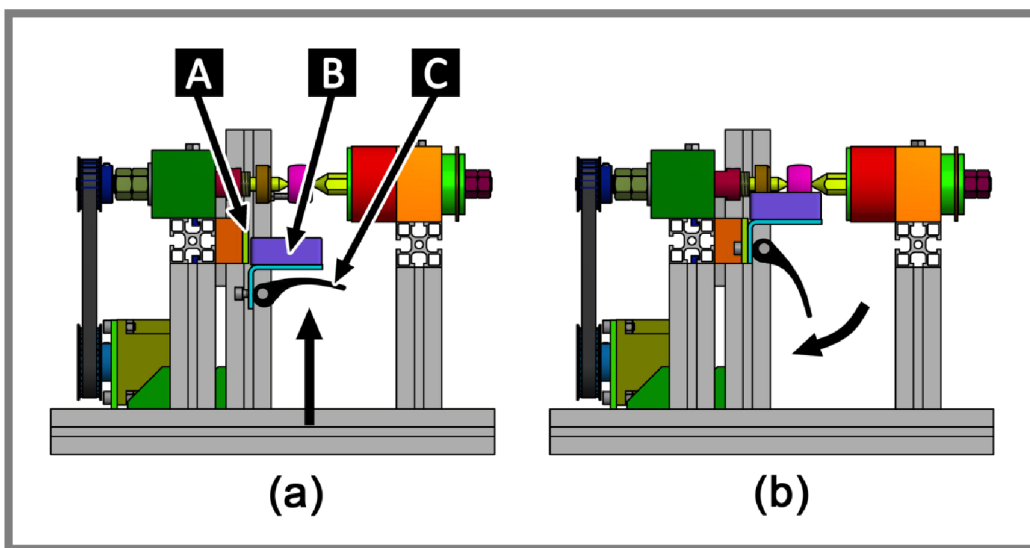


Obr. 4-23 Vany na lešticí kapaliny



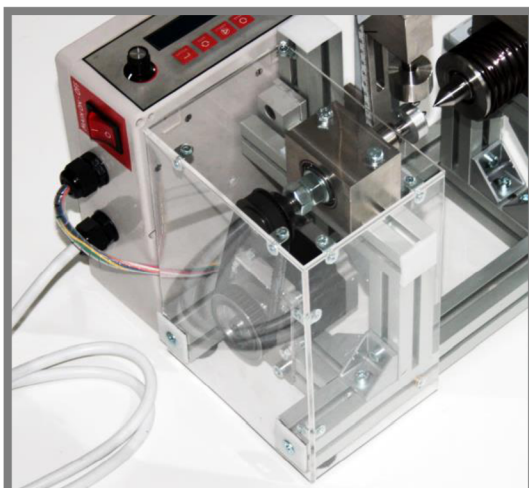
Obr. 4-24 Držák na vany

Plech, na kterých jsou vany přišroubovány, slouží pro upnutí vany pod soudeček tak, aby se soudeček ve vaně brodil. V plechu je vyvrtán otvor pro rychloupínák se šroubem, jak je vidět na obr. 4-23. Princip upínání je patrný z obr. 4-25. K rámu je přišroubován plech (A), ve kterém je drážka pro šroub rychloupínáku (C). Pro upnutí je nejprve nutné zvednout rychloupínák do horní polohy. Poté se vana (B) nasune na plech (obrázek a) a zajistí se sklopením rychloupínáku do spodní polohy (obrázek b).



Obr. 4-25 Upínání soudečku

Při práci stroje se může soudeček otáčet rychlostí až 400 otáček za minutu. Z důvodu zvýšení bezpečnosti bylo okolo řemenového převodu vyrobeno krytování. Pro výrobu byla použita polyesterová deska, ze které byly na laseru vypáleny jednotlivé díly krytování. Díly byly dohromady spojeny pomocí plechových úhelníků a šroubů M3. Kryt je přišroubován k rámu (obr. 4-26) a zamezuje přístup k řemenovému převodu ze všech stran. K rámu je vedle krabice s elektronikou také připevněna krabička (obr. 4-27) vytištěná metodou FDM pro odložení nástrojů, které právě nejsou používány.



Obr. 4-26 Krytovaní řemenového převodu

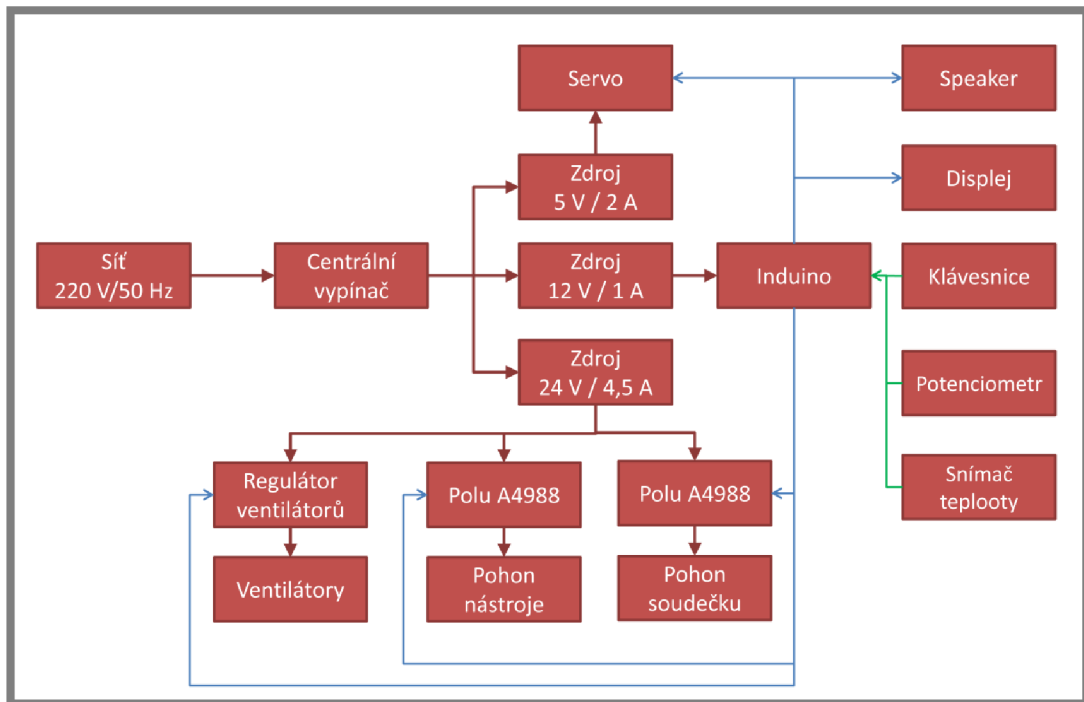


Obr. 4-27 Krabička pro odložení nástrojů

4.3 Elektronika a řídicí systém

Na obr. 4-28 je blokově znázorněno schéma zapojení elektroniky. Celé zařízení je napájeno přímo ze sítě jedním kabelem. Vstupní napětí 230 V je rozděleno do jednotlivých zdrojů stejnosměrného napětí. Pro řízení je použita mikroprocesorová jednotka Induino Mega, která má rozsah vstupního napájení $7 \div 12$ V. Zdroj 5 V je použit pro napájení serva, které má rozsah vstupního napětí $4,8 \div 6,5$ V podle maximální požadované rychlosti otáčení a požadovaného momentu. Pro napájení krokových motorů použitých pro pohon nástroje a soudečku by postačoval zdroj napětí 12 V. Nevýhodou takto nízkého napětí je ovšem vyšší pokles kroučícího momentu při vyšších otáčkách krokových motorů. Proto jsou krokové motory napájeny zdrojem 24 V. Zařízení je ovládáno pomocí potenciometru a klávesnice se čtyřmi tlačítky. Na LCD displeji o velikosti 16×2 znaky jsou podle řídicího programu zobrazovány výzvy pro nastavení a spuštění zařízení. Podrobnější popis řídicího systému je uveden v kapitole 4.3.4. Podle zvolených parametrů poté Induino řídí servo pro naklápění páky s nástrojem a drivery Polu A4988, které napájí oba krokové motory. Pro zvukovou signalizaci, například při stisknutí tlačítka nebo při ukončení programu, je k Induinu připojen piezoelektrický akustický měnič. Všechna řídicí elektronika je umístěna v plastové průmyslové krabici, do které jsou umístěny dva ventilátory o velikosti 40 mm a 50 mm. Oba ventilátory mají jmenovité provozní napětí 12 V. Každý z nich má ovšem jiný napájecí proud a není příliš vhodné je zapojovat sériově. Proto jsou ventilátory napájeny ze zdroje 24 V pomocí regulátoru, který dokáže nastavit jejich otáčky $0 \div 200$ % v závislosti na teplotě změřené teplotním čidlem umístěným uvnitř řídicí krabice.

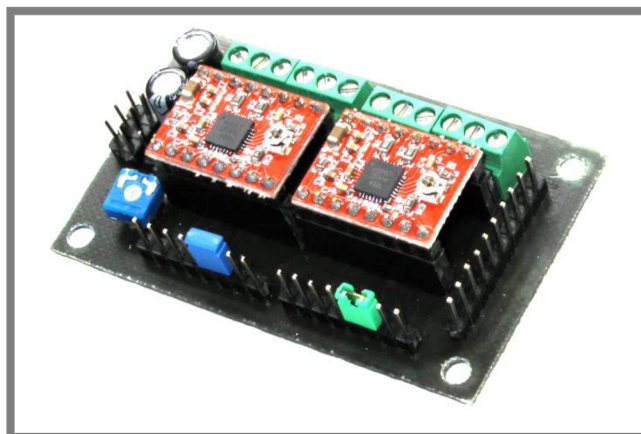
Kompletní schéma zapojení je součástí práce jako samostatná příloha.



Obr. 4-28 Blokové schéma zapojení elektroniky

4.3.1 Vyráběné plošné spoje

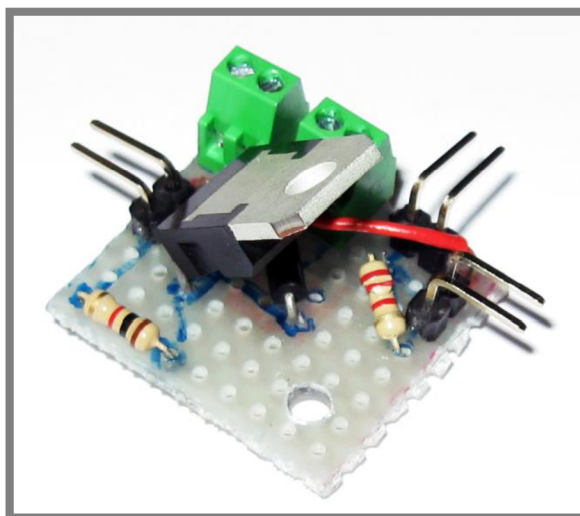
Pro řídicí elektroniku byly vyrobeny dva plošné spoje. První plošný spoj je vidět na obr. 4-29. Základem tohoto plošného spoje jsou dva drivery Polu A4988, které se starají o řízení obou krokových motorů. Jejich logická část je napájena 5 V z Induina. Napájení jejich výkonové části je realizováno ze zdroje 24 V tak, aby každý driver byl napájen ze samostatného kanálu zdroje. Mezi napájecí svorky je vždy paralelně zařazen kondenzátor s kapacitou 100 μF . Každý z driveru je s Induinem propojen pomocí pěti vodičů. Tři z nich slouží k nastavení mikro-krokování (plné kroky, poloviční, čtvrtinové, osminové a šestnáctinové), čtvrtý nastavuje směr otáčení motoru a pátý řídí rychlost otáčení motoru. Řízení se provádí generováním pulzů o velikosti 5 V. Při každém pulzu udělá motor jeden krok. Schéma pro zapojení spoje je součástí práce jako příloha 1.



