



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## **OPTIMALIZACE POLOHOVACÍHO SYSTÉMU TESTOVÁNÍ POLOVODIČOVÝCH ČIPŮ**

OPTIMIZATION OF THE POSITIONING SYSTEM OF SEMICONDUCTOR CHIP TESTING

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Tomáš Kotian**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.**

**BRNO 2024**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Bc. Tomáš Kotian

**ID:** 209404

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## Optimalizace polohovacího systému testování polovodičových čipů

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Provedte rešerši na zařízení pro měření a testování polovodičových čipů. Přesněji na probe card systémy. Zaměřte se také na polohovací systémy a jejich přesnost. Navrhněte a realizujte změny na polohovacím systému pro měření polovodičových čipů, které zajistí větší přesnost a využití z pohledu automatické pozice čipu. Upravte řídicí software pro uživatelsky přívětivé používání. Navrhněte a realizujte jednoduchý systém pro vytvoření a umístění testovacích hrotů v nožovém provedení. Ověřte funkčnost všech celého systému a dosažené výsledky sepište v diplomové práci.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 21.5.2024

**Vedoucí práce:** Ing. Alexandr Otáhal, Ph.D.

**doc. Ing. Lukáš Fucik, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Cieľom tejto diplomovej práce bolo vypracovať rešerš, ktorý by zhrnul možnosti testovania čipov a následne navrhnuť a realizovať potrebné zmeny na poloautomatickom polohovacom systéme, ktoré by zabezpečili jeho schopnosť testovať čipy pomocou kariet so sondami. Poloautomatický polohovací systém je výsledkom bakalárskej práce, v ktorej bola overená schopnosť testovania na odporovej sústave vytvorenej na hrubej vrstve. Praktická časť tejto práce je zameraná na presné meranie parametrov prístroja, navrhnutie potrebných zmien na mechanickej časti prístroja a ich realizáciu. Ďalej práca obsahuje návrh a vytvorenie aplikácie pre ovládanie prístroja s automatickou detekciou čipu. Poslednou časťou práce je testovanie prístroja na dvoch čipoch odlišných veľkostí.

## **Kľúčové slová**

polohovací systém pre test polovodičových čipov, karty so sondami, mikroposuvy so sondami, Python, tkinter, OpenCV

## **Abstract**

The goal of this diploma thesis was to gather theoretical information on the possibilities of chip testing and subsequently design and apply necessary changes for the semi automatic positioning system, which would ensure its ability to test chips with the use of probe cards. Semi automatic positioning system is a result of a bachelor thesis, which ensured the ability of the machine to provide testing with the use of a resistance system created on a thick layer. The practical part of this thesis is focused on providing an accurate testing of the machine's parameters and designing and applying necessary changes for the mechanical part of the machine. Furthermore, the thesis also describes the design and creation of an application with automatic detection of a chip, which is used for controlling the machine. The last part of the thesis describes the testing of the machine, which was realized with the use of two different sized chips.

## **Keywords**

positioning system of semiconductor chip testing, probe cards, micropositioners, Python, tkinter, OpenCV

## **Bibliografická citácia**

KOTIAN, Tomáš. Optimalizace polohovacího systému testování polovodičových čipů [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159935>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Alexandr Otáhal.

# Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

**Meno a priezvisko študenta:** Tomáš Kotian

**VUT ID študenta:** 209404

**Typ práce:** Diplomová práce

**Akademický rok:** 2023/24

**Téma závěrečnéj práce:** Optimalizace polohovacího systému  
testování polovodičových čipů

Prehlasujem, že som svoju záverečnú prácu vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: 5.5.2024

-----  
podpis autora

## **Pod'akovanie**

Ďakujem vedúcemu záverečnej práce Ing. Alexandrovi Otáhalovi, Ph.D. za cenné rady a účinnú metodickú a odbornú pomoc pri vypracovaní tejto práce.

V Brne dňa: 5.1.2024

-----  
podpis autora

# Obsah

ÚVOD .....	12
<b>1. TESTOVANIE POLOVODIČOVÝCH ČIPOV .....</b>	<b>13</b>
1.1 TESTOVANIE KREMÍKOVEJ DOSKY .....	13
1.2 TESTOVANIE ZAPUZDRENÝCH ČIPOV .....	14
<b>2. PRÍSTROJE PRE KREMÍKOVÉ DOSKY .....</b>	<b>15</b>
2.1 MANUÁLNE PRÍSTROJE .....	15
2.2 POLOAUTOMATICKÉ PRÍSTROJE .....	17
2.3 AUTOMATICKÉ PRÍSTROJE .....	18
2.4 DRUHY TESTOVANIA .....	19
2.4.1 Charakterizácia súčiastky .....	19
2.4.2 Vysoko výkonové testovanie .....	20
2.4.3 Testovanie pre rádiové a mikrovlnné frekvencie .....	20
2.4.4 Validácia dizajnu .....	20
2.4.5 Analýza chybovosti .....	20
2.4.6 Testovanie spoľahlivosti .....	21
2.4.7 Testovanie kremíkovej fotoniky .....	21
2.4.8 Testovanie MEMS .....	21
<b>3. KONTAKTOVACIE METÓDY .....</b>	<b>22</b>
3.1 MIKROPUSUVY SO SONDAMI .....	22
3.1.1 Manuálny MP40 .....	22
3.1.2 Programovateľný PMP80 .....	23
3.1.3 Sondy .....	24
3.2 KARTY SO SONDAMI .....	24
3.2.1 Karty DRAM .....	25
3.2.2 Flash .....	25
3.2.3 Karty pre výstupnú a vstupnú logiku .....	26
3.2.4 Pyramídové karty pre RF .....	26
3.2.5 Karty pre optiku .....	27
3.2.6 Parametrické karty .....	27
3.2.7 Karty pre 5G a mikrovlnné frekvencie .....	28
3.2.8 Karty cantilever .....	28
<b>4. ÚPRAVY NA PRÍSTROJI .....</b>	<b>30</b>
4.1 PARAMETRE A STAV PRÍSTROJA .....	31
4.2 POTREBNÉ ÚPRAVY NA PRÍSTROJI .....	32
4.3 NÁVRH ROZŠÍRENIA HLAVNEJ DOSKY .....	32
4.4 NÁVRH KONTAKTOVACEJ HLAVY .....	33
4.5 NÁVRH OPTICKEJ SÚSTAVY .....	35
4.5.1 Výber kamery a objektívu .....	35
4.5.2 Návrh hlavy pre optickú sústavu .....	36
4.5.3 Návrh osvetlenia .....	36
4.6 NÁVRH KARTY SO SONDAMI .....	39
4.7 MOŽNOSTI UCHYTENIA IHLIČKY NA SONDU .....	40

4.7.1	<i>Odporové bodové zvaranie ihličiek</i> .....	40
4.7.2	<i>Prilepenie ihličky</i> .....	41
4.7.3	<i>Prispájkovanie ihličky cínom</i> .....	42
4.8	NÁVRH FIXÁCIE KARTY SO SONDAMI .....	42
4.9	NÁVRH PRE OSADZOVANIE SOND NA KARTU .....	43
4.10	NÁVRH VÁKUOVÉHO STOLČEKA .....	46
4.11	NÁVRH ELEKTRONICKÉHO ZAPOJENIA .....	48
<b>5.</b>	<b>REALIZOVANÉ ZMENY NA KONŠTRUKCII</b> .....	<b>50</b>
<b>6.</b>	<b>SOFTVÉR</b> .....	<b>54</b>
6.1	PŮVODNÁ APLIKÁCIA .....	54
6.2	POŽIADAVKY NA NOVÝ SOFTVÉR .....	55
6.3	PYTHON.....	55
6.4	PYTHON MODULY .....	56
6.4.1	<i>pySerial</i> .....	56
6.4.2	<i>tkinter</i> .....	56
6.4.3	<i>OpenCV</i> .....	56
6.4.4	<i>Pillow</i> .....	56
6.4.5	<i>NumPy</i> .....	57
6.5	VIRTUÁLNE PROSTREDIE.....	57
6.6	INŠTALÁCIA A SPUSTENIE APLIKÁCIE .....	57
6.7	ARCHITEKTÚRA APLIKÁCIE.....	57
6.8	VYTVORENIE GUI .....	59
6.9	AUTOMATICKÉ PRIPOJENIE TCM .....	60
6.10	NASTAVENIE PARAMETROV .....	60
6.11	HĽADANIE REFERENCIÍ .....	61
6.12	ČAKANIE NA PRÍKAZ.....	62
6.13	DETEKCIA ČIPU.....	63
6.14	AUTOMATICKÉ PRIPOJENIE KAMERY .....	64
6.15	OBNOVOVANIE OBRAZU .....	64
6.16	OPAKUJÚCE SA ÚLOHY .....	64
<b>7.</b>	<b>TESTOVANIE</b> .....	<b>65</b>
7.1	PARAMETRE PRÍSTROJA .....	66
7.2	POSTUP PRI PRAKTICKOM TESTOVANÍ .....	67
7.3	KD610 .....	68
7.4	KF506.....	69
<b>8.</b>	<b>ZÁVER</b> .....	<b>70</b>
	<b>LITERATÚRA</b> .....	<b>71</b>
	<b>ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK</b> .....	<b>74</b>
	<b>ZOZNAM PRÍLOH</b> .....	<b>76</b>

# Zoznam obrázkov

Obrázok 1.1 Testovanie kremíkovej dosky .....	13
Obrázok 1.2 Testovanie zapuzdreného čipu.....	14
Obrázok 2.1 MPI T150 [3] .....	16
Obrázok 2.2 MPI TS2000 [4] .....	17
Obrázok 2.3 MPI TS3500 [5] .....	19
Obrázok 3.1 MP40 [14] .....	22
Obrázok 3.2 PMP80 [14].....	23
Obrázok 3.3 a) Sondy pre malé signály, b) vysoké frekvencie a c) kremíkovú fotoniku [14] [8] [12].....	24
Obrázok 3.4 Karta so sondami pre DRAM [15].....	25
Obrázok 3.5 Karta so sondami pre FLASH [16].....	25
Obrázok 3.6 Karta pre výstupnú a vstupnú logiku [17].....	26
Obrázok 3.7 Pyramídové karty pre RF [18].....	26
Obrázok 3.8 Karty pre optiku [19].....	27
Obrázok 3.9 Parametrická karta [20] .....	27
Obrázok 3.10 Karta pre 5G a mikrovlnné frekvencie [21] .....	28
Obrázok 3.11 a) Cantilever karty so sondami vysoko výkonové, b) nízko teplotné a c) nízko nakladové [22]	29
Obrázok 4.1 Pôvodný prístroj .....	30
Obrázok 4.2 Model navrhnutého rozšírenia hlavnej dosky .....	33
Obrázok 4.3 Pôvodná kontaktovacia hlava prístroja .....	33
Obrázok 4.4 Model navrhnutej kontaktovacej hlavy.....	34
Obrázok 4.5 Ohnisková vzdialenosť [25] .....	35
Obrázok 4.6 Model hlavy pre kameru a objektív .....	36
Obrázok 4.7 Kryt s difúzorom pre LED kruhový modul.....	37
Obrázok 4.8 Časový diagram ovládacieho signálu .....	37
Obrázok 4.9 Blokovo schéma zapojenia LED modulu.....	38
Obrázok 4.10 Blokovo diagram pre funkciu osvetlenia .....	39
Obrázok 4.11 Model navrhnutého prípravku na osadzovanie ihličky a karta so sondami .....	40
Obrázok 4.12 Zvar ihličky bodovou zvaračkou .....	41
Obrázok 4.13 Prilepená ihlička.....	41
Obrázok 4.14 Prispájkovaná ihlička .....	42
Obrázok 4.15 Model fixovania karty so sondami.....	42
Obrázok 4.16 Model navrhnutého osadzovacieho prípravku pre sondy .....	43
Obrázok 4.17 Koncept sústavy na osadzovanie sond .....	44
Obrázok 4.18 Model zjednodušeného osadzovacieho prípravku pre sondy .....	44
Obrázok 4.19 Schéma zapojenia elektromagnetu.....	45
Obrázok 4.20 Blokovo diagram ovládania elektromagnetu .....	46
Obrázok 4.21 Model navrhnutého vákuového stolčeka .....	47
Obrázok 4.22 Model navrhnutého ovládania vákua .....	48
Obrázok 4.23 Blokovo schéma .....	49
Obrázok 5.1 Rozobratý prístroj.....	50
Obrázok 5.2 Pripevnená rozširujúca doska .....	50
Obrázok 5.3 Poskladaná kontaktovacia hlava .....	51
Obrázok 5.4 Poskladaná optická hlava .....	51
Obrázok 5.5 Drážka pre kartu so sondami .....	52
Obrázok 5.6 Poskladaný prípravok na osadzovanie sond.....	52