Obr. 4-29 Plošný spoj pro řízení motorů a napájení displeje

Na plošném spoji se také nachází trimr s odporem $10\text{ k}\Omega$, kterým se nastavuje kontrast displeje. Displej je k plošnému spoji připojen celkem pomocí šesti vodičů. Čtyři slouží pro napájení a nastavení kontrastu, další dva napájí podsvícení displeje.

Druhý plošný spoj (obr. 4-30), který byl vyroben, slouží pro regulaci otáček ventilátorů v závislosti na teplotě uvnitř řídicí krabice. K plošnému spoji je připojen teplotní senzor LM335, který snímá teplotu. V závislosti na naměřené teplotě Induino poté pomocí PWM signálu ovládá tranzistor TIP120 a tím řídí otáčky obou ventilátorů, které jsou k plošnému spoji připojeny paralelně. Na plošném spoji se nachází dioda 1N4001, která zabrání zničení tranzistoru v okamžiku odpojení ventilátorů od zdroje. Rezistory na plošném spoji omezují proud tekoucí z Induina na požadovanou hodnotu. Schéma tohoto plošného spoje je součástí práce jako příloha 2.



Obr. 4-30 Plošný spoj pro regulaci otáček ventilátorů

4.3.2 Použité motory

V kapitole 3.4.1 byly pro pohon soudečku a nástroje zvoleny krokové motory. Pro pohon soudečku byl zvolen krokový motor SX23-1414 se statickým momentem $1,4\text{ Nm}$ při sériovém zapojení vinutí a napájecím proudem $1,45\text{ A}$. Pro pohon nástroje byl zvolen motor s menší přírubou SX17-1005, který má statický moment $0,5\text{ Nm}$ při sériově zapojeném vinutí a napájecím proudem 1 A [18].

4.3.2

Tab. 4-2 Parametry použitých krokových motorů [18]

Motor	SX23-1414	SX17-1005
Statický moment (Nm)	1,4	0,5
Napájecí proud (A)	1,45	1
Příruba	NEMA 23	NEMA 17
Hmotnost (kg)	0,69	0,3
Maximální otáčky (min^{-1})	400	750
Cena (kč)	424	214

Parametry obou těchto motorů jsou shrnuty v tab. 4-2. Oba tyto motory jsou záměrně předimenzovány z důvodu možnosti přehřívání motorů, protože se počítá

s dlouhodobějším provozem zařízení a částečným zakrytváním, které zhorší proudění vzduchu okolo motorů. Z tohoto důvodu bude u motorů nastaven minimální možný proud, při kterém budou mít motory dostatečný krouticí moment.

Jako typ motoru pro naklápění páky s nástrojem bylo v kapitole 3.4.2 zvoleno modelářské servo. Konkrétně bylo vybráno servo s označením HS-805 MG, které je zobrazeno na obr. 4-31.

Výstupní hřídel serva je uložena v kuličkových ložiscích, které zajišťují jeho dostatečnou tuhost a vysokou životnost. Servo je přišroubováno k zařízení pomocí čtyř šroubů, které procházejí přes gumové silentbloky zamezující přenosu vibrací do rámu. Jedná se o analogové servo, které je možné přímo řídit Arduinem pomocí knihovny Servo.h. Další parametry tohoto serva jsou shrnuty v tab. 4-3.



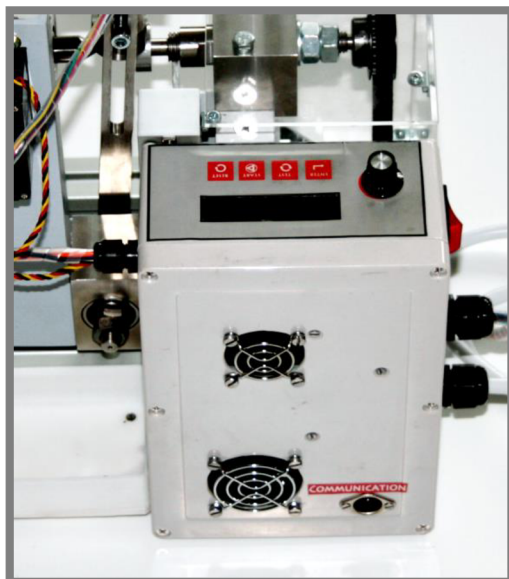
Obr. 4-31 Servo HS-805 MG

Tab. 4-3 Parametry serva HS-805 MG [23]

Napájecí napětí (V)	4,8 ÷ 6
Statický moment (Nm) (při 4,8 V)	1,94
Napájecí špičkový proud (A)	2
Rychlost otáčení (při 4,8 V)	0,19s/60°
Hmotnost (kg)	0,197
Úhel natočení (°)	0 ÷ 180
Cena (kč)	1199

4.3.3 Krabice pro uložení elektroniky

Veškerá řídicí elektronika je uložena v jedné plastové průmyslové krabici, které je připevněna k rámu stroje. Její umístění na rámu je zobrazeno na obr. 4-32. Ve stěnách krabice jsou tři kabelové průchodky. První prochází napájecí síťový kabel, druhou kabely motoru pro pohon soudečku a třetí kabely vedoucí od motoru pro pohon nástroje a serva.



Obr. 4-32 Krabice s řídicí elektronikou na rámu stroje

Na horní stěně krabice (obr. 4-33) je umístěn LCD displej s 16×2 znaky, s čtyřtlačítkovou membránovou klávesnicí a potenciometrem o odporu 10 kΩ. Pomocí tlačítek a potenciometru je celé zařízení nastavováno a spouštěno. Na zadní straně (obr. 4-34) jsou otvory pro dva ventilátory, které chladí elektroniku, a DIN konektor, který slouží k propojení Induina s USB portem počítače.



Obr. 4-33 Ovládací prvky



Obr. 4-34 Zadní strana

4.3.4 Struktura řídicího systému a ovládání

Pro řízení otáček motorů byl v prostředí Arduino IDE vytvořen vlastní řídicí program, která je součástí práce jako příloha 3. Struktura řídicího programu je zobrazena na obr. 4-37. Ovládání zařízení se provádí pomocí klávesnice, která je umístěna pod displejem, a potenciometrem, který je vedle displeje. Po spuštění zařízení centrálním vypínačem se rozsvítí displej, na kterém se vypíše název nahraného programu a datum s časem, kdy byl program do Induina nahrán jak je vidět na obr. 4-35 .

4.3.4



Obr. 4-35 Úvodní obrazovka



Obr. 4-36 Zadání poloměru soudečku

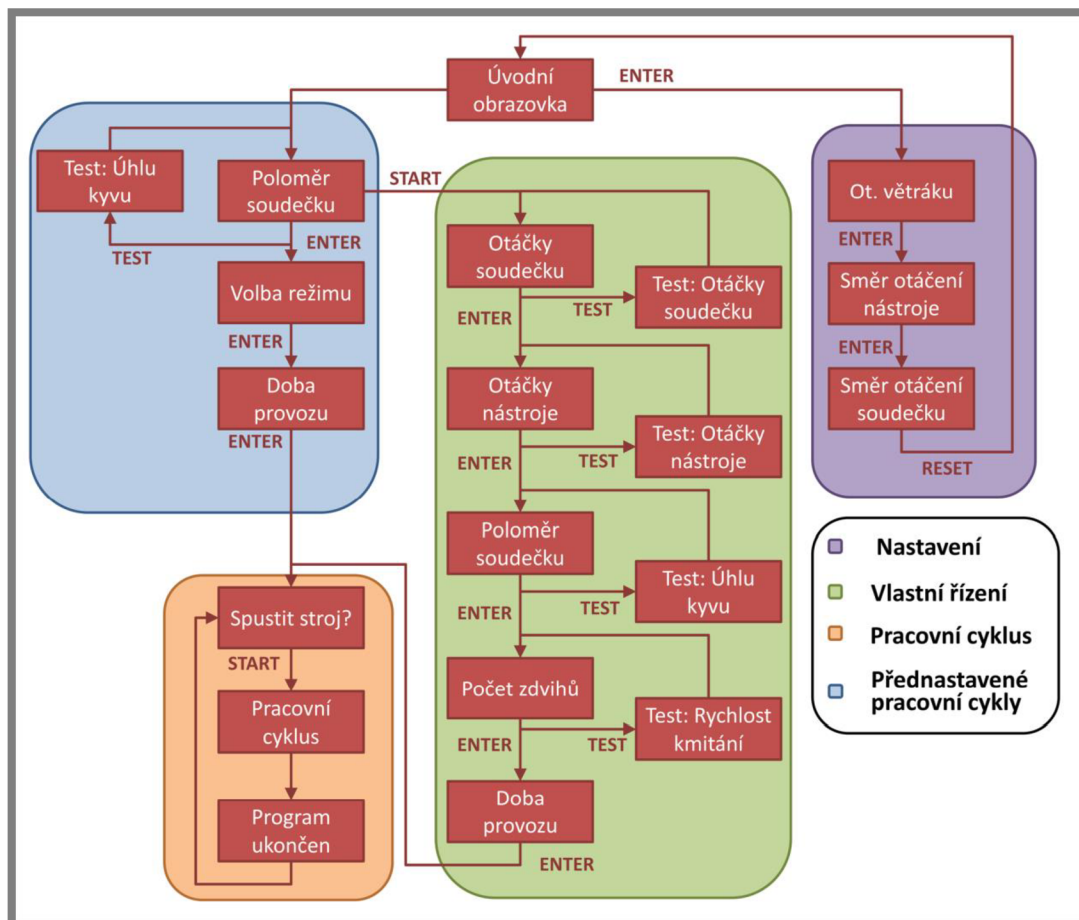
Spuštění a stisk jednotlivých tlačítek je také doprovázen zvukovým signálem. Dále je uživatel postupně vyzván k nastavení požadovaných parametrů nutných pro práci stroje (obr. 4-36). Program je rozdělen do čtyř částí. První část slouží k řízení zařízení podle přednastavených hodnot zjištěných při testování. Druhá část slouží pro vlastní zadání všech potřebných parametrů. Po spuštění začne program využívat třetí část, která slouží k řízení motorů. Poslední sekce programu slouží k nastavení například otáček ventilátorů nebo směru otáčení motorů. Tyto hodnoty jsou trvale uloženy v paměti EEPROM i po vypnutí zařízení, dokud nejsou znova přepsány.

V programu jsou také vytvořeny testovací smyčky. Po nastavení například poloměru soudečku je možné překontrolovat úhel výkyvu páky s nástrojem a případně jej přenastavit bez nutnosti resetovat celé zařízení a znova nastavovat všechny již nastavené parametry.

Po otestování byly do řídicího programu přidány tři režimy pro lapování a leštění s přednastavenými parametry otáček. Tyto režimy i s přednastavenými parametry jsou uvedeny v tab. 4-4.