Obrázok 5.7 Poskladaný vákuový stolček.....	53
Obrázok 5.8 Kryt elektroniky a ochrana vodičov.....	53
Obrázok 6.1 Grafické rozhranie pôvodného softvéru.....	54
Obrázok 6.2 Diagram prepojenia počítaču s prístrojom.....	55
Obrázok 6.3 Vrstvy aplikácie .....	58
Obrázok 6.4 Vývojový diagram aplikácie.....	58
Obrázok 6.5 Návrh GUI aplikácie .....	59
Obrázok 6.6 Postup hľadanie referencie [32].....	61
Obrázok 6.7 Postup hľadanie referencie .....	62
Obrázok 6.8 Štruktúra správ .....	63
Obrázok 6.9 Postup hľadania čipu .....	63
Obrázok 6.10 Diagram obnovovania obrazu.....	64
Obrázok 7.2 Dokončený prístroj.....	65
Obrázok 7.1 Rovinnosť stolčeka voči karte so sondami .....	67
Obrázok 7.2 Automatická detekcia čipu KD610.....	68
Obrázok 7.3 Automatická detekcia čipu KF510 .....	69
Obrázok 7.4 Detail kontaktov na čipe KF510.....	69

## Zoznam tabuliek

Tabuľka 2.1 Základné parametre MPI TS150 [3] .....	16
Tabuľka 2.2 Základné parametre MPI TS2000 [4] .....	18
Tabuľka 2.3 Základné parametre MPI TS3500 [5] .....	19
Tabuľka 3.1 Základné parametre MP40 [14] .....	23
Tabuľka 3.2 Základné parametre PMP80 [14] .....	23
Tabuľka 4.1 Namerané parametre prístroja [22] .....	31
Tabuľka 4.2 Parametre mikrometrického stolčeka [22] .....	32
Tabuľka 4.3 Časové parametre pre jednotlivé kódy [26] .....	37
Tabuľka 4.4 Možnosti pohybu mikrometrického stolčeka .....	47
Tabuľka 6.1 Parametre motoru .....	60
Tabuľka 6.2 Prúdy pre jednotlivé osi .....	61
Tabuľka 7.1 Parametre dokončeného prístroja .....	66
Tabuľka 7.2 Parametre mikrometrického stolčeka .....	66

# ÚVOD

Testovanie kremíkových čipov je dôležitou súčasťou celého procesu ich výroby a má zaručiť overenie splnenia požiadavkou na ich vlastnosti. Uplatnenie testovania je veľmi široké a to napríklad pri vývoji, nastavovaní procesov alebo finálnej výrobe čipov. So stále zvyšujúcim sa dopytom po čipoch sa zvyšujú aj požiadavky na testovacie prístroje a metódy testovania.

Táto diplomová práca je pokračovaním vývoja poloautomatického polohovacieho systému, ktorý bol vyrobený v rámci bakalárskej práce totožného autora. Jej cieľom je analyzovať, navrhnúť a následne implementovať potrebné zmeny, ktoré majú zabezpečiť schopnosť prístroja testovať čipy pomocou kariet so sondami.

Teoretická časť sa venuje opisu a definícii rôznych dostupných metód na testovanie čipov a taktiež popisuje prístroje k tomu používané. Následne teoretické kapitoly bližšie definujú a opisujú použitie a parametre dvoch metód, používaných na vytváranie kontaktu s čipmi, a to v prvom rade metódu použitia kariet so sondami, ktorá je implementovaná aj do samotného prístroja tejto práce, a taktiež metódu s použitím mikroposuvov.

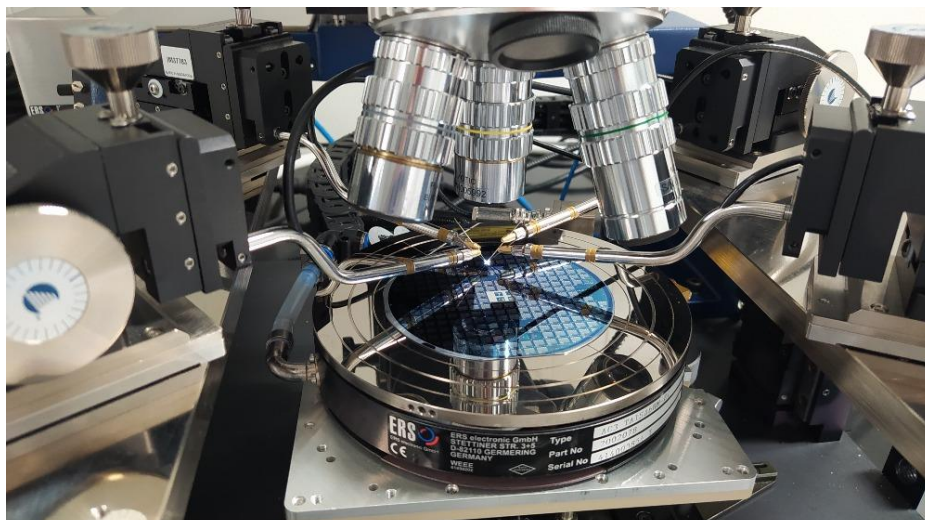
Praktická časť práce je tematicky rozdelená do troch blokov. Prvý opisuje mechanické zmeny, ktoré boli navrhnuté a následne aplikované tak, aby odstránili mechanické nedostatky na pôvodnej verzii prístroja a aby zároveň umožnili zachovanie pôvodne nastavených častí na prístroji. V druhom bloku práca opisuje nedostatky, ktoré boli nájdené na pôvodnej verzii softvéru a následne navrhuje a implementuje úpravy, ktorých úlohou je zjednodušiť užívateľské používanie prístroja. Posledná časť diplomovej práce diskutuje o výsledkoch merania, ktorých cieľom bolo otestovať výsledné parametre finálnej verzie prístroja, ktorý bol otestovaný s použitím dvoch čipov rôznych veľkostí.

# 1. TESTOVANIE POLOVODIČOVÝCH ČIPOV

Testovanie vyrobených polovodičových čipov je veľmi dôležitý proces pre zaručenie správnej funkčnosti elektrického obvodu na čipe. K tejto úlohe sa používajú testovacie prístroje, vid'. obrázok 1.1, ktoré overujú funkčnosť a zaznamenávajú elektrické parametre. Samotné testovanie sa môže vykonávať na kremíkovej doske (wafer) alebo na zapuzdrených čipoch.

## 1.1 Testovanie kremíkovej dosky

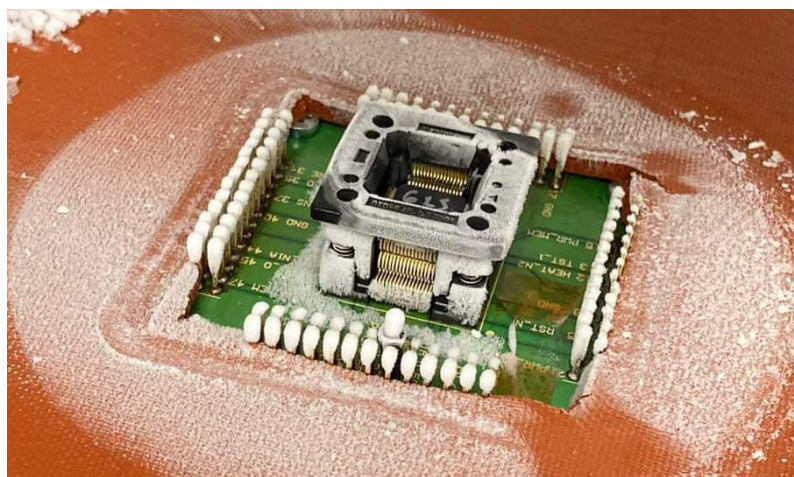
Kremíkové dosky majú kruhový tvar so zrezanými kraji, ktoré určujú ich kryštalografickú štruktúru. [1] Vyrábané sú v rôznych priemeroch od 25 mm až do 450 mm, s rôznymi hrúbkami v rozsahu 275  $\mu\text{m}$  až 925  $\mu\text{m}$ . [1] Z pravidla platí to, že čím väčší priemer, tým väčšia hrúbka kremíkovej dosky. Na takýchto doskách môže byť až stotisíce čipov o veľkosti 100-200  $\mu\text{m}^2$ . Jednotlivé čipy obsahujú viacero kontaktných plôšok o rozmeroch niekoľkých jednotiek  $\mu\text{m}$  podľa typu technológie. S týmito kontaktmi sa za pomoci kontaktných ihličiek vytvára vodivý kontakt pre účel testovania. K presnému polohovaniu sa využívajú špeciálne testovacie prístroje. Tento proces je určený hlavne k vyradeniu nefunkčných čipov z kremíkovej dosky, aby sa predišlo ich zbytočnému zapuzdrovaniu.



Obrázok 1.1 Testovanie kremíkovej dosky

## 1.2 Testovanie zapuzdrených čipov

Zapuzdrené čipy sú finálnym výsledkom celého procesu výroby čipov. Ich základné rozdelenie je definované druhom montáže, a síce na THT a SMD. THT je označenie súčiastky, ktorej vývody je možné prispájkovať do dier plošného spoja, zatiaľ čo označenie SMD sa používa pri súčiastkach, ktorých vývody sa prispájkujú na povrch k plôškam plošného spoja. V THT a SMD puzdrách sa nachádza len jeden čip, ktorý bol odrezaný z kremíkovej dosky a vodivo spojený s vývodmi. Testovanie ich funkčnosti je posledným krokom v procese výroby pred tým, ako prejdú k baleniu. Vykonáva sa za pomoci takzvaných socketov, vid'. obrázok 1.2, ktorých typy sa rôžnia podľa puzdra a počtu kontaktov. Úspešné testovanie a z neho získané výsledky následne slúžia ako správa o finálnych elektrických vlastnostiach súčiastky a taktiež o jej ostatných parametroch. Samotné testovanie sa môže vykonávať dvoma spôsobmi, a to ručne, alebo automaticky s použitím robotických ramien, ktoré vkladajú a vyberajú jednotlivé čipy z testovacieho socketu.



Obrázok 1.2 Testovanie zapuzdreného čipu

## 2. PRÍSTROJE PRE KREMÍKOVÉ DOSKY

Základné rozdelenie prístrojov k testovaniu čipov na kremíkovej doske je podľa spôsobu práce s prístrojom na manuálne, poloautomatické a automatické. Manuálne prístroje sa používajú pre malé serie a väčšie čipy napríklad pri vývoji. Poloautomatické prístroje sú používané pri väčších sériách a menších čipoch. Nepoužívajú sa vo veľkokapacitnej výrobe, z dôvodu absencie automatickej manipulácie s kremíkovou doskou, ktorá zaručí správne vloženie a vybratie kremíkovej dosky. V komerčnej výrobe sa používajú automatické prístroje, ktoré dosahujú najväčšiu presnosť a rýchlosť testovania jednotlivých čipov. Z konštrukčnej stránky sa takéto prístroje skladajú po väčšine z troch pohyblivých osí a podložky (chuck), na ktorej je vákuom fixovaná kremíková doska. Celá sústava je umiestnená na špeciálnom stole, ktorý izoluje vibrácie. Hlavné dve osi v rovine X a Y slúžia na vystredenie čipu s kontaktovacími sondami. Na osi Z sú dve nezávislé sústavy, jedna pre kameru s mikroskopom, ktorá spracováva obraz, a druhá pre kontaktovacie sondy. Medzi popredných výrobcov týchto prístrojov a príslušenstva patrí MPI, Wentworth Laboratories, Microworld a Formfactor. Pre porovnanie parametrov jednotlivých prístrojov v rámci tejto semestrálnej práce bola zvolená firma MPI, pretože vyrába manuálne, poloautomatické a automatické prístroje.

### 2.1 Manuálne prístroje

Manuálne prístroje k testovaniu kremíkových dosiek využívajú na vystredenie testovanej dosky operátora, ktorý za pomoci mikrometrických posuvov a obrazu z mikroskopu upravuje pozíciu tak, aby kontaktovacie plošky boli rovno pod ihličkami. Tento proces je časovo náročný a vyžaduje aj určitú úroveň praxe operátora, preto sa využíva hlavne na výskumné účely. Pohyb v osi X a Y je rozdelený na presný a hrubý posuv. Presný posuv je zabezpečovaný mikrometrickými posuvmi, zatiaľ čo hrubý posuv je zabezpečovaný buď mikrometrickými posuvmi s väčším stúpaním ako presný posuv, alebo vzduchovým ložiskom. Vzduchové ložisko prináša na väčšie vzdialenosti rýchlu manipuláciu so sústavou presných mikrometrických posuvov s podložkou pre čip. Princíp funkcie je založený na nadnášaní celej podložky k nastaveniu jej polohy. Pri kontaktovaní čipu je podložka fixovaná vákuom. Rozlíšenie pohybu týchto prístrojov sa pohybuje okolo 1 $\mu$ m, čo postačuje na väčšinu čipov na kremíkových doskách. Ku kontaktovaniu sa využívajú hlavne mikroposuvy so sondami. Obstarávacia cena manuálnych prístrojov začína na 15 000 €. [1]

Rada prístrojov MPI TS150, vid'. obrázok 2.1, označuje manuálne prístroje pre veľkosti kremíkových dosiek s priemerom 150mm. [3] Prístroj je možné nakonfigurovať do širokej škály aplikácií, ako analýza zlyhania, validácia dizajnu, spoľahlivosť úrovne dosky, vysoko výkonové testovanie, charakterizácia, MEMS a integrita signálu. Vysoko výkonové systémy sú označované s príponou HP. Sú schopné

zaručiť testovanie do 10KV a 600A. [3] Polohovateľná podložka pre kremíkovú dosku je určená do teplôt do 300°C. [3] Dizajn podložky bol navrhnutý tak, aby zabezpečoval pri tomto rozmedzí teplôt nízky prechodový odpor medzi kontaktovacími ihličkami a plôškami na čipe, vďaka jeho vysokej teplotnej stabilite rovinnosti menšej ako 10µm. [3] Prípona THz označuje prístroje určené k testovaniu pre širokopásmové pripojenie až do 220 GHz a pásmové do 1,1 THz. [3] Poslednou príponou môže byť SE, ktorá označuje elektromagnetické tienenie prístroja pre optimalizáciu merania s veľmi nízkym šumom. Maximálne množstvo mikroposuvov so sondami je 10. [3] Minimálna veľkosť čipu je 5 x 5 mm pre spoľahlivú fixáciu vákuom na podložke. Zväčšenie v základnej konfigurácii s objektívom MPI ST45 je 4,5 krát. [3] Základné parametre sú uvedené v tabuľka 2.1.



Obrázok 2.1 MPI T150 [3]

Tabuľka 2.1 Základné parametre MPI TS150 [3]

	osi		
	X	Y	Z
<b>hrubý posuv</b>	180 mm	230 mm	50 mm
<b>rozlíšenie hrubého posuvu</b>	-	-	5 µm
<b>jemný posuv</b>	25 µm	25 µm	-
<b>rozlíšenie jemného posuvu</b>	1 µm	1 µm	-
<b>presnosť</b>	-	-	-
<b>opakovateľnosť</b>	±1 µm	±1 µm	±1 µm
<b>max. rýchlosť</b>	-	-	-

## 2.2 Poloautomatické prístroje

Poloautomatické prístroje čiastočne automatizujú proces vystred'ovania. To znamená, že sú schopné automaticky identifikovať čip na kremíkovej doske a upraviť jeho pozíciu voči kontaktovacej hlave. Samotné kontaktovanie sa môže realizovať mikroposuvmi so sondami, ale väčšinou za pomoci kariet so sondami, ktoré sú vyrobené podľa rozloženia plôšok na čipe. Tým pádom je poloha kontaktovacích ihličiek fixná. Osi X a Y sú pohybované za moci servomotorov, čím sa dosahuje veľmi rýchla a spoľahlivá zmena pozície na kremíkovej doske. Vkladanie kremíkovej dosky do prístroja je však stále vykonávané jeho operátorom, napriek tomu je možné prístroj využiť aj pri väčších sériách. Rozlíšenie týchto prístrojov sa pohybuje okolo 0,1  $\mu\text{m}$ , a preto sú vhodné aj pre menšie čipy. [4]

Rada prístrojov MPI TS2000, vid'. obrázok 2.2, označuje poloautomatické prístroje určené pre kremíkové dosky s priemerom 200mm. [4] Na týchto prístrojoch je možné vykonávať RF testovanie, mmW testovanie, kremíkovú fotoniku, validáciu dizajnu, testovanie MEMS a ostatných typov senzorov pri špecifikovaných vlastnostiach prostredia. [4] Podložka pre kremíkovú dosku je schopná regulovať teplotu od  $-60^{\circ}\text{C}$  do  $300^{\circ}\text{C}$ . [4] Celý prístroj sa ovláda za pomoci pákových ovládačov a klávesnice v prostredí MPI SENTIO®. [4] Doplnkovým vybavením prístroja je automatické vkladanie kremíkových dosiek, elektromagnetické tienenie a tmavý box. Rozlíšenie kamery je 12 MP a maximálne zväčšenie objektívu je 12-krát pre kamerové systémy MZ12. [4] Základné parametre sú uvedené v tabuľka 2.2 .



Obrázok 2.2 MPI TS2000 [4]

Tabuľka 2.2 Základné parametre MPI TS2000 [4]

	osi		
	X	Y	Z
<b>posuv</b>	220 mm	490 mm	30 mm
<b>rozlíšenie</b>	0,2 $\mu\text{m}$	0,2 $\mu\text{m}$	0,2 $\mu\text{m}$
<b>presnosť</b>	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 2 \mu\text{m}$
<b>opakovateľnosť</b>	$\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 1 \mu\text{m}$
<b>max. rýchlosť</b>	50 mm/s	50 mm/s	20 mm/s

## 2.3 Automatické prístroje

Automatické prístroje plne automatizujú test kremíkových dosiek bez nutnosti obsluhy operátorom. Operátor vykonáva len úvodnú kontrolu a následné testovanie môže fungovať úplne autonómne. Princíp funkcie vystreďovania čipu s kontaktovacími sondami je rovnaký, ako pri poloautomatických prístrojoch. Jediný rozdiel je v tom, že je doplnený o automatické vkladanie kremíkových dosiek do prístroja. Vďaka tomu je možné celý proces vykonať čistejšie a tým ochrániť čipy pred prachovými nečistotami, ktoré by ich mohli poškodiť. Taktiež sa tým znižujú aj náklady na filtráciu vzduchu, pretože sú kremíkové dosky izolované od okolitého prostredia. Z toho dôvodu sa tieto druhy prístrojov používajú v sériových výrobách. Kontaktovanie sa môže realizovať mikroposuvmi so sondami alebo pomocou kariet so sondami, tak ako je to pri poloautomatických prístrojoch. Presnosť týchto prístrojov je rovnaká ako pri poloautomatických prístrojoch.

Rada prístrojov MPI TS3500, viď. obrázok 2.3, označuje plne automatické prístroje pre testovanie kremíkových dosiek s priemerom 300 mm. [5] Prístroj zabezpečuje riešenia voltampérových, pulzných, frekvenčných a šumových analýz. Zabezpečuje všetky možnosti konfigurácie testov ako MPI TS2000 pri teplotách od  $-60^{\circ}\text{C}$  do  $300^{\circ}\text{C}$ . [5] Podporuje umiestnenie 10 mikroposuvov s magneticky fixovanými sondami. K ovládaniu slúži pákový ovládač a program MPI SENTIO®. [5] Automatické vkladanie kremíkovej dosky je schopné určiť veľkosť, a podľa toho prispôbiť vákuum na testovacej podložke. Základná zostava obsahuje objektív so zväčšením 12-krát a s kamerou s rozlíšením 12 MP. [5] Tento objektív je možné nahradiť až za objektívy rady MPI iMAG® so zväčšením 40-krát. [5] Základné parametre sú uvedené v Tabuľka 2.3 .



Obrázok 2.3 MPI TS3500 [5]

Tabuľka 2.3 Základné parametre MPI TS3500 [5]

	osi		
	X	Y	Z
<b>posuv</b>	310 mm	530 mm	140 mm
<b>rozlíšenie</b>	0,5 $\mu\text{m}$	0,5 $\mu\text{m}$	0,2 $\mu\text{m}$
<b>presnosť</b>	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 2 \mu\text{m}$
<b>opakovateľnosť</b>	$\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 1 \mu\text{m}$
<b>max. rýchlosť</b>	50 mm/s	50 mm/s	50 mm/s

## 2.4 Druhy testovania

Samotné testovanie vykonávané testovacími prístrojmi sa rozdeľuje na viacero druhov, pri ktorých sa využívajú rôzne metódy merania. Tieto metódy sú zvolené podľa druhu testovania tak, aby čo najvhodnejšie realizovali dané meranie. Z toho dôvodu sú pre jednotlivé aplikácie vyhradené špecializované meracie sondy, ochranné kryty a rôzne ďalšie doplnky. Aplikácie, ktoré je možné realizovať na danom testovacom prístroji definuje výrobca. V tejto kapitole je opísaných deväť základných aplikácií.

### 2.4.1 Charakterizácia súčiastky

Je druh testovania, pri ktorom sa vytvára model správania diskretných elementárnych súčiastok, ako napríklad tranzistorov, cievok, diód atď. Takto vytvorený model sa ďalej znovu využíva pri simuláciách komplexných zapojení. Jedným z najdôležitejších krokov je vykonať veľmi presné elektrické merania. Toto meranie musí čo najpresnejšie opisovať správanie súčiastky bez chýb, ktoré spôsobuje meranie. Základné charakteristiky diskretných súčiastok sú závislosť prúdu a napätia a meranie kapacity. Tieto merania sa vykonávajú v kontrolovanom prostredí, kde je definovaná teplota a priestor

je izolovaný proti elektromagnetickému rušeniu. Typickými problémami, ktoré ovplyvňujú meranie sú opakovateľnosť, spoľahlivosť kontaktu sondy, vplyv vnútorného alebo vonkajšieho šumu, únik prúdu zo sond a testovanie pri rôznych teplotách. [6]

#### **2.4.2 Vysoko výkonové testovanie**

Vysoko výkonové testovanie je určené na meranie vysoko výkonných diskretných súčiastok, ako sú napríklad výkonové tranzistory, diódy, tyristory a zosilňovače vo vertikálnej alebo planárnej orientácii. Sondy sú špeciálne navrhované tak, aby zvládli napätie väčšie ako 500 V a prúd 1 A. Hlavnými výzvami pri meraniach je dosiahnuť čo najmenší prechodový odpor, zabránenie ohorenia plôšok čipu a vznik vysokonapäťových oblúkov. Ďalšou výzvou je taktiež dosiahnuť nízky unikajúci prúd pri rôznych teplotách a zabezpečiť spoľahlivú manipuláciu s veľmi tenkými kremíkovými doskami. Ako príklad firma MPI ponúka možnosť práce do 10 KV a 400 A v pulze do 300°C s hrúbkou kremíkovej dosky do 50  $\mu\text{m}$ . K zamedzeniu vzniku oblúkov sa používa kvapalina Fluorinert™, ktorá odvádza teplo a zabezpečuje požadovanú elektrickú izoláciu. [7]