Tab. 4-4 Pracovní režimy

Režim	Otáčky soudečku	Otáčky nástroje	Další parametry	Abrazivní médium	Doporučená doba provozu
Hrubování	180 min ⁻¹	160	Změna směru otáčení nástroje každých 15 s	Diamantová suspenze 9 μm	4 minuty
Zjemnění struktury	400 min ⁻¹	Náhodně voleny každých 0,5 s: 230 ÷ 450 min ⁻¹	Změna směru otáčení nástroje každých 15 s	Diamantová suspenze 3 ÷ 1 μm	2 minuty
Leštění	400 min ⁻¹	-	Pouze otáčení soudečku	Leštící pasta 1 μm	2 ÷ 3 minuty



Obr. 4-37 Struktura řídicího programu

4.4 Testování zařízení a optimální postup lapování a leštění

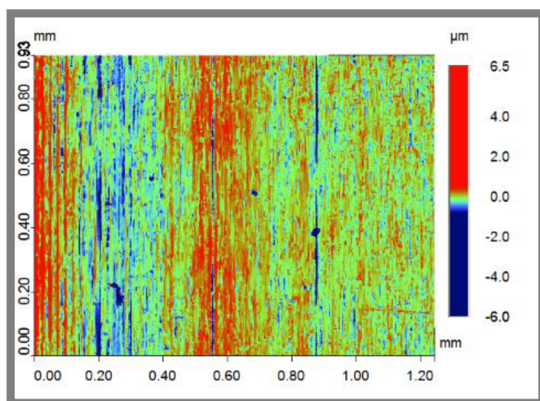
4.4

Po dokončení montáže a zapojení elektroniky následovalo testování zařízení. Činnost zařízení byla nejprve otestována na dvou soudečcích se středícími důlky s poloměrem křivosti ve směru kolmém na směr valení 57 mm. Tyto soudečky byly vyrobeny ještě před zadáním diplomové práce. Při lapování a leštění těchto soudečků bylo celé zařízení doladěno a byl nalezen optimální postup pro zlepšení povrchové geometrie soudečků. Poté byl tento postup ověřen na soudečcích se středícími důlky s poloměrem křivosti ve směru kolmém na směr valení 36, 67 a 106 mm a na jednom soudečku s hřídelkou s poloměrem křivosti 50,9 mm.

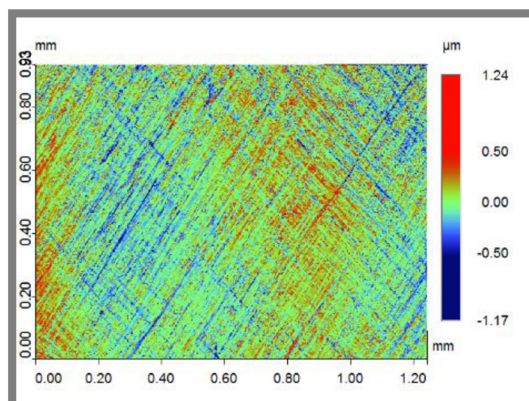
Při testování byl zjišťován zejména vliv rychlosti otáčení nástroje a soudečku, směr otáčení nástroje, rychlost kývání páky s nástrojem a velikost síly, která přitlačuje nástroj k povrchu soudečku. Dalšími faktory ovlivňující jakost povrchu soudečků jsou zejména velikosti abrazivních částic v diamantové suspenzi a materiál použitý pro výrobu nástroje.

Jediná konstrukční úprava provedená na zařízení v průběhu testování bylo odstranění vlnocové pružiny použité pro přitlak nástroje k soudečku. Bylo totiž zjištěno, že optimální velikost přitlačné síly odpovídá pouze tíhové síle nástroje, motoru a pinoly. Díky tomu je možné nyní lapovat soudečky s poloměrem křivosti až 129 mm.

Drsnost povrchu vyrobených soudečků se pohybuje v rozmezí $R_a = 0,14 \div 0,2 \mu\text{m}$. Na obr. 4-38 je vidět charakteristická struktura broušených povrchů, která je na vyrobených soudečcích. Při lapování je nejprve nutno odstranit tuto strukturu. To se provede použitím diamantové suspenze o zrnitosti $9 \mu\text{m}$, nastavením konstantních otáček soudečku i nástroje. Aby bylo na soudečku dosaženo zkřížené struktury je v pracovním cyklu pro hrubování zadáno, aby došlo každých 15 sekund ke změně směru otáčení nástroje. Struktura povrchu po hrubování je zobrazena na obr. 4-39.

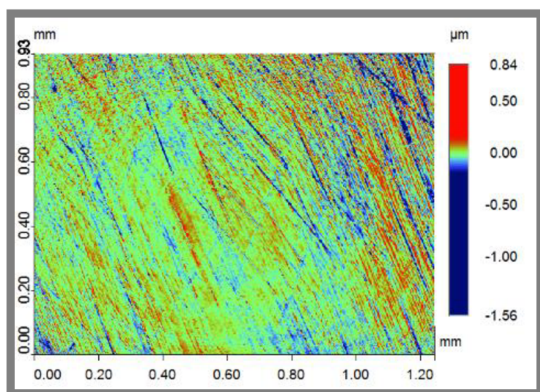


Obr. 4-38 Struktura po broušení

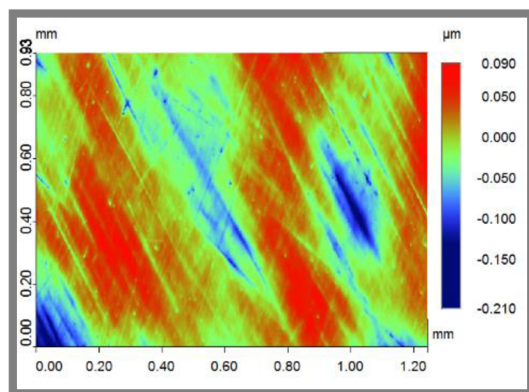


Obr. 4-39 Odstranění struktury po broušení

V dalším kroku se pro lapování použijí diamantové suspenze o zrnitosti $3 \mu\text{m}$ a $1 \mu\text{m}$. Přitom se na zařízení nastaví vyšší otáčky soudečku. Do pracovního režimu, který je používán s těmito pastami, je také zaneseno, aby došlo každou půl sekundu ke změně otáček nástroje a každých 15 sekund se změnil směr otáčení nástroje. Toto nastavení a použité suspenze mají za následek vytvoření struktury, která je zobrazena na obr. 4-40. Cílem je dosažení jemnější a rovnoměrnější struktury s drsností povrchu $0,06 \mu\text{m}$.



Obr. 4-40 Zjemnění struktury



Obr. 4-41 Finální doleštění

Posledním obráběcím krokem je doleštění soudečku pomocí vrtačky a nástroje s filcem. Při tom se používá diamantová leštící pasta se zrnitostí $1 \mu\text{m}$. Během leštění zůstane soudeček upnut mezi hroty zařízení a otáčí se okolo své osy. K povrchu soudečku se přitlačuje nástroj upnutý ve vrtačce s diamantovou pastou. Důvody pro použití vrtačky pro finální doleštění jsou detailněji popsány v kapitole diskuze. Struktu-

ra na povrchu soudečku po finálním doleštění je zobrazena na obr. 4-41. Při tomto kroku dochází zejména k odstranění drsnosti z povrchu soudečků. Tedy nerovností s nejkratšími vlnovými délkami. Vlnitost již není výrazně ovlivněna.

4.5 Finanční zhodnocení

4.5

V tab. 4-5 jsou shrnuty jednotlivé položky, které byly nakoupeny nebo vyrobeny. Největší část rozpočtu byla vyčerpána na výrobu součástí. Celkem bylo na zakázku vyrobeno 11 součástí z nerezové oceli. Celková cena je 20 249 Kč.

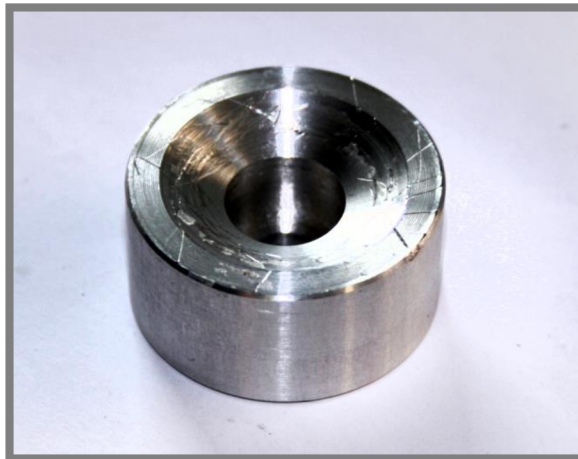
Tab. 4-5 Cena výroby a nákupu jednotlivých položek

Název	Cena (Kč)
Výroba součástí	12740
Profily a příslušenství	2180
Elektroinstalační materiál	1400
Ložiska	667
Řemen a řemenice	314
Krokové motory	663
Drivery pro krokové motory	338
Servo	1199
Displej	99
Induino	499
3D tisk van	150
Celkem	20249

5 DISKUZE

Výsledkem této diplomové práce je funkční vzorek obráběcího zařízení. Toto zařízení je schopné zlepšit povrchovou geometrii soudečků používaných při měření podmínek panujících v EHD kontaktu. Toto zařízení bylo nejprve navrženo po mechanické stránce. Dále bylo navrženo zapojení elektroniky a vytvořen řídicí systém. Poté bylo zařízení použito pro dokončení povrchové geometrie několika soudečků, aby se ověřila jeho funkčnost a odhalily případné nedostatky.

Jeden z prvních nedostatků, který byl při testování odhalen, bylo použití polyamidu PA6 pro výrobu nástroje pro abrazivní leštění. Tento materiál není příliš vhodný, protože jeho povrchová tvrdost je stále příliš vysoká. Z měření na optickém profilometru bylo zjištěno, že při leštění povrchu polyamidem dochází stále k tvorbě jemných rýh. Z tohoto důvodu byl vyroben nový nástroj z hliníku obr. 5-1, na který byl nalepen filc. Při leštění povrchu filcem s diamantovou suspenzí ovšem dochází ke snížení množství odebíraného materiálu. Proto je vhodnější použít leštící pastu o zrnitosti 1 μm . Pasta se nanese na nástroj a zařízení se spustí stejně jako při použití diamantové suspenze. Nevýhodou leštící pasty ovšem je, že se po čase dostane mimo místo kontaktu nástroje a soudečku. Zařízení je nutné zastavit a opět nanést pastu na nástroj. Tím dochází ke značnému zvýšení spotřeby leštící pasty.



Obr. 5-1 Nástroj pro leštění s filcem

Z tohoto důvodu se finální doleštění provádí ručně pomocí nástroje s filcem upnutým do ruční vrtačky. Soudeček zůstane upnut v zařízení stejně jako při lapování. V řídicím programu je pro ruční leštění vytvořen cyklus Leštění. Po jeho spuštění se roztočí pouze soudeček konstantními otáčkami, dokud není cyklus zastaven stiskem tlačítka ENTER. K povrchu soudečku je poté přitlačen nástroj upnutý ve vrtačce s leštící pastou o zrnitosti 1 μm .

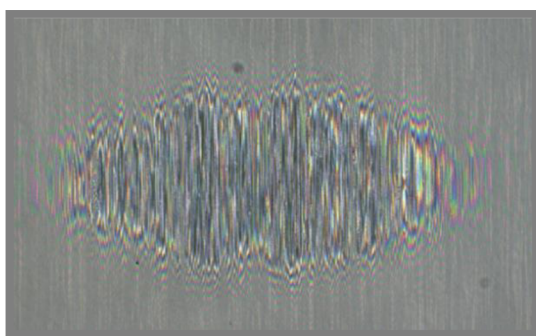
Největší problém, který nastává při obrábění soudečků, jsou rýhy po abrazivních částicích, které vznikají při lapování s diamantovou suspenzí o zrnitosti 9 μm . Hloubka rýh se pohybuje v rozmezí 50 ÷ 200 nm. Rýhy je ovšem možné odstranit opětovným lapováním s diamantovou suspenzí 1 μm . Toto odstraňování vyžaduje delší chod stroje, protože díky nízké drsnosti povrchu po leštění soudečku filcem, se značně sníží množství odstraněného materiálu. To je způsobeno tím, že se zvětší kontaktní plocha mezi nástrojem a soudečkem. Tím dojde ke snížení kontaktního tlaku, což způsobí snížení množství odebraného materiálu.

Na obr. 5-2 jsou pro srovnání dva soudečky. Soudeček vpravo je pouze broušen firmou SLB, která soudečky na zakázku vyráběla. Jeho povrch je matný a okem je na něm možno vidět stopy po broušení. Soudeček vlevo je díky lapování a leštění připraven pro měření.