#### **2.4.3 Testovanie pre rádiové a mikrovlnné frekvencie**

Tento druh testovania sa využíva pri testovaní a vývoji čipov, ktoré pracujú s vysokými frekvenciami. Požiadavky na testovanie pre rádiové a mikrovlnné frekvencie až do 500 Ghz sú kladené na opakovateľnosť merania, čiže na vytváranie rovnakého prechodového odporu medzi sondou a plôškou. Ďalším dôležitým faktorom je odolnosť voči rušeniu a definovaná impedancia sond, vodičov a konektorov. Aby sa dosiahlo týchto vysokých požiadaviek využívajú sa kalibračné prípravky, na ktorých sa vytvára testovací kontakt, podľa ktorého sa kalibruje merací prístroj tak, aby sa eliminovali chyby merania. Podložka, na ktorej je vákuom uchytená kremíková doska, je navrhnutá s čo najmenšími dierami aby, sa neovplyvňovalo meranie. [8]

#### **2.4.4 Validácia dizajnu**

Je kľúčovým testovaním, ktoré zaručuje funkčnosť celého čipu, a pri ktorom sa zbierajú dáta. Tie môžu byť digitálneho ale aj analógového charakteru, závisiac od druhu elektrického zapojenia v čipe. Tieto dáta sa následne analyzujú a porovnávajú s požadovanými vlastnosťami čipu. Testy sa vykonávajú za rôznych teplôt a pri rôznych napájacích napätiach a záťažoch. Výzvami tohto testovania je neustále sa zväčšujúce množstvo vývodov na čipe, automatizácia celého procesu a spracovávanie veľkého množstva dát. [9]

#### **2.4.5 Analýza chybovosti**

Účelom analýzy chybovosti je hľadanie chýb vzniknutých pri výrobe ako sú napríklad skraty alebo rozpojené vodivé cesty. Rozpojené cesty sa lokalizujú za pomoci

submikrónových sond, prikládaných na malé testovacie plôšky. Pre analýzu všetkých vrstiev čipu sa jednotlivé vrstvy odstraňujú za pomoci laseru. Z dôvodu analýzy jednotlivých ciest sú zvýšené požiadavky aj na zväčšenie optickej sústavy. [10]

#### **2.4.6 Testovanie spoľahlivosti**

Spoľahlivosť čipov je schopnosť zariadenia spĺňať stanovené elektrické vlastnosti počas definovanej dlhšej doby a za definovaných okolitých vlastností. Z tohto princípu vychádza aj toto testovanie, pri ktorom sa testujú jednotlivé kroky pri výrobe čipu ale aj výsledný hotový čip. Konkrétne testované kroky pri výrobe sú napríklad rovnomernosť oxidu a kovového prepojenia medzi vrstvami. V rámci testovania spoľahlivosti výsledného čipu sú vykonávané dlho trvajúce testy pri rôznych parametroch okolia, ktorých výsledkom je zaručenie spoľahlivosti čipu. Výzvy v tomto odvetví testovania sú hlavne na skrátenie doby testovania a tým aj zníženie nákladov. [11]

#### **2.4.7 Testovanie kremíkovej fotoniky**

Kremíková fotonika je novým smerom, ktorý prináša možnosti väčšej dátovej priepustnosti systémov a menšej spotreby. Je to spojenie polovodičových štruktúr s optickými cestami, namiesto elektricky vodivých prepojení. Tieto nové prístupy k šíreniu signálov vyžadujú nekonvenčné spôsoby merania, napríklad meranie optických strát, strát závislých od polarizácie a bitovej chybovosti a veľa ďalších. Hlavnými požiadavkami je veľmi presná manipulácia s opticky vodivými sondami a ich spojením s optickými cestami na čipe, zachovanie vlnovej dĺžky signálu bez strát pri prechode cez meracia sondu. [12]

#### **2.4.8 Testovanie MEMS**

MEMS sú mikroelektronické mechanické systémy na kremíkových doskách, ako napríklad gyroskopické senzory. Testovanie týchto systémov prebieha pohybovou stimuláciou a následným zaznamenaním pohybov štruktúr v čipe a výstupných signálov. Dôležitým faktorom je zabezpečenie minimálneho rušenia spôsobeného vibráciami z okolia. Hlavnou výzvou je zabezpečenie integrity optického elektrického merania pri rôznych teplotách a pohybových stimuloch. [13]

### 3. KONTAKTOVACIE METÓDY

Pre testovanie čipov na kremíkových doskách sa využívajú buď mikroposuvy so sondami (micropositioners) alebo karty so sondami (probe cards). Oba prístupy sú založené na vytvorení kontaktu medzi sondou a plôškou na čipe. Pri tomto procese je veľmi dôležité, aby sa sonda a plôška čipu nedeformovali, a zároveň, aby sa vytvoril prechod s definovaným prechodovým odporom, s cieľom zaručenia opakovateľnosti merania.

#### 3.1 Mikroposuvy so sondami

Využíva mikrometrické posuvy k manipulácii so sondou v osiach X, Y a Z. Poloha celého mikrometrického posuvu so sondou sa upravuje ručne. Požadovaná poloha môže byť fixovaná vákuom alebo magnetickým poľom. Podľa druhu testovania sa odlišuje i konštrukcia, presnosť a opakovateľnosť pohybu. Pohyb sondy môže byť buď manuálny alebo programovateľný. Hlavné využitie majú pri meraniach, kde postačuje menší počet sond. Obvyklý maximálny počet mikroposuvov pre jeden prístroj je 10. [4] Ich najväčšou výhodou oproti kartám so sondami je ich univerzálnosť, a tým aj nižšie náklady pri vývoji alebo experimentoch. Nevýhodou je dlhšia doba nastavovania a menší počet sond ako pri kartách so sondami. Pre príklad parametrov sú v podkapitolách nižšie uvedené ukážky manuálnych a programovateľných mikroposuvov od firmy MPI.

##### 3.1.1 Manuálny MP40

MP40, vid'. obrázok 3.1, predstavuje najvyššiu radu manuálnych mikroposuvov od firmy MPI. [14] Je vhodný na testovanie volt ampérového merania, závislosti kapacity na napätí, rádiovkej frekvencie a vysoko výkonového merania. Fixácia je realizovaná za pomoci magnetického poľa, ktoré je tvorené permanentným magnetom ovládaným páčkou. Na manipuláciu so sondou sa používajú 3 rotačné posuvy pre osi X, Y a Z. Základné parametre sú uvedené v tabuľka 3.1.



Obrázok 3.1 MP40 [14]

Tabuľka 3.1 Základné parametre MP40 [14]

	osi		
	X	Y	Z
<b>posuv</b>	13 mm	13 mm	13 mm
<b>rozlíšenie</b>	< 3 $\mu\text{m}$	< 3 $\mu\text{m}$	< 3 $\mu\text{m}$
<b>rozmery</b>	60 mm	45 mm	92,3 mm

### 3.1.2 Programovateľný PMP80

PMP80, vid'. obrázok 3.2, predstavuje najvyššiu radu programovateľných mikroposuvov od firmy MPI. [14] S ich presnosťou sa zároveň radia medzi mikroposuvy s najväčším rozlíšením na trhu. Sú určené na mikrovlnné testovanie, kde je veľmi dôležitá opakovateľnosť vytvorenia kontaktu. Základné parametre sú uvedené v tabuľka 3.2.



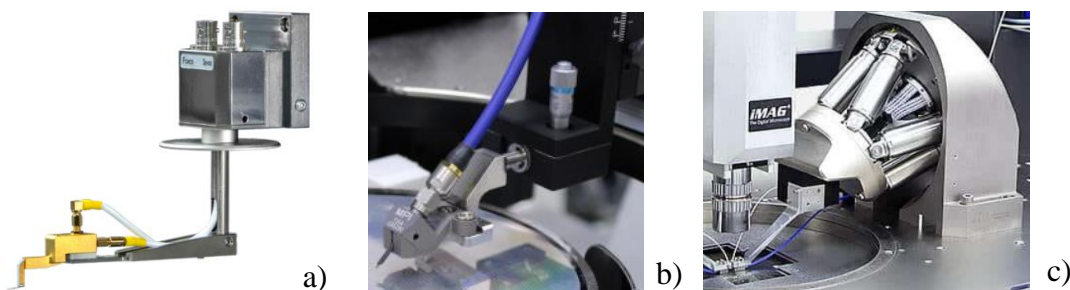
Obrázok 3.2 PMP80 [14]

Tabuľka 3.2 Základné parametre PMP80 [14]

	osi		
	X	Y	Z
<b>posuv</b>	25 mm	25 mm	10 mm
<b>rozlíšenie</b>	25 nm	25 nm	25 nm
<b>rozmery</b>	216 mm	193 mm	235,5 mm

### 3.1.3 Sondy

Sondy, ktoré sa upevňujú na mikroposuvy, sa skladajú z ramena a ihličky. Tvar a materiál ramena a ihličky je definovaný konkrétnym druhom testovania, vid' obrázok 3.3. Základné rozdelenie ramien je pre jednosmerné, optické a striedavé signály. Jednotlivé ramená však môžu byť špecificky definované pre veľké množstvo druhov testovania, závisiac podľa výrobcu. Spoločné rozdelenie pre väčšinu výrobcov môže byť na ramená pre teplotné testovanie, vhodné pre rádiové alebo mikrovlnné frekvencie, optické testovanie, vysoké napätie a veľké prúdy. Ihličky sa rozdeľujú na aktívne a pasívne. [14] Aktívne ihličky obsahujú aj elektroniku určenú na lepšie spracovávanie veľkých frekvencií, malých signálov alebo optických výstupov. Ich hlavnou výhodou je, že neovplyvňujú meranie. Pasívne ihličky vytvárajú len vodivý kontakt, čo postačuje väčšine druhom testovania. Ihličky sa vyrábajú z materiálov ako je volfrám, berýlium, meď a nikel. Priemer hrotu sa pohybuje od 1  $\mu\text{m}$  do 20  $\mu\text{m}$ . [14]



Obrázok 3.3 a) Sondy pre malé signály, b) vysoké frekvencie a c) kremíkovú fotoniku [14] [8] [12]

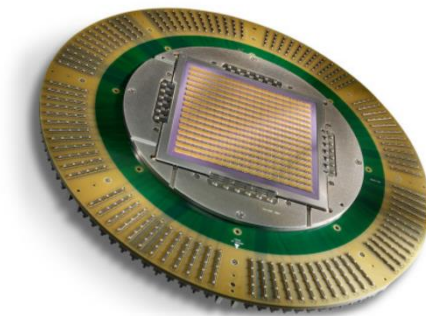
## 3.2 Karty so sondami

Karty so sondami sú zložené z dosky plošného spoja, na ktorom sú rôznymi spôsobmi pripevnené viaceré druhy sond. Zvolenie konkrétneho druhu sondy závisí od typu testovania, na ktorý sa používa, a podľa toho sa taktiež odvíja aj spôsob jej upevnenia k doske plošného spoja. Sondy sú upevňované rôznymi spôsobmi, a to za pomoci lepidiel, spájkovania alebo vyleptania celej sondy. Pozícia sond je definovaná pri výrobe a pri niektorých druhoch kariet nie je možná jej následná úprava. Osadzovanie sond na dosky plošných spojov sa realizuje špecializovanými prístrojmi. Na plošné spoje sú kladené vysoké nároky ohľadom rovinnosti a presnosti. V porovnaní s metódou s mikroposuvmi, sa karty so sondami odlišujú vo väčšom množstve sond. Z tohto dôvodu sa využívajú v sériovej výrobe. V nasledujúcich podkapitolách sú uvedené príklady kariet

so sondami od firmy FormaFactory, ktorá ponúka špecializované karty pre sériové výroby pre automatické a poloautomatické testovacie prístroje. Príkladom kariet so sondami pre výskum a vývoj sú karty druhu cantilever od firmy Wentworth Laboratories.

### 3.2.1 Karty DRAM

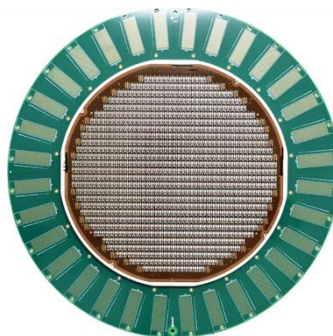
DRAM, vid'. obrázok 3.4, sú pamäte s dynamickým náhodným prístupom do pamäte. Používajú sa ako grafická pamäť v herných konzolách, serveroch a počítačoch. Vyznačujú sa veľkým stupňom integrácie, malými rozmermi a vysokou pracovnou frekvenciou. Veľkosť kontaktovacích plôšok je  $40 \times 50 \mu\text{m}$  s roztečom  $50 \mu\text{m}$ . [15] Maximálna frekvencia je 3,2 Ghz. [15] Príkladom takejto karty môže byť HFTAP K32 od firmy FormFactor. [15] Vďaka technológii MEMS je možné sondu použiť k testovaniu všetkých úrovni pamäťových blokov. [15]



Obrázok 3.4 Karta so sondami pre DRAM [15]

### 3.2.2 Flash

Flash, vid'. obrázok 3.5, karta so sondami je určená pre NAND pamäťové polia, kde poskytuje testovanie vysokým počtom pinov. Príkladom by mohla byť karta so sondami Gnus od firmy FormFactor, ktorá má rozmer o priemere 300 mm a až 35000 kontaktov. [16] Veľkosť kontaktovacích plôšok je  $50 \times 50 \mu\text{m}$  a rozteč  $70 \mu\text{m}$ . Maximálna frekvencia je 125 Mhz. [16]



Obrázok 3.5 Karta so sondami pre FLASH [16]

### 3.2.3 Karty pre výstupnú a vstupnú logiku

Sú určené na testovanie výstupnej a vstupnej logiky obvodov, hlavne IOT. V tejto kategórii čipov sa pracuje s veľmi nízkymi príkonmi a tým aj malými čipmi, preto je dôležitý veľmi nízky prechodový odpor. Na kontaktovanie sa využívajú sondy v tvare hokejky, vid'. obrázok 3.6, s roztečom 45  $\mu\text{m}$ . S prenosovými rýchlosťami do 3 Gbs. [17]



Obrázok 3.6 Karta pre výstupnú a vstupnú logiku [17]

### 3.2.4 Pyramídové karty pre RF

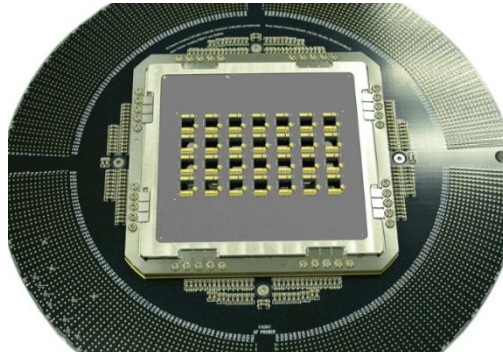
Sú určené na frekvencie až do 80 Ghz a poskytujú minimálne ovplyvnenie meraného signálu, vid'. obrázok 3.7. Toto dosahujú vďaka minimálnemu poškodeniu podložky a nízkej indukčnosti sondy. [18] Minimálny rozteč plôšok je 50  $\mu\text{m}$ . [18] Sondy sú vytvorené z ródia na špeciálnej fólii. Zvládajú teploty od -50  $^{\circ}\text{C}$  do 125  $^{\circ}\text{C}$ . [18] Veľkosť prechodového odporu závisí od materiálu plôšky, pre zlato to je 5  $\text{m}\Omega$ , hliník 100  $\text{m}\Omega$  a pre meď 300  $\text{m}\Omega$ . [18] Maximálny prúd pre zlatú plôšku je 1 A a pre hliníkovú 300 mA na kontakt. [18]



Obrázok 3.7 Pyramídové karty pre RF [18]

### 3.2.5 Karty pre optiku

Optické karty so sondami, vid'. obrázok 3.8, sa používajú na testovanie obrazových snímačov CMOS a LED. [19] Ako príklad je uvedená karta od firmy Form Factor ktorá vyvinula 3D MEMS MicroSpring®. [19] Poskytuje opakovateľné merania vďaka minimálnemu poškodeniu sond a plôšok čipu. [19] Vďaka tomu zaručujú dlhú životnosť pri vytvorení až 15 miliónov kontaktov na zlatej plôške. [19]



Obrázok 3.8 Karty pre optiku [19]

### 3.2.6 Parametrické karty

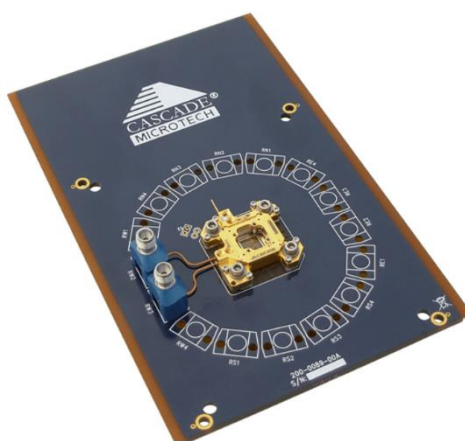
Parametrické karty, vid'. obrázok 3.9, sú určené na presné monitorovanie 65 nm a 45 nm parametrických testovacích štruktúr. [20] Sú založené na technológii PyramidPlus™, čo je inovatívna štruktúra od firmy Form Factor. Zabezpečujú veľmi nízky prechodový odpor, rovnako ako pyramídové RF karty. [20] Najmenšia veľkosť plôšky je 30 x 30  $\mu\text{m}$ . [20] Sondy sú vytvorené z neoxidovanej zliatiny niklu, vďaka čomu sú kompatibilné s plôškami z hliníku, medi, zlata, titanu a polykremíku. [20]



Obrázok 3.9 Parametrická karta [20]

### 3.2.7 Karty pre 5G a mikrovlnné frekvencie

FormFactor je jediná firma, ktorá ponúka karty so sondami určené pre mikrovlnné testovanie, vid'. obrázok 3.10, pri frekvenciách do 81 GHz. [21] Pri týchto kartách sú dôležité tie isté parametre ako pri kartách pre rádiové frekvencie ale ešte s vyššími nárokmi. [21] To znamená nízky prechodový odpor, malý rozteč sond, nízku indukciu sond a opakovateľnosť vytvárania kontaktov sondy, vytvorenej z neoxidovanej zliatiny niklu, s minimálnym roztečom plôšok na čipe 50  $\mu\text{m}$ . [21]



Obrázok 3.10 Karta pre 5G a mikrovlnné frekvencie [21]

### 3.2.8 Karty cantilever

Sú najjednoduchším druhom kariet so sondami, určeným na rôzne druhy testovania. Skladajú sa z nosného substrátu, na ktorom sú uchytené ihličky. Substrát je väčšinou FR4, a môže byť keramický alebo kombináciou FR4 s kovovým jadrom. Podľa druhu testovania sa karty rozdeľujú na 6 základných druhov a to epoxidové, nízko stratové, vysoko napäťové a vysoko prúdové, nízkoteplotné a nízko nákladové. Karty sú väčšinou využívané pri väčších sériách čipov alebo na výskumné účely. Tento typ kariet nedokáže konkurovať počtom sond kartám pre pamäte flash alebo ostatným typom kariet, na ktorých sú sondy vo viacerých stĺpcoch a riadkoch.

Epoxidové karty sa vyznačujú hustým usporiadaním kontaktovacích ihličiek, nízkou nákladovosťou a flexibilitou, keďže spĺňajú požadované vlastnosti potrebné pri väčšine typoch testovania. [22] Ich nevýhodou je však obmedzenie v spojitosti s ich použitím pri určitých teplotách, kedy sa môžu používať len do maximálnej teploty 100°C. [22]

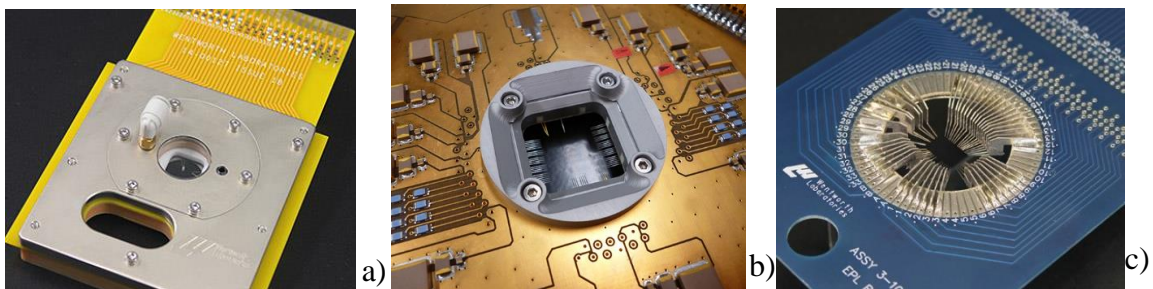
Ich substrát väčšinou obsahuje materiál FR4, ktorý je plátovaný meďou, pokrytou vrstvou zlata. [22]

Medzi epoxidové sa zaraďujú aj nízko stratové karty, ktorých meranie je pri 30 V minimálne stratové, a ktoré dokážu efektívne pracovať v rozsahu fA. [22] Vyznačujú sa taktiež tým, že rozmery medzier medzi čepel'ovými sondami začínajú na 50  $\mu\text{m}$ . [22] Použité materiály vo výrobe ich ihličiek ako napríklad berýlium meď, volfrám či volfrám rénium prinášajú tomuto typu kariet ich výhodné vlastnosti. [22]

Vysoko napäťové a vysoko prúdové karty ,viď. obrázok 3.11, sa vyznačujú tým, že môžu fungovať vo vysokých teplotách, konkrétne do 250 °C, a to vďaka svojej špeciálnej konštrukcii, ktorá zabezpečuje ich aktívne chladenie. [22] Taktiež sú schopné fungovať s napätím do 10 KV a prúdmi v impulzoch do 200 A. [22] Využívajú sa najmä pri testovaní výkonných IGBT tranzistorov a MOSFET-ov. [22]

Nízko teplotné karty ,viď. obrázok 3.11, sú vyrábané za účelom ich použitia v extrémnych či experimentálnych podmienkach najmä preto, že môžu pracovať v nízkych teplotách, a to až do -271 °C. [22] Na zamedzenie skrehnutia ich substrátu sa používa kryogénny epoxid. Ich prevažné využitie sa uplatňuje najmä pri testovaní čipov určených pre satelitné či raketové systémy. [22]

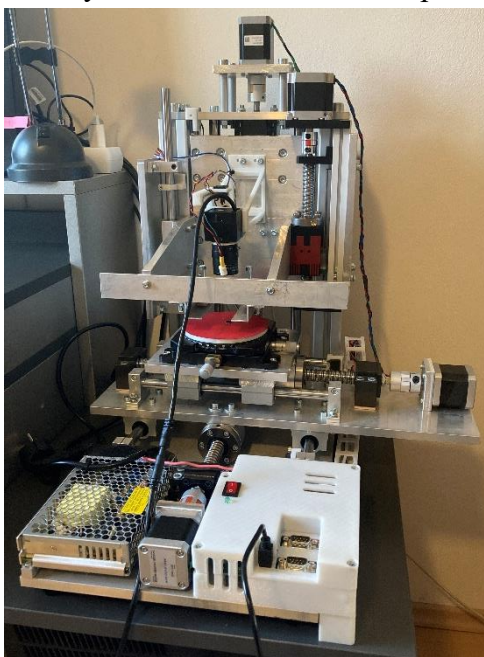
Pri jednoduchších čipoch s čepel'ovými sondami od seba vzdialenými minimálne 100  $\mu\text{m}$ , sú využívané najmä nízko nákladové karty, viď. obrázok 3.11, ktoré sa vyrábajú pre 46 a 70 pinové verzie. [22] Miera ich presnosti je veľmi podobná epoxidovým kartám, s rozdielom omnoho nižšej ceny, čo je zároveň aj hlavnou výhodou tohto typu kariet. [22] Najčastejšie je možné nájsť tento druh v spotrebnej elektronike. [22]



Obrázok 3.11 a) Cantilever karty so sondami vysoko výkonové, b) nízko teplotné a c) nízko nákladové [22]