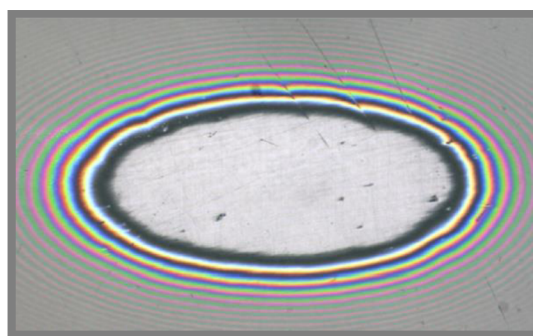


Obr. 5-2 Porovnání vyleštěného (vlevo) a nevyleštěného soudečku (vpravo)

Na obr. 5-3 je vidět kontakt neobrobeného soudečku s diskem. Kontakt soudečku reálně nastává pouze v místech vrcholů povrchových nerovností na soudečku, které jsou ovšem příliš vysoké, aby kontakt byl plošný. Na obr. 5-4 je vidět kontakt vyleštěného soudečku s diskem. Díky tomu, že byla snížena drsnost a vlnitost soudečku dojde po zatížení tohoto kontaktu k deformaci soudečku i disku a nastane plošný kontakt. Z tohoto důvodu má vnitřní elipsa kontaktu konstantní šedou barvu, která odpovídá nulové tloušťce mazacího filmu mezi soudečkem a diskem. Směrem od středu dochází k nárůstu mezery, což je znázorněno změnou barvy.



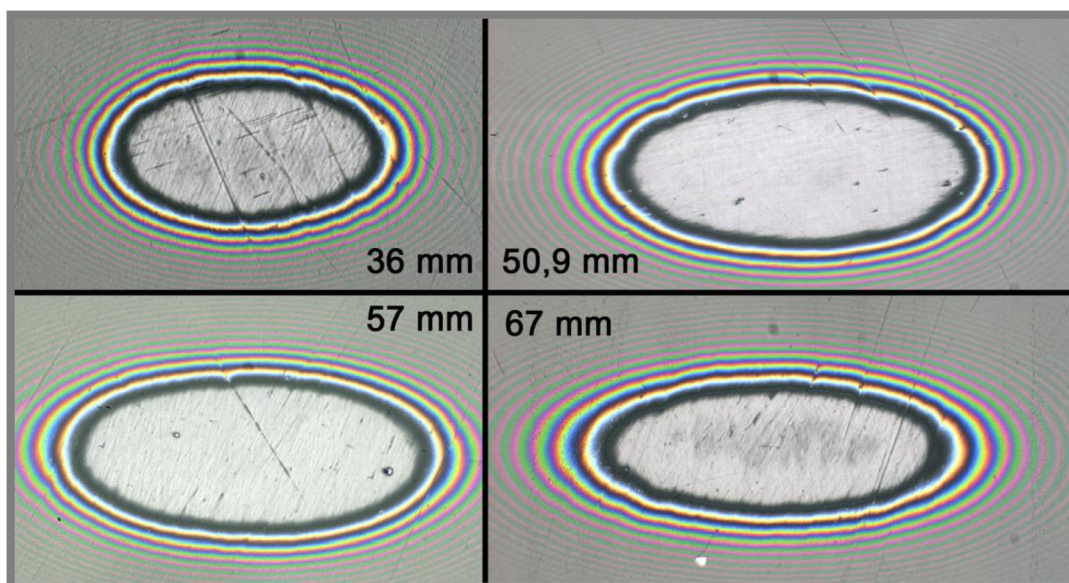
Obr. 5-3 Kontakt neobrobeného soudečku s diskem



Obr. 5-4 Kontakt obrobeného soudečku s diskem

Na obr. 5-5 jsou snímky z tribometru, které zobrazují kontakt disku s dalšími soudečky, jejichž povrch byl také dokončen v průběhu testování. Na snímcích je vidět, jak se u jednotlivých soudeček mění velikost hlavní a vedlejší poloosy elipsy v závislosti na poloměru křivosti soudečku ve směru kolmém na směr valení. Díky

dokončení povrchu všech těchto soudečků bylo ověřeno, že zařízení umožňuje dokončovat soudečky s různou křivostí povrchu.



Obr. 5-5 Srovnání kontaktu testovaných soudečků

V tab. 5-1 jsou uvedeny parametry drsnosti a vlnitosti na soudečcích před leštěním a po leštění. Původní drsnost i vlnitost, které byly na soudečcích, byly sníženy na přijatelnou úroveň, takže všechny tyto soudečky mohou být použity při měření bez dalších úprav.

Tab. 5-1 Porovnání drsnosti a vlnitosti na jednotlivých soudečcích

Soudeček	Před leštěním		Po leštění	
	Ra (μm)	Wa (μm)	Ra (μm)	Wa (μm)
57 mm	0.13	0.04	0.005	0.018
57 mm	0.14	0.05	0.009	0.016
36 mm	0.17	0.07	0.008	0.022
67 mm	0.15	0.04	0.008	0.016
106 mm	0.16	0.051	0.003	0.01
50,9 mm (s hřídelkou)	0,16	0,062	0,008	0,018

Při testování bylo zjištěno, že jedním z parametrů, který má zásadní vliv na jakost dosaženého povrchu, je jakost povrchu nástroje. Na obr. 5-6 jsou vyfoceny tři opotřebované nástroje. Opotřebení se projevuje ve formě kružnic na ploše nástroje, která je v kontaktu se soudečkem. Jakmile dojde ke vzniku výrazného opotřebení nástroje, zvýší se i výsledná drsnost povrchu soudečku. Nástroje, které jsou vyfoceny na obrázku, jsou vyrobeny z oceli 12 050 a zakaleny na tvrdost 58 HRC. Díky tomu bylo opotřebení nástroje sníženo. Úplná eliminace opotřebení ovšem není možná, protože opotřebení nástroje způsobují diamantové částice obsažené v diamantové

suspenzi a leštící pastě. Proto, aby došlo ke snížení opotřebení a prodloužení životnosti nástrojů, byly pro lapování vyrobeny nové nástroje z oceli 19 824 zakalené na tvrdost 64 HRC. Celkem bylo vyrobeno deset nástrojů, které je možné po opotřebení přebrousit a opět použít pro lapování. Díky jednoduchému tvaru nástrojů je možné je přebrousit po upnutí na magnetický stůl, které bývají často používány na bruskách.



Obr. 5-6 Opotřebené nástroje

V rámci práce byl vytvořen návod pro nastavení a ovládání zařízení, který je součástí práce jako samostatná příloha. Tento návod popisuje jednotlivé kroky pro nastavení a spuštění stroje, aby bylo zajištěno, že je dodržen nejvhodnější postup dokončování soudečků.

6 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout zařízení, které je schopné zlepšit povrchovou geometrii soudečků používaných pro měření. Při měření jsou soudečky zatěžovány v simulátoru valivého tření. Špatná jakost povrchu soudečků ovšem znemožňuje provést kalibraci měření, která je nutná pro vyhodnocení měření. Problémem při obrábění soudečku je rozdílná křivost ve směru valení a směru kolmém na směr valení. Tím vzniknou na soudečku zakřivené plochy, které nemohou být s dostatečnou přesností dokončeny běžnými obráběcími metodami.

V teoretické části práce byly popsány a rozebrány různé dokončovací obráběcí metody, kterými by mohla být zlepšena povrchová geometrie soudečků. Na základě tohoto přehledu byla pro obrábění zvolena kombinace dvou metod. Pro zlepšení vlnitosti povrchu soudečků a odstranění struktury po předchozím obrábění bylo zvoleno lapování kaleným ocelovým nástrojem. Poté je struktura povrchu dále zjemněna metodou abrazivního leštění, která je podobná lapování. Liší se zejména tím, že pro výrobu nástroje jsou použity měkké materiály.

V následující kapitole byly nejprve navrženy varianty kinematického uspořádání. Pro obě zvolené metody je kinematika obrábění totožná. Při návrhu kinematiky byl kladen důraz na zajištění chaotického pohybu abrazivních částic. Dále byl v této kapitole zvolen typ abrazivního média, použité motory a řídicí jednotka.

Pro otestování přesnosti zvolených metod byly vyrobeny nástroje. Testovací soudeček byl lapován a leštěn za použití vrtačky a soustruhu tak, aby byla dodržena navržená kinematika. Tyto testy ukázaly, že zvolenými metodami je možné snížit vlnitost a drsnost na přijatelnou úroveň.

Dále se práce zaměřuje na návrh samotného zařízení, jenž je schopno automaticky v několika krocích zlepšit geometrii soudečků. Nejprve byla navržena mechanická část zařízení, která je dále snadno modifikovatelná díky použití hliníkového konstrukčního systému. Během čekání na výrobu součástí realizovanou externí firmou byly nakoupeny motory a také byla navržena a zakoupena veškerá elektronika. Použité motory jsou řízeny mikroprocesorovou jednotkou Induino. Hodnoty otáček a další parametry potřebné pro chod stroje jsou zadávány pomocí displeje, tlačítek a potenciometru.

Po zkompletování zařízení následovalo jeho otestování. Optimální nastavení bylo nalezeno na dvou soudečcích s poloměrem křivosti 57 mm a následně potvrzeno na soudečcích s poloměrem křivosti 36; 50,9; 67 a 106 mm. Díky testování byl nalezen optimální postup lapování a leštění, takže je možné dokončit povrch soudečků ve čtyřech až šesti krocích, ve kterých se používají různé abrazivní média a různé nástroje.

V průběhu řešení diplomové práce byly splněny všechny hlavní i dílčí cíle. Celé zařízení bylo odzkoušeno a shledáno plně funkčním, takže pro další používání nemusejí být provedeny žádné další úpravy.

Zařízení je v době odevzdání této práce evidováno ve VUT systému Apollo jako funkční vzorek pod číslem 114360 s názvem Lapovací aparatura pro dokončování povrchu soudečků. Současně s tím je požádáno o vydání užitého vzoru.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JOUINI, Nabil, Philippe REVEL a Maxence BIGERELLE. Relevance of roughness parameters of surface finish in precision hard turning. *Scanning*. 2014, vol. 36, issue 1, s. 86-94. DOI: 10.1002/sca.21100. Dostupné z: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84893771353&partnerID=40&md5=84560c4af6ae21ea2db034d92ac2e5eb>
- [2] STACHOWIAK, Gwidon W, Andrew W BATCHELOR a Grazyna B STACHOWIAK. *Experimental methods in tribology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 2004, xviii, 354 s. ISBN 0444515895.
- [3] Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Budynas, R. G. (2010). *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUT IUM.
- [4] KANETA, Motohiro. Effects of surface roughness in elastohydrodynamic lubrication. *JSME International Journal: Series 3: Vibration, Control Engineering, Engineering for Industry*. 1992, vol. 35, no. 4, s. 535-546. Dostupné z: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0026961527&partnerID=40&md5=a27d1baed60f93c11ae3c9fe72f5af9b>
- [5] ŠPERKA, P. *In-situ studium zmeny topografie trecích povrchu v elastohydrodynamickém kontaktu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 143 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
- [6] SVOBODA, Pavel et al. *Základy konstruování*. Vyd. 3., upr. a dopl. Brno: CERM, 2009, 234 s. ISBN 9788072046331.
- [7] I5: Product Definition. *Arcelormittal* [online]. [cit. 2014-03-02]. Dostupné z: http://automotive.arcelormittal.com/saturnus/sheets/I5_EN.html
- [8] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: CERM, 2005, 270 s. ISBN 8021430680.
- [9] YAO, Chang Feng, Ting WANG a Wei XIAO. Experimental Research on Surface Roughness and Topography of Grinding Ultra-High Strength Steel Aermet100 with CBN Wheel. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 526, s. 28-32. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.526.28. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMM.526.28>
- [10] BRINKSMEIER, Ekkard, Oltmann RIEMER a Alexander GESSENHARTER. Finishing of structured surfaces by abrasive polishing. *Precision Engineering*. 2006, vol. 30, issue 3, s. 325-336. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2005.11.012. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635906000547>
- [11] BRINKSMEIER, E., O. RIEMER, A. GESSENHARTER a L. AUTSCHBACH. Polishing of Structured Molds. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*.