## 4. ÚPRAVY NA PRÍSTROJI

Prístroj, vid'. obrázok 4.1, je výsledkom bakalárskej práce, ktorej cieľom bolo navrhnuť a poskladať prístroj na testovanie čipov. Na výrobu tohto prístroja boli vo väčšine prípadov využité súčiastky zo starého, nefunkčného prístroja, určeného na vizuálnu inšpekciu. Tento prístroj bol zhotovený počas pandémie korona vírusu, čo ovplyvnilo kvalitu a presnosť obrobenej súčiastok, keďže boli vyrábané v domácich podmienkach. Kostra prístroja je zhotovená z 10 mm hrubého hliníka, ktorý zaručuje dostatočnú pevnosť a stabilitu konštrukcie. Na spojenie jednotlivých častí medzi sebou boli použité skrutky s imbusovou hlavicou v kombinácii s pérovou a obyčajnou podložkou. Táto kombinácia podložiek bráni uvoľneniu spoja. Pohyb stolčeka na čip môže byť oproti kontaktovacej hlave buď motorizovaný alebo manuálny. Motorizovaná možnosť ponúka pohyb v 3 osiach, a to X, Y a Z. Manuálna možnosť je zabezpečená stolčekom od firmy Thorlabs s presnosťou v  $\mu\text{m}$  a možnosťou pohybu v osiach X, Y a rotáciou okolo osi Z. Na osi Z sú dve nezávislé možnosti pohybu, a to pre optickú sústavu a kontaktovaciu hlavu. Pre riadenie prístroja bola zvolená riadiaca doska TMCM-6110, od výrobcu Trinamic. Záverom bakalárskej práce bolo otestovanie prístroja na keramickej doske s hrubovrstvovými rezistormi, otestovanie čipu vyrezaného z kremíkovej dosky a otestovanie rovinnosti stolčeka oproti kontaktovacej hlave. V rámci demonštrácie schopností prístroja bolo realizované aj kontaktovanie čipu, no vzhľadom na to, že v danej dobe nebolo možné zabezpečiť veľmi tenké sondy ku kontaktovaciemu čipu, nebolo možné vytvoriť vodivý kontakt medzi sondou a plôškou čipu.



Obrázok 4.1 Pôvodný prístroj

## 4.1 Parametre a stav prístroja

Pre vhodné stanovenie potrebných úprav na prístroji sú najdôležitejšie parametre prístroja a ich presné zmeranie. Výsledkom bakalárskej práce bolo určenie väčšiny parametrov, avšak presnosť ich merania bola  $\pm 10 \mu\text{m}$ . [22] Pre určenie niektorých parametrov je táto presnosť nedostatočná, a preto sa na prístroji parametre opakovateľnosť a presnosť odmerali znovu. Prístroj zvolený na meranie bol od výrobcu Mitutoyo s presnosťou 100 nm. Ostatné parametre sú prebrané z bakalárskej práce a sú uvedené v tabuľka 4.1. Hodnoty opakovateľnosti a odchýlky boli merané pre osi X a Y pre príkaz posuvu o 50  $\mu\text{m}$ . Pre os Z (kamera) bol zvolený príkaz posuvu o 5  $\mu\text{m}$ , pretože nebol predpokladaný veľký posuv kamery vzhľadom na to, že jej upravovanie vzdialenosti zabezpečuje len správne zaostrenie. Os Z (kontaktovacía hlava) bola testovaná pri príkaze 67  $\mu\text{m}$ , čo simulovalo dve polohy, a to polohu kontaktovania a umiestnenia sondy nad plôškou.

Tabuľka 4.1 Namerané parametre prístroja [22]

	osi			
	X	Y	Z kamera	Z kontaktovacía hlava
posuv [mm]	100	100	100	100
opakovateľnosť [ $\mu\text{m}$ ]	$\pm 2$	$\pm 0,25$	$\pm 0,75$	$\pm 1,5$
priemerná odchýlka [ $\mu\text{m}$ ]	17,92	12,8	1.4	11
rýchlosť [mm/s]	10	10	10	10

Hodnoty boli spracované ako priemer z 5 meraní, aby sa odstránila chyba pri meraní. Z nameraných hodnôt v tabuľke je možné zhodnotiť, že pracovná plocha vo všetkých troch osiach je vyhovujúca. Opakovateľnosť pre osi X a Z kontaktovacía hlava dosahuje o niečo väčšie hodnoty, čo mohlo byť spôsobené chybou pri meraní, krokovými motormi bez fyzickej spätnej väzby alebo presnosťou guľôčkovej skrutky. Avšak táto nepresnosť nie je kritická. Priemerná odchýlka je uvedená ako rozdiel medzi príkazom na posuv a zmeranou hodnotou, ktorú stolček reálne prekonal. Najväčšia odchýlka bola nameraná pre osi X, Y a Z kontaktovacía hlava, zdrojom tejto chyby by mohla byť absencia fyzickej spätnej väzby krokových motorov alebo vôľa guľôčkovej skrutky, ktorá môže mať maximálnu hodnotu 40  $\mu\text{m}$ . Táto nepresnosť je taktiež akceptovateľná, ale bude sa upravovať v programe, keďže sa jej veľkosť opakuje. Pre zabezpečenie najväčšej presnosti obsahuje stolček aj mikrometrické posuvy s presnosťou garantovanou výrobcom, ktorá je uvedená v tabuľka 4.2.

Tabuľka 4.2 Parametre mikrometrického stolčeka [22]

	osi		
	X	Y	Z
posuv	13 mm	13 mm	360°
presnosť [ $\mu\text{m}$ ]	1	1	1

## 4.2 Potrebné úpravy na prístroji

Z nameraných hodnôt a zistených nedostatkov prístroja boli určené potrebné úpravy na prístroji, ktoré boli spísané do bodov.

- Zväčšenie hlavnej dosky.
- Zväčšenie pracovnej plochy kontaktovacej hlavy.
- Návrh optickej sústavy.
- Návrh karty so sondami.
- Návrh hlavy pre kartu so sondami.
- Návrh prípravku osadzovania sond na karty.
- Návrh vákuového stolčeka.
- Návrh elektronického zapojenia.

## 4.3 Návrh rozšírenia hlavnej dosky

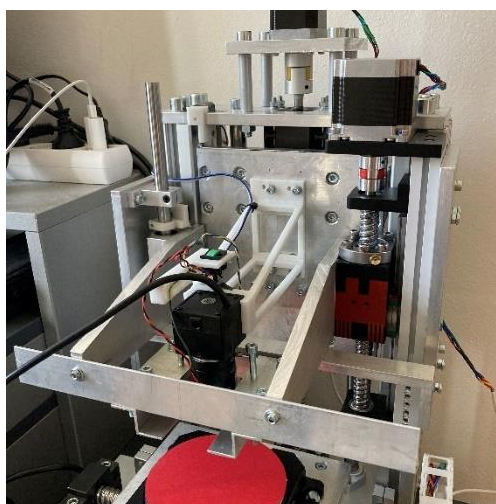
Pôvodná hlavná doska zabezpečovala pre celú konštrukciu dostatočnú oporu a stabilitu na 4 gumových nožičkách. Hrúbka hliníkovej dosky je 10 mm. Manipulácia s celým prístrojom je problematická kvôli hmotnosti prístroja a pri nesprávnom uchopení nastáva možnosť poškodenia elektrického vedenia. Elektrické vedenia sú ťahané ohybnými vedeniami káblov, ktoré neboli na pôvodnom prístroji istené zo spodnej strany. Z tohto dôvodu bolo navrhnuté rozšírenie, ktoré bude priskrutkované k hlavnej doske. Po pripevnení rozširujúcej platformy, vid'. obrázok 4.2, sa bude s prístrojom bezpečnejšie manipulovať bez rizika poškodenia elektrických vodičov a zväčší sa priestor pre ovládaciú dosku a jej uchytenie.



Obrázok 4.2 Model navrhnutého rozšírenia hlavnej dosky

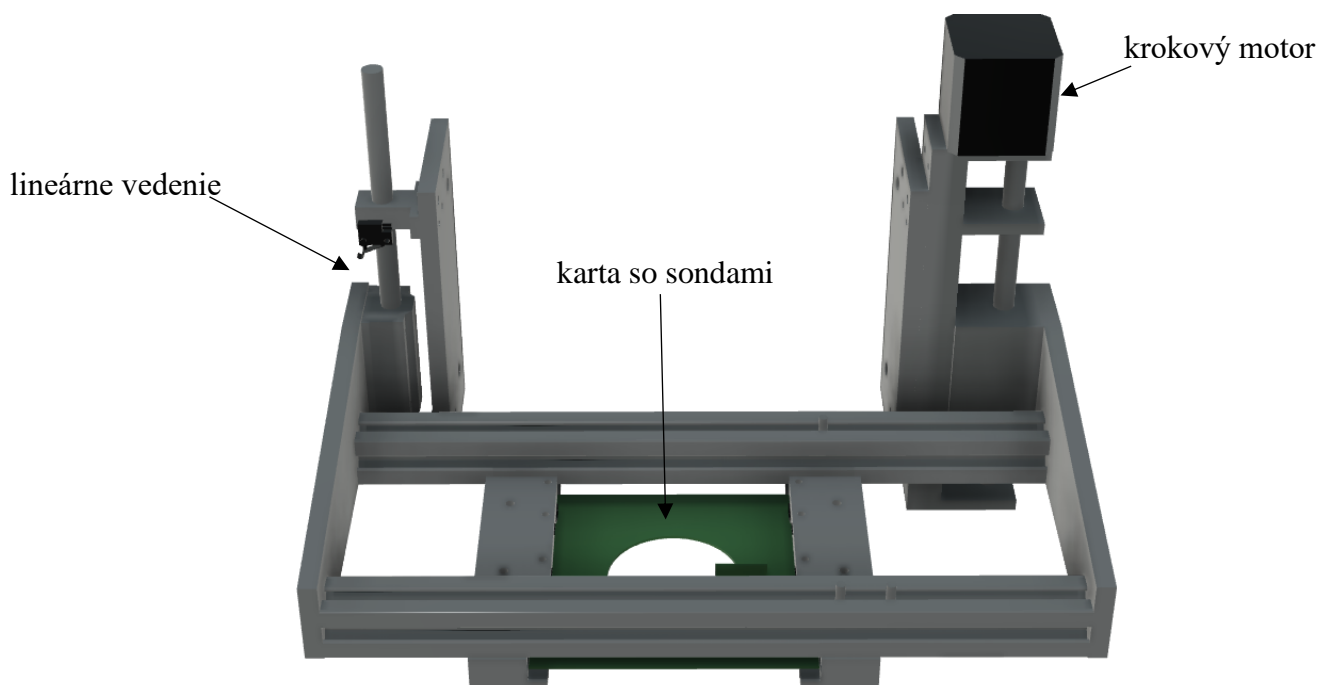
#### 4.4 Návrh kontaktovacej hlavy

Pôvodná kontaktovacia hlava, viď. obrázok 4.3, je určená pre karty so sondami, na ktorých bolo otestované kontaktovanie na starom prístroji. Jej hlavným nedostatkom je veľkosť kariet a zároveň pracovnej plochy. Tieto nedostatky ovplyvňujú hlavne jednoduchosť práce, zorné pole kamery, veľkosť použitého objektívu a možnosti osvetlenia. Malý priestor na kontaktovacej hlave znemožňuje výrobu alebo dostavovanie vlastných kariet so sondami na prístroji. Z toho vyplýva, že karty so sondami by sa museli kupovať, čo by bolo finančne nevýhodné a tým pádom aj nevhodné pre výskum.



Obrázok 4.3 Pôvodná kontaktovacia hlava prístroja

Z tohoto dôvodu sa navrhla nová kontaktovacia hlava, vid'. obrázok 4.4, s plochou  $688 \text{ cm}^2$  určená pre karty so sondami s rozmermi  $150 \times 150 \text{ mm}$ . Jej veľká plocha umožňuje použitie viacerých mikroposuvov alebo zostáv pre upevnenie sondy na kartu so sondami. Ďalšou výhodou je, že kontaktovacia hlava neovplyvňuje veľkosť kamery alebo mikroskopu spolu s osvetlením. V konštrukcii sú použité pôvodné lineárne vedenia, ktoré sú otočené z vonkajšej strany a doplnené o predĺžené ramená.