- 2004, vol. 53, issue 1, s. 247-250. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60690-8.
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607606908>
- [12] BEN-TSUR, Lior. 'Super finishing' gets even better. *Metal Finishing*. 2006, vol. 104, issue 4, s. 18-21. DOI: 10.1016/S0026-0576(06)80090-5. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026057606800905>
- [13] VARGHESE, Biju a Stephen MALKIN. Selection of Optimal Superfinishing Parameters. *Journal of Manufacturing Processes*. 2000, vol. 2, issue 2, s. 124-130. DOI: 10.1016/S1526-6125(00)70020-X. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S152661250070020X>
- [14] GRZESIK, Wit a Krzysztof ŻAK. Modification of surface finish produced by hard turning using superfinishing and burnishing operations. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012, vol. 212, issue 1, s. 315-322. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.09.017. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013611002767>
- [15] KUMAR SINGH, Anant, Sunil JHA a Pulak M. PANDEY. Nanofinishing of a typical 3D ferromagnetic workpiece using ball end magnetorheological finishing process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012, vol. 63, s. 21-31. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.07.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695512001320>
- [16] EL-AXIR, M.H. An investigation into roller burnishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000, vol. 40, issue 11, s. 1603-1617. DOI: 10.1016/S0890-6955(00)00019-5. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695500000195>
- [17] KLOCKE, F. a J. LIERMANN. Roller burnishing of hard turned surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1998, vol. 38, issues 5-6, s. 419-423. DOI: doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00085-0. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695597000850>
- [18] MICROCON, s.r.o. *Microcon* [online]. 10. 4. 2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.microcon.cz/>
- [19] ARDUINO. *Arduino* [online]. ©2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.arduino.cc/>
- [20] POLOLU CORPORATION. *Polu Robotics & Electronics* [online]. © 2001–2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/>
- [21] RASPBERRY PI FOUNDATION. *Rapsberry Pi* [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.org/>

- [22] *GM electronic: Elektronika, kterou znáte* [online]. 2015 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/>
- [23] *Servo Database: RC Servo Specification and Reviews* [online]. 2015 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.servodatabase.com>
- [24] MISUMI: Oil Free Bushings/I.D. E7/Cooper Alloy. *MISUMI: Configurable mechanical components* [online]. [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: <http://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/110300032570/?CategorySpec=00000234051%3A%3Aa>
- [25] FERONA, A.S. *Ferona, a.s.: Velkoobchod hutním materiálem* [online]. 2015 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.ferona.cz/cze/index.php>
- [26] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a František PROKEŠ. *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. Vyd. 3. Brno: CERM, 2009, 223 s. ISBN 9788072046362.
- [27] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 2. dopl. vyd. Úvaly: ALBRA, 2005, 907 s. ISBN 8073610116.
- [28] SVOBODA, Ondřej. *Robotstore.cz: Arduino moduly, senzory* [online]. [2015] [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://robotstore.cz/>
- [29] *Smalley: Steel ring company* [online]. 2015 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.smalley.com/>
- [30] ALUTEC K&K A.S. *ALUTEC: Hliníkový konstrukční systém* [online]. 2015 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://aluteckk.cz/>

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Seznam zkratek:

Zkratka	Význam
3D	Trojrozměrný
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EHD	Elastohydrodynamický
FDM	Fused Deposition Modeling
IDE	Integrated Development Environment
LCD	Liquid crystal display
PWM	Pulse-width modulation
USB	Universal serial bus

Seznam symbolů:

Symbol	Popis
a_p (mm)	hloubka řezu
f (mm·ot ⁻¹)	posuv na otáčku
η (Pa·s)	dynamická viskozita
k (-)	elipticita kontaktu
L_0 (mm)	volná délka
L_g (mm)	délka, kdy na sebe dosedají jednotlivé závity
n (s ⁻¹)	otáčky
p_m (Pa)	měrné zatížení
R (mm)	poloměr křivosti
R_a (μm)	průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti
R_x (mm)	poloměr ve směru valení
R_y (mm)	poloměr ve směru kolmém na směr valení
v_c (m·min ⁻¹)	řezná rychlost
W_a (μm)	průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 0-1 Soudeček používaný při měření	13
Obr. 1-1 Vliv parametrů při soustružení na dosaženou drsnost [1]	14
Obr. 1-2 Rozměry soudečku	15
Obr. 1-3 Průběh součinitele tření f v závislosti na char. čísle $\eta n/p_m$ [3]	15
Obr. 1-4 a) Nedeforovaný povrch mimo kontakt b) Deformovaný povrch uvnitř kontaktu. [5]	16
Obr. 1-5 Vliv rýhy na tloušťku mazacího filmu [5]	17
Obr. 1-6 Struktura povrchu [7]	17
Obr. 1-7 Závislost drsnosti na rychlosti obrobku, rychlosti kotouče a hloubky řezu [9]	18
Obr. 1-8 Princip lapování [8]	19
Obr. 1-9 Lapovací stroj [8]	19
Obr. 1-10 Mechanismus úběru materiálu při použití metod s volným brusivem [10]	20
Obr. 1-11 Lapovací nástroje [10]	20
Obr. 1-12 Povrch leštěný metodou FSF [12]	21
Obr. 1-13 Princip superfinišování [13]	21
Obr. 1-14 Nástroj pro obrábění MR kapalinou [15]	22
Obr. 1-15 Válečkovací nástroj [16]	23
Obr. 1-16 Nástroj pro statické kuličkování [17]	24
Obr. 2-1 Snímek neobrobené kuličky	25
Obr. 2-2 Snímek neobrobeného soudečku	25
Obr. 2-3 Časový harmonogram práce	27
Obr. 3-1 Schéma pro lapování čelem kotouče	28
Obr. 3-2 Schéma pro lapování obvodem kotouče	29
Obr. 3-3 Přítlak pomocí zkrutné pružiny	29
Obr. 3-4 Uložení páky na hřídel motoru	30
Obr. 3-5 Čtyř-kloubový mechanismus	30
Obr. 3-6 Kulisový mechanismus	31
Obr. 3-7 Leštící pasta	32
Obr. 3-8 Diamantová suspenze	32
Obr. 3-9 Součásti hliníkového konstrukčního systému Alutec	33
Obr. 3-10 Modelářské servo	35
Obr. 3-11 Snímače krajní polohy	36
Obr. 3-12 Arduino Mega 2560 R3	37
Obr. 3-13 Raspberry Pi 2 [21]	37
Obr. 3-14 Integrovaný obvod L293D [22]	38
Obr. 3-15 Integrovaný obvod L298N	39
Obr. 3-16 Driver Polu A4988 pro krokové motory	39
Obr. 4-1 Kalený nástroj	41
Obr. 4-2 Nástroj z polyamidu	41
Obr. 4-3 Unašeč	41
Obr. 4-4 Soustruh v dílně ÚK	41
Obr. 4-5 Porovnání povrchu po prvním a druhém leštění	42
Obr. 4-6 Model výsledného zařízení	43
Obr. 4-7 Sestavené zařízení	43

Obr. 4-8 Nosný rám	44
Obr. 4-9 Stavěcí patky	44
Obr. 4-10 Soudeček se středícími důlky	45
Obr. 4-11 Soudeček s hřídelkou	45
Obr. 4-12 Uložení poháněného hrotu	45
Obr. 4-13 Uložení soudečku s hřídelkou	46
Obr. 4-14 Umístění dorazu na rámu	47
Obr. 4-15 Přítlačný hrot	47
Obr. 4-16 Vlnovcové pružiny firmy Smaley	48
Obr. 4-17 Uložení čepu páky	48
Obr. 4-18 Uložení nástroje	49
Obr. 4-19 Stupnice na rámu	50
Obr. 4-20 Stupnice na páce	50
Obr. 4-21 Změna poloměru křivosti soudečku	50
Obr. 4-22 Pohon soudečku	51
Obr. 4-23 Vany na leštící kapaliny	52
Obr. 4-24 Držák na vany	52
Obr. 4-25 Upínání soudečku	52
Obr. 4-26 Krytování řemenového převodu	53
Obr. 4-27 Krabíčka pro odložení nástrojů	53
Obr. 4-28 Blokové schéma zapojení elektroniky	54
Obr. 4-29 Plošný spoj pro řízení motorů a napájení displeje	54
Obr. 4-30 Plošný spoj pro regulaci otáček ventilátorů	55
Obr. 4-31 Servo HS-805 MG	56
Obr. 4-32 Krabice s řídicí elektronikou na rámu stroje	57
Obr. 4-33 Ovládací prvky	57
Obr. 4-34 Zadní strana	57
Obr. 4-35 Úvodní obrazovka	58
Obr. 4-36 Zadání poloměru soudečku	58
Obr. 4-37 Struktura řídicího programu	59
Obr. 4-38 Struktura po broušení	60
Obr. 4-39 Odstranění struktury po broušení	60
Obr. 4-40 Zjemnění struktury	60
Obr. 4-41 Finální doleštění	60
Obr. 5-1 Nástroj pro leštění s filcem	62
Obr. 5-2 Porovnání vyleštěného (vlevo) a nevyleštěného soudečku (vpravo)	63
Obr. 5-3 Kontakt neobrobeného soudečku s diskem	63
Obr. 5-4 Kontakt obrobeného soudečku s diskem	63
Obr. 5-5 Srovnání kontaktu testovaných soudečků	64
Obr. 5-6 Opatřené nástroje	65

10 SEZNAM TABULEK**10**

Tab. 1-1 Dosahované parametry přesnosti a jakosti vnějších ploch obrobenými abrazivními metodami [8]	18
Tab. 3-1 Výhody a nevýhody jednotlivých možností pohonu páky	31
Tab. 3-2 Přehled pohonů uvažovaných pro pohon nástroje a soudečku	34
Tab. 3-3 Přehled mikroprocesorových jednotek uvažovaných pro řízení	38
Tab. 3-4 Srovnání driverů pro krokové motory	40
Tab. 4-1 Parametry dosažené po lapování a leštění	42
Tab. 4-2 Parametry použitých krokových motorů [18]	55
Tab. 4-3 Parametry serva HS-805 MG [23]	56
Tab. 4-4 Pracovní režimy	58
Tab. 4-5 Cena výroby a nákupu jednotlivých položek	61
Tab. 5-1 Porovnání drsnosti a vlnitosti na jednotlivých soudečcích	64

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Zapojení plošného spoje	76
Příloha 2 Schéma zapojení regulátoru ventilátorů	76
Příloha 3 Řídicí program	77

Samostatné přílohy:

Příloha 4 Schéma zapojení

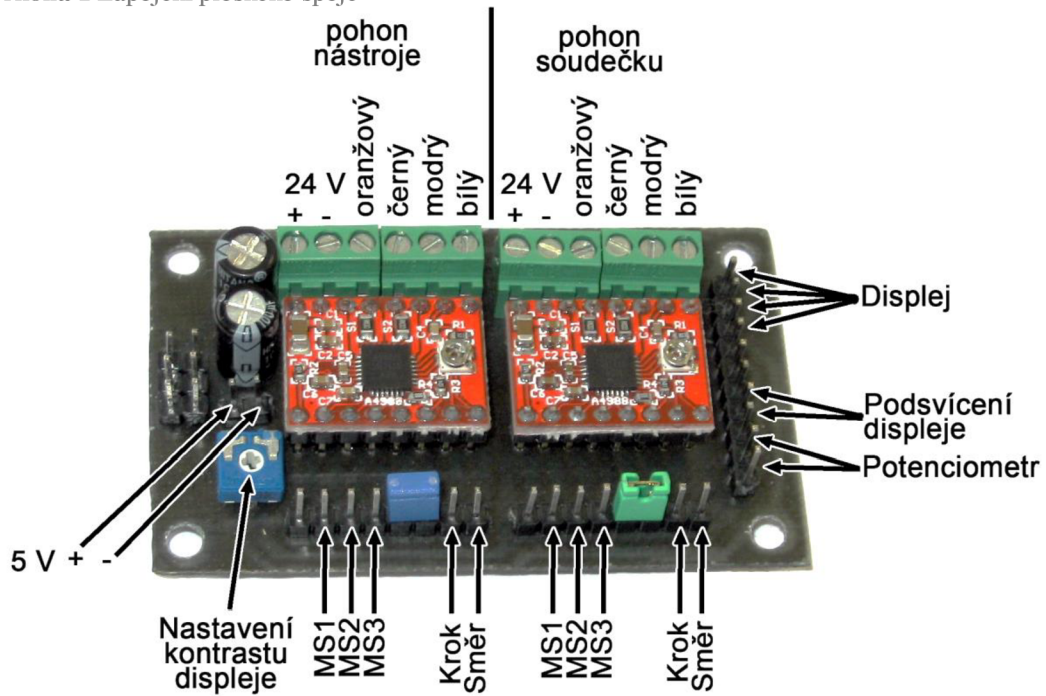
Příloha 5 Návod pro obsluhu zařízení

Příloha 6 Výkresová dokumentace

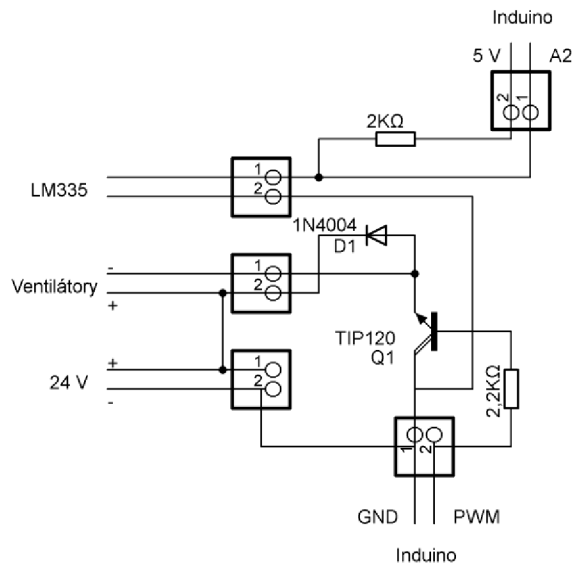
1	Lapovací zařízení	S00-00-00
2	Úchyt krabičky	K21-35-00
3	Doraz	K27-34-00
4	Úchyt	K23-36-00
5	Distanční kostka	K22-34-00
6	Úchyt	K17-30-01
7	Soudeček	Soud 2
8	Držák motoru	K12-17-01
9	Řemenice 30	K24-24-00
10	Hrot unášecí	K03-03-02
11	Unašec	K14-08-00
12	Distanční kroužek	K28-32-00
13	Držák vany	K20-29-00
14	Kryt 1	K29-27-00
15	Kryt 2	K30-26-00
16	Kryt 3	K31-25-00
17	Soudeček K=2,5	TRI-SUD-K2,5
18	Kryt 4	K33-36-05
19	Přítlačný hrot	S01-00-00
20	Domeček 3	K10-20-00
21	Vložka	K09-19-00
22	Hrot podpora	K01-02-00
23	Rám	S03-00-00
24	Profil 1	K32-30-00
25	Distanční podložka	K15-26-00
26	Poháněný hrot	S02-00-00
27	Domeček 2	K07-10-01
28	Vřeteno	K02-03-01
29	Řemenice 22	K25-23-00
30	Uložení nástroje	S04-00-00
31	Domeček 1	K06-07-00
32	Páka	K05-06-00

33	Nástroj	K19-14-03
34	Pinola	K11-13-00
35	Vedení	K08-12-00
36	Spojka	K13-15-00
37	Osa	K04-05-00
38	L-Profil	K18-31-00
39	Držák motoru 2	K19-31-00

Příloha 1 Zapojení plošného spoje



Příloha 2 Schéma zapojení regulátoru ventilátorů



Příloha 3 Řídicí program

```

#include <EEPROM.h>
#include <LiquidCrystal.h>
//LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);
LiquidCrystal lcd(2, 3, 4, 5, 6, 7);
//piny a parametry, které se týkají serva
#include <Servo.h>
Servo myservo;
int pos;
int smer = 1;
int uhel1;
int uhel2;
int stredovapoloha = 72;
//piny a parametry, které se týkají krokových
motorů 1-motor s nástrojem, 2-pohon soudeč-
ku
int step1 = 43;
int step1LH = 1;
int direction1 = 41;
int directionLH = 1;
int MS11 = 45; //piny pro zapnutí
mikrokrokování
int MS21 = 47;
int MS31 = 49;
long PulPerioda1;
long PP1;
long PP1min;
long PP1max;
long previousmicros1 = 0;
int step2 = 46;
int step2LH = 1;
int direction2 = 48;
int MS12 = 40; //piny pro zapnutí
mikrokrokování
int MS22 = 42;
int MS32 = 44;
long PulPerioda2;
long PP2;
long PP2min;
long PP2max;
long PulPerioda2ROZB;
long previousmicros2 = 0;
int speakerPin = 13; //piezo
int cidloteploty = A0;
int potValue; //potenciometr
int potPin = A1; //pin potenciome-
tru
int key=97;
int otackysoudecku;
int ZdvihyZaMinutu;
long otackynastroje;
int dobaprovozu;
int polomer;
int uhel;
int variable;
unsigned long time; //proměnná pro
uložení času

unsigned long currenttime; //okamžitý
čas
long previousMillis = 0;
long interval = 20; //prodleva pro
naklopení serva o 1 stupeň
int delay5; //prodleva při testo-
vání úhlu výkyvu
//piny s tlačítky
int enter = 25;
int test = 23;
int start = 27;
int cislopracovnihocyklu;
int makro = 0;
int CisloMakra;
int delay1 = 1; //prodleva v opako-
vání for
int delay2 = 500; //doba zobrazení
textu po stisknutí tlačítka
int delay3 = 200; //délka pípnutí
int frekvence = 1000; //frekvence pípá-
ní
int delay4 = 300; //délka pípnutí
int frekvence1 = 300; //frekvence pípá-
ní

int vetrak30 = 11; //definice řídicího
pinu
int OtackyVetrak30; //otáčky větráku
v procentech
int teplota; //otáčky větráku v
procentech
int otaceninastroj; //směr otáčení ná-
stroje
int otacenisoudecek; //směr otáčení
soudečku
int otackysoudeckuMIN;
int otackysoudeckuMAX;
int otackynastrojeMIN;
int otackynastrojeMAX;
int x;
//-----
void setup() {
myservo.attach(12); //servo připoje-
no k pinu 12
pos = stredovapoloha;
pinMode(step1,OUTPUT);
pinMode(direction1,OUTPUT);
pinMode(MS11,OUTPUT);
pinMode(MS21,OUTPUT);
pinMode(MS31,OUTPUT);
pinMode(step2,OUTPUT);
pinMode(direction2,OUTPUT);
pinMode(MS12,OUTPUT);
pinMode(MS22,OUTPUT);
pinMode(MS32,OUTPUT);

```



```

//načtení otáček větráků z eeprom
pinMode(vetrak30,OUTPUT);
OtackyVetrak30 = EEPROM.read(10);
analogWrite(vetrak30, OtackyVetrak30);
//načtení směru otáčení nástroje z eeprom
otaceninastroj = EEPROM.read(11);
if(otaceninastroj == 0){
  digitalWrite(direction1,LOW);
}
else
{
  digitalWrite(direction1,HIGH);
}
//načtení směru otáčení soudečku z eeprom
otacenisoudecek = EEPROM.read(12);
if(otacenisoudecek == 0){
  digitalWrite(direction2,LOW);
}
else
{
  digitalWrite(direction2,HIGH);
}
pinMode(enter, INPUT_PULLUP);
pinMode(start, INPUT_PULLUP);
pinMode(test, INPUT_PULLUP);
Serial.begin(9600);
lcd.begin(16, 2);
//vypsání informací o verzi programu na
displej
lcd.print(__FILE__);
lcd.setCursor(5,0);
lcd.print(" ");
lcd.setCursor(8,0);
lcd.print(__TIME__);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(__DATE__);
//vstup do nastavení key=v
if (digitalRead(enter) == LOW)
{
  Serial.println("Nastavení");
  key = 118;
}
tone(speakerPin, 1000);
delay(1000);
noTone(speakerPin);
lcd.clear();
}
//-----
void loop(){
  switch (key) {
    //-----
    case 'a':
      //volba velikosti poloměru křivosti soudeč-
ku podle toho se spočítá úhel o který se může
servo naklápět
      //při stisku start přejde program do ručního
nastavení všech vstupních parametrů
myservo.write(stredovapoloha);
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Polomer soudecku");
potValue = analogRead(potPin);
polomer = map(potValue, 0, 1023, 28, 115);
if(polomer >= 100){
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(polomer);
}
else
{
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("0");
  lcd.setCursor(1, 1);
  lcd.print(polomer);
}
lcd.setCursor(4,1);
lcd.print("mm");
if (digitalRead(test) == LOW){
  tone(speakerPin, frekvence);
  delay(delay3);
  noTone(speakerPin);
  uhelprepocet();
  Serial.println("test uhlu vykyvu");
  lcd.clear();
  key = 105;
  delay(delay2);
}
if (digitalRead(enter) == LOW){
  variable = polomer;
  uhelprepocet();
  enterBTN();
}
if (digitalRead(start) == LOW){
  pipnuti();
  Serial.println("zadani otacek");
  lcd.clear();
  key = 106;
  delay(delay2);
}
delay(delay1);
break;
//-----
case 'b':
  //volba pracovního režimu ze třech předna-
stavených režimů, zjištěných jako optimální
při testování
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Pracovni rezim:");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(" ");
  potValue = analogRead(potPin);
  CisloMakra = map(potValue, 0, 1023, 1, 4);
  if (CisloMakra == 1){
    lcd.setCursor(0, 1);

```

```

    lcd.print("Hrubovani");
    otackysoudecku = 180;
    otackynastroje = 160;
    // ZdvihyZaMinutu = 25;
    cislopracovnihocyklu = 101;
}
if (CisloMakra == 2){
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Zjemneni");
    otackysoudecku = 397;
    otackynastroje = 100;
    //ZdvihyZaMinutu = 10;
    cislopracovnihocyklu = 102;
}
if (CisloMakra == 3){
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Lesteni filcem");
    otackysoudecku = 397;
    cislopracovnihocyklu = 103;
}
if (digitalRead(enter) == LOW){
    otackynastroje_prepocet();
    otackysoudecku_prepocet();
    //interval =
1000/ZdvihyZaMinutu*60/2/uhel;
    interval = 20;
    Serial.print("zdvihy za minutu = ");
    Serial.println(ZdvihyZaMinutu);
    Serial.print("doba provozu = ");
    Serial.print(dobaprovozu);
    Serial.println(" minut");
    pipnuti();
    lcd.clear();
    key = 99;
}
delay(200);
break;
//-----
----- case 'c':
//volba doby provozu
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Doba provozu");
    potValue = analogRead(potPin);
    dobaprovozu = map(potValue, 0, 1023, 1,
20);
    if(dobaprovozu >= 10)
    {
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print((dobaprovozu));
    }
    else
    {
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("0");
        lcd.setCursor(1, 1);
        lcd.print((dobaprovozu));
    }
    lcd.setCursor(3,1);

    lcd.print("minut");
    if (digitalRead(enter) == LOW){
        variable = dobaprovozu;
        enterBTN();
    }
    delay(delay1);
    break;
//-----
-----
case 'd':
    //otázka jestli se má stroj spustit
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Spustit stroj?");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print((dobaprovozu));
    lcd.setCursor(3,1);
    lcd.print("minut");
    if (digitalRead(start) == LOW){
        pipnuti();
        lcd.clear();
        key = cislopracovnihocyklu;
        delay(delay2);
    }
    delay(delay1);
    break;
//-----
----- //hrubování změna směru otáčení
každých 15 sekund
case 'e':
    Serial.print("hrubovani");
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Zbyvajici cas:");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print((dobaprovozu));
    lcd.setCursor(3, 1);
    lcd.print("minut");
    rozbehS();
    for (int i = 0; i < dobaprovozu;i++)
    {
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Zbyvajici cas:");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print((dobaprovozu-i));
        lcd.setCursor(3, 1);
        lcd.print("minut");
        time=millis();
        currenttime = time;
        for(int j = 0; j < 4;j++)
        {
            time=millis();
            currenttime = time;
            if(directionLH == 1)
            {
                digitalWrite(direction1,HIGH);
                directionLH = 0;
            }
        }
    }
}

```

```

else
{
digitalWrite(direction1,LOW);
directionLH = 1;
}

while(time < currenttime + 15000L){
time=millis();
pracovnicykklus();
// MereniTeploty();
}
}
}
lcd.clear();
key = 104;
break;

//-----
//změna otáček nástroje každou půl vteřinu, každých 10 sekund
//zmena směru otáčení nástroje
case 'f':
Serial.print("zjemneni");
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("celkový čas:");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print((dobaprovozu));
lcd.setCursor(3, 1);
lcd.print("minut");
rozbehS();
for (int i = 0; i < dobaprovozu;i++)
{
time=millis();
currenttime = time;
for(int k = 0; k < 6;k++)
{
time=millis();
currenttime = time;
if(directionLH == 1)
{
digitalWrite(direction1,HIGH);
directionLH = 0;
}
else
{
digitalWrite(direction1,LOW);
directionLH = 1;
}
}
for (int j = 0; j < 20;j++)
{
time=millis();
currenttime = time;
PP1=random(25,50);
while(time < currenttime + 500L){
time=millis();
pracovnicykklus();
}
}
}

// MereniTeploty();
}
}
}
lcd.clear();
key = 104;
break;
//-----
//pouze otáčení nástroje dokud se nestiskne enter
case 'g':
Serial.println("lesteni");
lcd.clear();
lcd.print("Lesteni filcem");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Ukonci enterem");
rozbehS();
time=millis();
currenttime = time;
while(digitalRead(enter) == HIGH){
time=millis();
otacenisoudecku();
}
brzdeniS();
pipnuti();
lcd.clear();
key = 104;
break;
//-----
case 'h':
//oznámení konce programu ozve se zapípání,
//poté je možné zařízení znova spustit se stejným nastavením tlačítkem start
lcd.clear();
lcd.print("Program ukoncen");
Serial.println("program ukoncen");
for (int i = 1; i<5; i++)
{
tone(speakerPin, frekvence);
delay(delay4);
noTone(speakerPin);
delay(delay4);
}
lcd.clear();
key=100;
break;
//-----
case 'i':
//otestování úhlu výkyvu
lcd.clear();
lcd.print("Test:");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Uhel vykyvu");

```

```

    potValue = analogRead(potPin);
    delay5 = 25;
    kyvavypohyb();
    pipnuti();
    lcd.clear();
    key = 97;
    break;
//-----
//ruční nastavení
//-----
case 'j':
    // nastavení otáček
    myservo.write(stredovapoloha);
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Otacky soudecku");
    potValue = analogRead(potPin);
    otackysoudecku = map(potValue, 0, 1023,
20, 400);
    if(otackysoudecku >= 100){
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(otackysoudecku);
    }
    else
    {
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("0");
        lcd.setCursor(1, 1);
        lcd.print(otackysoudecku);
    }
    lcd.setCursor(4,1);
    lcd.print("za minutu");
    if (digitalRead(test) == LOW){
        pipnuti();
        otackysoudecku_prepcet();
        Serial.println("test otacek soudecku");
        lcd.clear();
        key = 114;
        delay(delay2);
    }
    if (digitalRead(enter) == LOW){
        variable = otackysoudecku;
        otackysoudecku_prepcet();
        enterBTN();
    }
    if (digitalRead(start) == LOW){
        pipnuti();
        Serial.println("pracovni rezimy");
        lcd.clear();
        key = 97;
        delay(delay2);
    }
    delay(delay1);
    break;
//-----
case 'k':
    // otáčky nástroje
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Otacky nástroje");
    potValue = analogRead(potPin);
    otackynastroje = map(potValue, 0, 1023,
20, 300);
    if(otackynastroje >= 100){
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(otackynastroje);
    }
    else
    {
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("0");
        lcd.setCursor(1, 1);
        lcd.print(otackynastroje);
    }
    lcd.setCursor(4,1);
    lcd.print("za minutu");
    if (digitalRead(test) == LOW){
        tone(speakerPin, frekvence);
        delay(delay3);
        noTone(speakerPin);
        otackynastroje_prepcet();
        Serial.println("test otacek nástroje");
        lcd.clear();
        key = 115;
        delay(delay2);
    }
    if (digitalRead(enter) == LOW){
        variable = otackynastroje;
        otackynastroje_prepcet();
        enterBTN();
    }
    delay(delay1);
    break;
//-----
case 'l':
    // poloměr křivosti soudecku
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Polomer soudecku");
    potValue = analogRead(potPin);
    polomer = map(potValue, 0, 1023, 28, 115);
    if(polomer >= 100){
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(polomer);
    }
    else
    {
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("0");
        lcd.setCursor(1, 1);
        lcd.print(polomer);
    }
    lcd.setCursor(4,1);
    lcd.print("mm");
    if (digitalRead(test) == LOW){

```

```

tone(speakerPin, frekvence);
delay(delay3);
noTone(speakerPin);
uhelprepocet();
Serial.println("test uhlu vykyvu");
lcd.clear();
key = 116;
delay(delay2);
}
if (digitalRead(enter) == LOW){
  variable = polomer;
  uhelprepocet();
  enterBTN();
}
delay(delay1);
break;
//-----
case 'm':
  // zadání rychlosti natáčení serva
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Pocet zdvihů");
  potValue = analogRead(potPin);
  ZdvihyZaMinutu = map(potValue, 0, 1023,
5, 120);
  if(ZdvihyZaMinutu >= 10){
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(ZdvihyZaMinutu);
  }
  else
  {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("0");
    lcd.setCursor(1, 1);
    lcd.print(ZdvihyZaMinutu);
  }
  lcd.setCursor(4, 1);
  lcd.print("za minutu");
  if (digitalRead(test) == LOW){
    tone(speakerPin, frekvence);
    delay(delay3);
    noTone(speakerPin);
    interval =
1000/ZdvihyZaMinutu*60/2/uhel;
    Serial.println("test uhlu vykyvu");
    lcd.clear();
    key = 117;
    delay(delay2);
  }
  if (digitalRead(enter) == LOW){
    variable = ZdvihyZaMinutu;
    interval =
1000/ZdvihyZaMinutu*60/2/uhel;
    Serial.println(interval);
    enterBTN();
  }
  delay(delay1);
  break;
//-----
case 'n':
  // zadání doby provozu
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Doba provozu");
  potValue = analogRead(potPin);
  dobaprovozu = map(potValue, 0, 1023, 1,
300);
  if(dobaprovozu >= 10)
  {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print((dobaprovozu));
  }
  else
  {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("0");
    lcd.setCursor(1, 1);
    lcd.print((dobaprovozu));
  }
  lcd.setCursor(3,1);
  lcd.print("minut");
  if (digitalRead(enter) == LOW){
    variable = dobaprovozu;
    enterBTN();
  }
  delay(delay1);
  break;
//-----
case 'o':
  //vyzvání ke spuštění stroje
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Spustit stroj?");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print((dobaprovozu));
  lcd.setCursor(3, 1);
  lcd.print("minut");
  if (digitalRead(start) == LOW){
    pipnutí();
    lcd.clear();
    key++;
    delay(delay2);
  }
  delay(delay1);
  break;
//-----
case 'p':
  //změna otáček nástroje každou půl vteřinu, každých 10 sekund
  //změna směru otáčení nástroje
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Zbyvajici cas:");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print((dobaprovozu));

```



```

lcd.setCursor(3, 1);
lcd.print("minut");
rozbehS();
for (int i = 0; i < dobaprovozu;i++)
{
  time=millis();
  currenttime = time;
  for(int k = 0; k < 6;k++)
  {
    time=millis();
    currenttime = time;
    if(directionLH == 1)
    {
      digitalWrite(direction1,HIGH);
      directionLH = 0;
    }
    else
    {
      digitalWrite(direction1,LOW);
      directionLH = 1;
    }
    for (int j = 0; j < 20;j++)
    {
      time=millis();
      currenttime = time;
      PP1=random(25,50);
      while(time < currenttime + 500L){
        time=millis();
        pracownicyklus();
        // MereníTeploty();
      }
    }
  }
}
lcd.clear();
key++;
break;
//-----

//ukončení programu a oznámení pípnutím
case 'q':
  lcd.clear();
  lcd.print("Program ukoncen");
  for (int i = 1; i<5; i++)
  {
    tone(speakerPin, frekvence);
    delay(delay4);
    noTone(speakerPin);
    delay(delay4);
  }
  lcd.clear();
  key=111;
  break;
//-----

case 'r':
  //provede se roztočení soudečku a zastavení
  po 5 sekundách
  lcd.clear();
  lcd.print("Test:");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Otacky soudecku");
  rozbehS();
  time=millis();
  currenttime = time;
  while(time < currenttime + 5000L){
    time=millis();
    otacenisoudecku();
  }
  brzdeniS();
  pipnuti();
  lcd.clear();
  key = 106;
  break;
//-----

case 's':
  //provede se roztočení nástroje a zastavení
  po 5 sekundách
  lcd.clear();
  lcd.print("Test:");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Otacky nástroje");

  time=millis();
  currenttime = time;
  while(time < currenttime + 5000){
    time=millis();
    otaceninastroje();
  }
  pipnuti();
  lcd.clear();
  key = 107;
  break;
//-----

case 't':
  //provede se výkyv o úhel, který se spočítá
  ze zadaného poloměru soudečku
  lcd.clear();
  lcd.print("Test:");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Uhel vykyvu");

  potValue = analogRead(potPin);
  delay5 = 25;
  kyvavypohyb();
  pipnuti();
  lcd.clear();
  key = 108;
  break;
//-----

case 'u':
  // provedou se dva výkyvy zvolenou rych-
  lostí kývání