Obrázok 4.4 Model navrhnutej kontaktovacej hlavy

Zväčšením kontaktovacej plochy sa zvýši aj jej hmotnosť, ktorá môže negatívne ovplyvniť presnosť a opakovateľnosť pohybu. Pôvodná hmotnosť kontaktovacej hlavy bola predpokladaná na  $5 \text{ kg}$ . [22] Potrebný krútiaci moment krokového motorčeka bol vypočítaný na  $0,004 \text{ Nm}$ . [22] Nová navrhnutá kontaktovacia hlava ma hmotnosť  $6 \text{ kg}$  a predpokladané zaťaženie sa odhaduje maximálne na  $12 \text{ kg}$ . Predimenzovaním veľkosti zaťaženia sa zabezpečuje spoľahlivosť práce prístroja. Potrebný krútiaci moment je vypočítaný podľa vzorca, ktorý bol použitý aj pre všetky ostatné motory v bakalárskej práci. [22]

Výpočet potrebného statického momentu pre os Z kontaktovacej hlavy je

$$M_{\text{stat}} = \frac{F_{\text{MAX}} \cdot P_h}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} = \frac{120 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,9} = 0,106 \text{ Nm} \quad (4.1)$$

kde  $F_{MAX}$  je sila pôsobiaca na os,  $P_h$  je stúpanie guľôčkovej skrutky a  $\eta_c$  je účinnosť prenosu pohybu. [22]

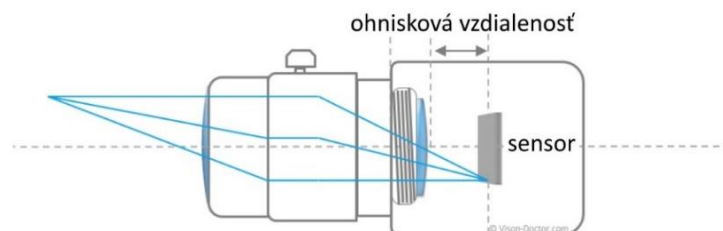
Potrebná veľkosť statického krútiaceho momentu bola vypočítaná na 0,106 Nm, čo bez problémov dokáže poskytnúť pôvodný použitý krokový motor s lineárnym posuvom FSL40E10010C7, ktorého maximálna hodnota statického krútiaceho momentu je 188 Nm a maximálne zaťaženie podľa výrobcu je 20 kg. [22]

## 4.5 Návrh optickej sústavy

Os určená pre optickú sústavu bola navrhnutá veľmi univerzálne, a to podľa možnosti zaťaženia a upevnenia optickej sústavy. Vďaka tomu je možné použiť rôzne druhy kamier, mikroskopov alebo aj kombinácií kamery a objektívu. Z tohto dôvodu nie je potrebné upravovať mechanické riešenie optickej sústavy. V prvej časti tejto kapitoly je opísaný proces výberu kamery a objektívu, v druhej časti návrh ich upevnenia a riešenie nastavovania zväčšenia objektívu. V poslednej časti je opísaný výber vhodného osvetlenia s jeho riadením.

### 4.5.1 Výber kamery a objektívu

Požiadavky na spracovanie obrazu sú definované hlavne zväčšením, rozlíšením a vzdialenosťou ohniska. Zväčšenie kamery sa upravuje objektívom. Väčšie rozlíšenie kamery znižuje potrebné zväčšenie objektívu, ale zároveň zvyšuje cenu kamery. Ďalšou požiadavkou je vzdialenosť ohniska, ktorá do značnej miery ovplyvňuje možnosť pracovať s ihličkami a vhodne osvetľovať pracovnú plochu. Vzdialenosť ohniska od pracovnej plochy sa pri komerčných prístrojoch pohybuje okolo 10 cm. Poslednou požiadavkou je typ koncovky objektívu. Najviac používané koncovky objektívov sú C, CS, F a M uchytenie. Rozdielom medzi jednotlivými druhmi koncoviek je priemer a vzdialenosť ohniska medzi koncom objektívu a senzorom kamery, viď. obrázok 4.5.



Obrázok 4.5 Ohnisková vzdialenosť [25]

Pre kameru bol ponechaný pôvodný model ELP-USBFHD06H-SFV, ktorý ma rozlíšenie 2 MP, USB výstup a koncovku pre CS objektívy. V kamere je použitý CMOS senzor s veľkosťou pixelu  $2.8 \times 2.8 \mu\text{m}$ . Počet pixelov na šírku senzora je 2000 a na výšku je 1121. Ku kamere je pripojený objektív s zväčšením 6-krát a vzdialenosťou ohniska od pracovnej plochy 10 cm, čo zabezpečuje vhodnú pracovnú vzdialenosť.

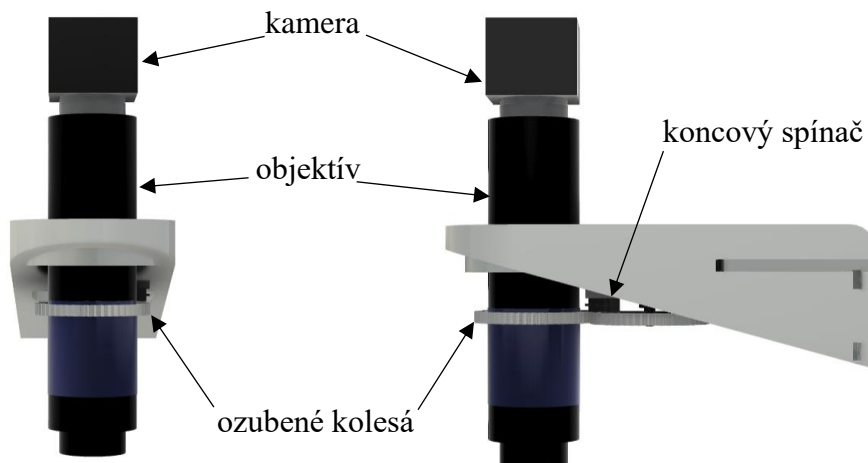
Výpočet veľkosti minimálnej hrany čipu je

$$d_{min} = \frac{p_{pixel} \cdot d_{pixel}}{x} = \frac{1121 \cdot 2,8 \cdot 10^{-6}}{6} = 0,523 \text{ mm} \quad (4.2)$$

kde  $p_{pixel}$  je počet pixelov hrany senzora,  $d_{pixel}$  je veľkosť hrany pixela a  $x$  je zväčšenie objektívu. Z toho vyplýva, že pri maximálnom zväčšení je minimálna hrana čipu, ktorá by bola zobrazená na celej ploche obrazovky, 0,523mm.

#### 4.5.2 Návrh hlavy pre optickú sústavu

Výsledná optická sústava pozostáva z kamery, objektívu, osvetlenia a ovládania zväčšenia objektívu. Pre všetky tieto súčiastky bola navrhnutá hlava, vid'. obrázok 4.6, ktorá zabezpečuje ich dostatočnú pevnosť a stabilitu. K telu prístroja je hlava optickej sústavy pripevnená štyrmi skrutkami a matkami na pohybujúcej sa doske v osi Z. Na spodnej strane hlavy sa nachádza otvor pre krokový motorček s ozubenými kolieskami, ktoré sú používané na nastavenie zväčšenia objektívu. Ozubené kolieska sú v pomere 1:1 a obsahujú aj koncový spínač, ktorý obmedzuje uhol otáčania na  $270^\circ$ .

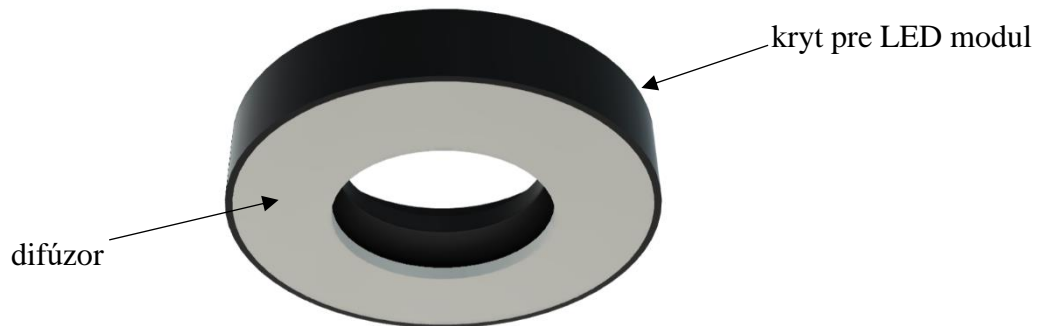


Obrázok 4.6 Model hlavy pre kameru a objektív

#### 4.5.3 Návrh osvetlenia

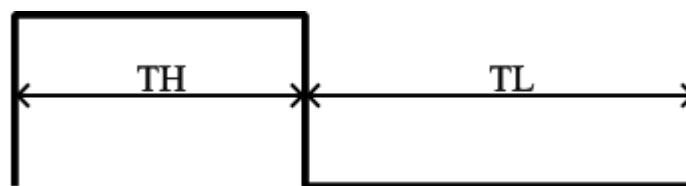
Pri návrhu osvetlenia bol zvolený kruhový LED modul, pre ktorý bol navrhnutý kryt s difúzorom, vid'. obrázok 4.7. Vhodné osvetlenie je veľmi dôležité pre správne spracovanie obrazu. Vybraný LED modul obsahuje 8 LED diód WS2812 so spoločným

výkonom 2,2 W. Každý čip WS2812 obsahuje kontrolér pre 3 farby LED, ktoré sú v jeho vnútri a to červenú, zelenú a modrú. Použitím rôznej kombinácie a intenzity dokáže vytvoriť 16,7 miliónov farieb. Minimálne napájacie napätie je 3,5 V a maximálne 5,3 V. Čip obsahuje 4 vývody, z čoho dva sú určené na napájanie a dva na komunikáciu. Komunikačné piny sú rozdelené na dátový vstup a dátový výstup, čo umožňuje zapojiť viacero led kaskádne a pritom ich nezávisle ovládať.



Obrázok 4.7 Kryt s difúzorom pre LED kruhový modul

Na komunikáciu s jednotlivými čipmi sa využíva protokol, ktorý na ovládanie jedného čipu používa 24 bitov. V diagrame, vid' obrázok 4.8, je uvedený príklad ovládacej sekvencie signálu a v tabuľke sú uvedené časy pre 3 ovládacie kódy. Skratka TH reprezentuje dobu, počas ktorej je signál vo vysokej úrovni a skratka TL dobu, počas ktorej je v nízkej úrovni.[26]



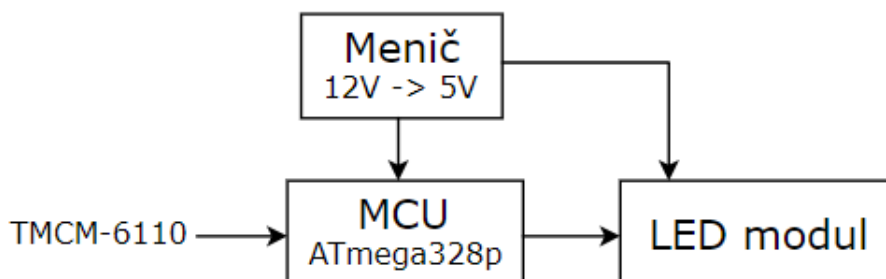
Obrázok 4.8 Časový diagram ovládacieho signálu

Tabuľka 4.3 Časové parametre pre jednotlivé kódy [26]

Kód	TH [ns]	TL [ns]
0	220-380	580-1000
1	580-1000	220-420
Reset	-	>2800

Na ovládanie LED modulu bol zvolený mikrokontrolér ATmega328p v module Arduino PRO mini. Modul obsahuje 16 Mhz oscilátor a lineárny regulátor z 12V na 5V pre mikrokontrolér. Jeho úlohou je generovať osem 24-bitových kódov oddelených

resetom podľa zvolenej intenzity. Od najvýznamnejšieho bitu je kód rozdelený na štyri 8-bitové čísla, určujúce intenzitu farieb v poradí zelená, červená a modrá. Na nastavenie intenzity sa využíva signál z dosky TCMC-6110. Bloková schéma zapojenia spolu meničom pre napájanie LED module, je zobrazená na schéme, vid'. obrázok 4.9 .