```

```

lcd.clear();
lcd.print("Test:");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Rychlost kmitani");
delay5 = interval;
Serial.println(delay5);
for (int i = 1; i<3; i++)
{
  kyvavypohyb();
}
pipnuti();
lcd.clear();
key = 109;
break;
//-----
-----
case 'v':
  // nastavení otáček větráku, která se uloží a
  vždy načtou po restartu
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Ot. vetraku");
  potValue = analogRead(potPin);
  OtackyVetrak30 = map(potValue, 0, 1023,
30, 150);
  if(OtackyVetrak30 >= 100){
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(OtackyVetrak30);
  }
  else
  {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("0");
    lcd.setCursor(1, 1);
    lcd.print(OtackyVetrak30);
  }
  lcd.setCursor(3, 1);
  lcd.print("%");
  analogWrite(vetrak30, OtackyVetrak30);
//map(OtackyVetrak30, 30, 150, 30, 150)
  if (digitalRead(enter) == LOW){
    EEPROM.write(10, OtackyVetrak30);
//map(OtackyVetrak30, 0, 150, 0, 190)
    Serial.print("EEPROM write (30 mm) =
");
    Serial.println(OtackyVetrak30);
    pipnuti();
    delay(delay2);
    lcd.clear();
    key++;
  }
  delay(delay1);
  break;
//-----
-----
case 'w':
  //nastavení výchozího smru otáčení nástroje
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Smer otaceni");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("nastroje:");
  potValue = analogRead(potPin);
  otaceninastroj = map(potValue, 0, 1023, 0,
2);
  lcd.setCursor(10, 1);
  lcd.print(otaceninastroj);
  if (digitalRead(enter) == LOW)
  {
    EEPROM.write(11, otaceninastroj);
    Serial.print("EEPROM write (otace-
ninastroj) = ");
    Serial.println(EEPROM.read(11));
    pipnuti();
    delay(delay2);
    lcd.clear();
    key++;
  }
  delay(delay1);
  break;
//-----
-----
case 'x':
  //nastavení směru otáčení soudečku
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Smer otaceni");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("soudecku:");
  potValue = analogRead(potPin);
  otacenisoudecek = map(potValue, 0, 1023,
0, 2);
  lcd.setCursor(10, 1);
  lcd.print(otacenisoudecek);
  if (digitalRead(enter) == LOW)
  {
    EEPROM.write(12, otacenisoudecek);
    Serial.print("EEPROM write (otacenisou-
decek) = ");
    Serial.println(EEPROM.read(12));
    pipnuti();
    delay(delay2);
    lcd.clear();
    key++;
  }
  delay(delay1);
  break;
//-----
-----
case 'y':
  lcd.clear();
  lcd.print("Pokracuj stiskem");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("tlacitka reset");
  delay(10000);
  break;
}
MereniTeploty();
}

```

```

//=====
void enterBTN()
{
  //podprogram vyvolaný při stisku tlačítka
  enter
  //vyvolá prodprogram pipnutí, který zapípá
  //vypíše do serial monitoru hodnotu nastave-
  né proměnné
  //přeskočí na další key hodnotu
  pipnutí();
  Serial.print("variable = ");
  Serial.println(variable);
  key++;
  delay(delay2);
  lcd.clear();
}
//-----
void pipnutí()
{
  tone(speakerPin, frekvence);
  delay(delay3);
  noTone(speakerPin);
}
//=====
unsigned long previousmillis2 = 0;
float konstanta = 1;
void MereniTeploty()
{
  unsigned long currentmillis2 = millis();
  if((currentmillis2 - previousmillis2) >
  5000L){
    previousmillis2 = currentmillis2;
    int rawvoltage= analogRead(cidloteploty);
    float millivolts=(rawvoltage/1024.0) *
  5000;
    float kelvin=(millivolts/10);
    float celsius= kelvin - 278; //korekce
    původní hodnota 273.15
    Serial.print(celsius);
    Serial.println(" degrees Celsius");
    if(celsius < 25){konstanta = 1;}
    if(celsius >= 25 && celsius <
  27){konstanta = 1.3;}
    if(celsius > 27 && celsius < 28){konstanta
  = 1.5;}
    if(celsius > 28){konstanta = 1.7;}
    Serial.println(konstanta);
    analogWrite(vetrak30, Otacky-
  Vetrak30*konstanta);
  }
}
//=====
void otackynastroje_prepecet()
{
  //přepočítá pulperiodu podle zadaných otá-
  ček a vypíše ji do serial monitoru
  //nastaví mikrokrokování na 16
  PulPerioda1 =
  1000L*1000L/200L/otackynastroje*60L/2L/1.
  08;
  Serial.print("PulPerioda1 = ");
  Serial.println(PulPerioda1);
  // if( PulPerioda1 >= 5000)
  // {
  Serial.println("Mikrokrokovani = 16");
  PP1 = PulPerioda1/16;
  Serial.print("PP1 = ");
  Serial.println(PP1);
  digitalWrite(MS11,HIGH);
  Serial.print("MS11 = ");
  Serial.println("HIGH");
  digitalWrite(MS21,HIGH);
  Serial.print("MS21 = ");
  Serial.println("HIGH");
  digitalWrite(MS31,HIGH);
  Serial.print("MS31 = ");
  Serial.println("HIGH");
  PP1min = PP1 - 20;
  Serial.print("PP1min = ");
  Serial.println(PP1min);
  PP1max = PP1 + 100;
  Serial.print("PP1max = ");
  Serial.println(PP1max);
}
//-----
void otaceninastroje()
{
  unsigned long currentmicros1 = micros();
  if((currentmicros1 - previousmicros1) >
  PP1){
    previousmicros1 = currentmicros1;
    if(step1LH == 1){
      digitalWrite(step1,HIGH);
      step1LH = 2;
    }
    else{
      digitalWrite(step1,LOW);
      step1LH = 1;
    }
  }
}
//=====
void otackysoudecku_prepecet()
{
  //přepočítá pulperiodu podle zadaných otá-
  ček a vypíše ji do serial monitoru
  //nastaví mikrokrokování na 16
  PulPerioda2 =
  1000L*1000L/200L/otackysoudecku*60L/2L
  *1.22;
  Serial.print("PulPerioda2 = ");
  Serial.println(PulPerioda2);
  Serial.println("Mikrokrokovani = 16");
  PP2 = PulPerioda2/16;
}

```

```

Serial.print("PP2 = ");
Serial.println(PP2);
digitalWrite(MS12,HIGH);
Serial.print("MS12 = ");
Serial.println("HIGH");
digitalWrite(MS22,HIGH);
Serial.print("MS22 = ");
Serial.println("HIGH");
digitalWrite(MS32,HIGH);
Serial.print("MS32 = ");
Serial.println("HIGH");

//výpočet maximální a minimální frekvence
motorů pro hrubovací program
PP2min = PP2 - 5;
Serial.print("PP2min = ");
Serial.println(PP2min);
PP2max = PP2 + 5;
Serial.print("PP2max = ");
Serial.println(PP2max);
}
//-----
void otacenisoudecku()
{
  unsigned long currentmicros2 = micros();
  if((currentmicros2 - previousmicros2) >
  PP2){
    previousmicros2 = currentmicros2;
    if(step2LH == 1){
      digitalWrite(step2,HIGH);
      step2LH = 2;
    }
    else{
      digitalWrite(step2,LOW);
      step2LH = 1;
    }
  }
}
//=====
void pracovnicykus()
{
  // OTÁČENÍ NÁSTROJE
  unsigned long currentmicros1 = micros();
  if((currentmicros1 - previousmicros1) >
  PP1){
    previousmicros1 = currentmicros1;
    if(step1LH == 1){
      digitalWrite(step1,HIGH);
      step1LH = 2;
    }
    else{
      digitalWrite(step1,LOW);
      step1LH = 1;
    }
  }
}
//-----
-----
// OTÁČENÍ SOUDEČKU
unsigned long currentmicros2 = micros();
if((currentmicros2 - previousmicros2) >
PP2){
  previousmicros2 = currentmicros2;
  if(step2LH == 1){
    digitalWrite(step2,HIGH);
    step2LH = 2;
  }
  else{
    digitalWrite(step2,LOW);
    step2LH = 1;
  }
}
}
//-----
-----
// KMITÁNÍ SERVA
unsigned long currentMillis = millis();
if((currentMillis - previousMillis) > interval)
{
  previousMillis = currentMillis;
  if(smer == 1){
    if(pos < uhel1){
      pos += 1;
      myservo.write(pos);
      // Serial.println(pos);
    }
    else{
      smer=2;
    }
  }
  if(smer == 2){
    if(pos > uhel2){
      pos -= 1;
      myservo.write(pos);
      // Serial.println(pos);
    }
    else{
      smer=1;
    }
  }
}
}
//=====
void rozbehS()
{
  if(PP2 > 70)
  {
    for (int i = 500; i > PP2;i -= 1)
    {
      for(int j = 1; j < 2;j += 1)
      {
        PulPerioda2ROZB=i;
        digitalWrite(step2,HIGH);
        delayMicroseconds(PulPerioda2ROZB);
        digitalWrite(step2,LOW);
        delayMicroseconds(PulPerioda2ROZB);
      }
    }
  }
}

```

```

    }
  }
  else
  {
    for (int i = 500; i > 70; i -= 1)
    {
      for(int j = 1; j < 2; j += 1)
      {
        PulPerioda2ROZB=i;
        digitalWrite(step2,HIGH);
        delayMicroseconds(PulPerioda2ROZB);
        digitalWrite(step2,LOW);
        delayMicroseconds(PulPerioda2ROZB);
      }
    }
    for (int i = 70; i > PP2; i -= 1)
    {
      for(int j = 1; j < 100; j += 1)
      {
        PulPerioda2ROZB=i;
        digitalWrite(step2,HIGH);
        delayMicroseconds(PulPerioda2ROZB);
        digitalWrite(step2,LOW);
        delayMicroseconds(PulPerioda2ROZB);
      }
    }
  }
}
//-----
void brzdeniS()
{
  if(PP2 < 70)
  {
    for (int i = PP2; i < 70; i += 1)
    {
      for(int j = 1; j < 100; j += 1)
      {
        PulPerioda2ROZB=i;
        digitalWrite(step2,HIGH);
        delayMicroseconds(PulPerioda2ROZB);
        digitalWrite(step2,LOW);
        delayMicroseconds(PulPerioda2ROZB);
      }
    }
    for (int i = 70; i < 500; i += 1)
    {
      for(int j = 1; j < 2; j += 1)
      {
        PulPerioda2ROZB=i;
        digitalWrite(step2,HIGH);
        delayMicroseconds(PulPerioda2ROZB);
        digitalWrite(step2,LOW);
        delayMicroseconds(PulPerioda2ROZB);
      }
    }
  }
}
else
  {
    for (int i = PP2; i < 500; i += 1)
    {
      for(int j = 1; j < 2; j += 1)
      {
        PulPerioda2ROZB=i;
        digitalWrite(step2,HIGH);
        delayMicroseconds(PulPerioda2ROZB);
        digitalWrite(step2,LOW);
        delayMicroseconds(PulPerioda2ROZB);
      }
    }
  }
}
//=====
void uhelprepocet()
{
  //prepocet úhlů pro kývavý pohyb
  //úhly nejsou symetrické
  uhel = polomer;
  Serial.print("uhel = ");
  Serial.println(uhel);
  uhel2 = 0.4 * uhel + 14.1;
  Serial.print("uhel2 = ");
  Serial.println(uhel2);
  uhel1 = -0.3 * uhel + 124;
  Serial.print("uhel1 = ");
  Serial.println(uhel1);
}
//-----
void kyvavypohyb()
//vykonání pohybu do obou uvrátí a zpět do
středové polohy
{
  for(pos = stredovapoloha; pos < uhel1; pos
  += 1)
  {
    myservo.write(pos);
    delay(delay5);
    Serial.println(pos);
  }
  for(pos = uhel1; pos >= uhel2; pos -= 1)
  {
    myservo.write(pos);
    delay(delay5);
    Serial.println(pos);
  }
  for(pos = uhel2; pos <= stredovapoloha;
  pos += 1)
  {
    myservo.write(pos);
    delay(delay5);
    Serial.println(pos);
  }
}
}

```