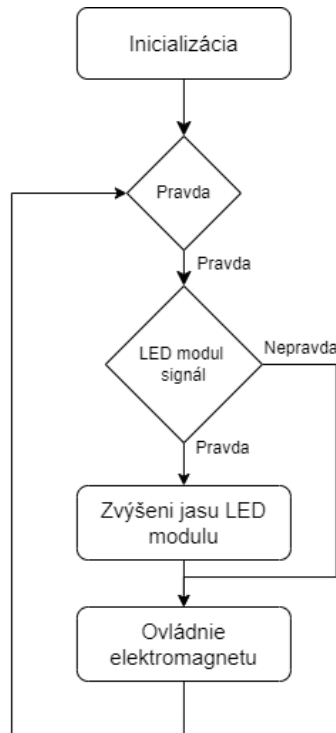
Obrázok 4.9 Bloková schéma zapojenia LED modulu

Na napájanie mikrokontroléra a LED modulu je potrebných 5V, a preto musí byť vybraný vhodný menič z napätia 12V na 5V, ktorý bude zabezpečovať dostatočný prúd. Pri voľbe medzi meničom a lineárnym regulátorom bol uprednostnený menič, pretože v prípade použitia regulátoru by vznikol veľký rozdiel vstupného a výstupného napätia, ktorý by následne spôsobil veľký stratový výkon. Potrebný prúd je vypočítaný ako

$$I_{max} = I_{LED} + I_{MCU} = 0,2 + 0,04 = 0,24A \quad (4.3)$$

kde  $I_{LED}$  je maximálny prúd pre LED modul,  $I_{MCU}$  je maximálny prúd pre mikrokontrolér. Vypočítaný výstupný prúd je 0,24A. Je vhodné k vypočítanému prúdu pridať rezervu pre zvýšenie spoľahlivosti. Ako menič bol zvolený modul, ktorý bol nevyužitý v inej práci. Tento modul niekoľko násobne spĺňa požiadavky.

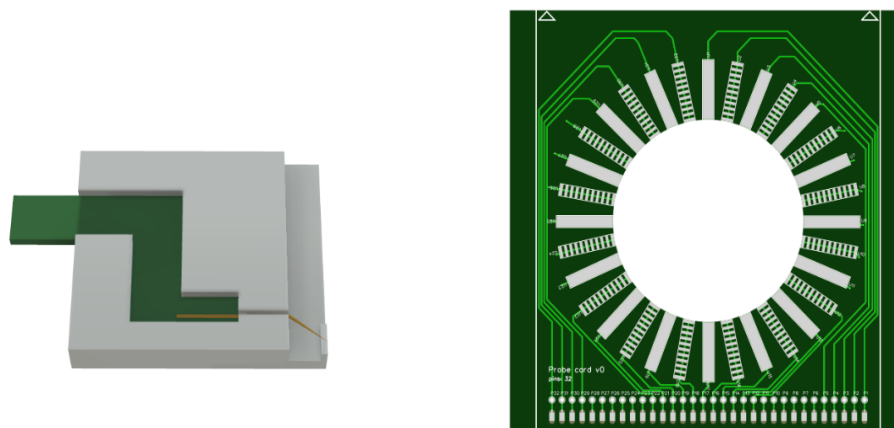
Funkcionalita vyžadovaná od mikrokontroléra je implementovaná podľa blokového diagramu, vid'. obrázok 4.10. Ako prvé sa po zapnutí nastaví v bloku inicializácia vstupné a výstupné porty mikrokontroléra. Následne program pokračuje do nekonečnej slučky, kde zaznamenáva hodnotu na ovládacom signáli z TCMC-6110 a deteguje prechod z vysokej do nízkej úrovne. Po takomto prechode sa zväčší intenzita osvetlenia LED modulu. Toto riešenie bolo zvolené z dôvodu, že TCMC-6110 neobsahuje žiadne vstupné periférie pre komunikáciu, ktoré by bolo možné ovládať. Diagram obsahuje aj blok ovládania elektromagnetu, ktorého funkcia je vysvetlená v blokovom diagrame, vid'. obrázok 4.10.



Obrázok 4.10 Blokový diagram pre funkciu osvetlenia

## 4.6 Návrh karty so sondami

Pre spoľahlivosť a opakovateľnosť jednotlivých meraní bola navrhnutá karta so sondami, vid' obrázok 4.11. Pozostáva z hlavnej dosky a sond, ktoré sa na ňu môžu prilepiť alebo prispájkovať s cínom. Jednotlivé sondy sú navrhnuté tak, aby bolo možné využiť ihličky, ktoré je možné presne prispájkovať za pomoci prípravku vytlačeného na SLA tlačiarňi. Karta so sondami bola navrhnutá ako čo najuniverzálnejšia pre upravovaný prístroj. Jej rozmer je 150 x 150 mm a v strede má otvor o priemere 72 mm, čo poskytuje možnosť použitia rôznych typov ihličiek a sond. Maximálny počet sond na karte je 32. Na upevnenie boli navrhnuté dva vzory, jeden s plnou výplňou a druhý rebrováný, ktorý poskytuje jednoduchšie prispájkovanie, vďaka menšiemu odvodu tepla. Dosky sú vyrobené z FR4 s úpravou horúcim cínom. Ich rozmery sú vyfrézované s presnosťou  $\pm 200 \mu\text{m}$ , a boli vyrobené firmou JLCPCB. [23] Maximálny prúd na jednu sondu je limitovaný na 1.3 A pri zvýšení teploty cesty na plošnom spoji o  $10^\circ\text{C}$ . [24]



Obrázok 4.11 Model navrhnutého prípravku na osadzovanie ihličky a karta so sondami

## 4.7 Možnosti uchytenia ihličky na sondu

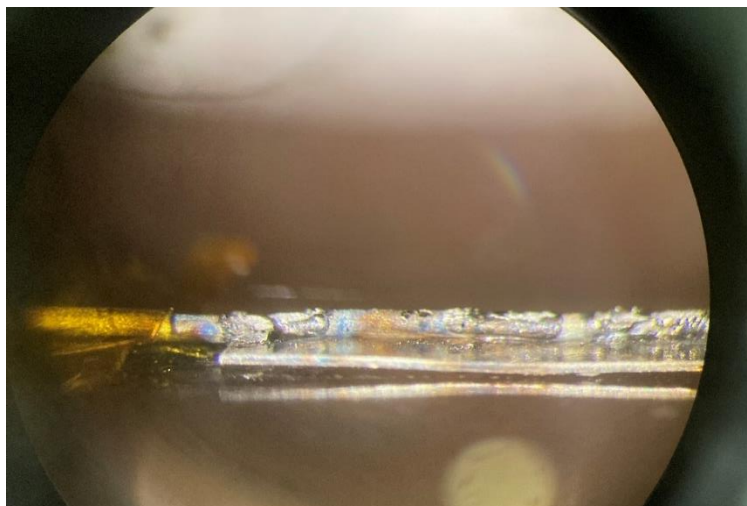
Sonda bola navrhnutá tak, aby na ňu bolo možné upevniť ihličky všetkými spôsobmi, ktoré sa využívajú v praxi, a to za pomoci lepidla, prispájkovania cínom alebo bodovým zvaraním. Na bodavej zvaračke SUNKON 709A bolo otestované pripevnenie ihličky bodavým zvarom, vid'. obrázok 4.12. Ďalším testovaným spôsobom bolo prilepenie ihličky, vid'. obrázok 4.13. Posledným spôsobom bolo prispájkovanie cínom, vid'. obrázok 4.14 .

### 4.7.1 Odporové bodové zváranie ihličiek

Odporové bodové zváranie ihličiek je spôsob zvárania, ktorý je využívaný hlavne v automobilovom priemysle najmä vďaka jeho efektívnosti. [25] Ďalšie uplatnenie nachádza pri zváraní tenkých plechov alebo častí na ťažko dostupných miestach. Princíp jeho fungovania je založený na vzniku tepla a tlaku. Teplo je generované prechodom veľkého prúdu o malom napätí medzi elektródami. V bode tlaku, teda v mieste kde sú elektródy pritláčané k materiálu, vzniká bodový zvar. [25] Vzniknuté zvary majú vysokú pevnosť v smere roviny plechu oproti smeru kolmo k plechu. [25]

Pri testovaní možnosti bodového zvárania ihličky bol zvolený ako upevňovací materiál niklový pliešok o hrúbke 0,2 mm. Na pliešok bola položená ihlička a na ihličku elektródy bodovej zvaračky. Výsledný bodový zvar, vid'. obrázok 4.12, obsahuje viaceré nedostatky. Pre zlepšenie kvality zvaru sa skúšalo viacero nastavení bodovej zvaračky, no výsledok nebol ani v jednom prípade optimálny. V bodoch zvaru vznikalo roztavenie ihličky alebo niklového plechu a zároveň pri menších prúdoch ihlička nebola dostatočne prizváraná k plechu. Najväčším problémom však bola dlhá doba nastavovania a veľká

závislosť kvality zvaru na tlaku elektród na ihličku. Tieto problémy sa dali riešiť vyrobením prípravku, čo by ale bolo zbytočne komplikované riešenie.



Obrázok 4.12 Zvar ihličky bodovou zvaračkou

#### 4.7.2 Prilepenie ihličky

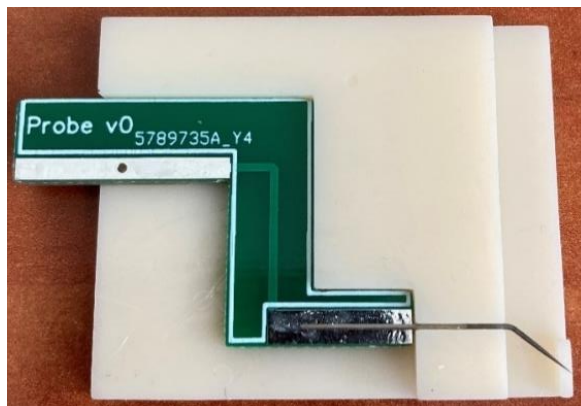
Na otestovanie možnosti prilepenia ihličky bol zvolený prípravok na osadenie vytvorený na 3D tlačiarňi, ktorého použitie zabezpečuje opakovateľné a jednoduché osadzovanie ihličky. Vodivé prepojenie môže byť realizované buď dotykom ihličky a vodivej plošky alebo prispájkovaním vodiča na ihličku. Tento proces sa ukázal ako spoľahlivejší vzhľadom na presnosť, jednoduchosť a rýchlosť práce s ním. Jeho nedostatkami bolo rozlievanie lepidla a dodatočná potreba vytvárania vodivého prepojenia.



Obrázok 4.13 Prilepená ihlička

### 4.7.3 Prispájkovanie ihličky cínom

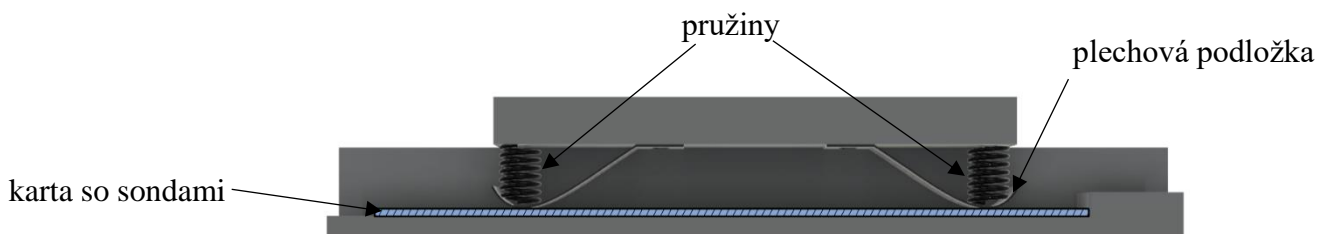
Na prispájkovanie ihličky bol použitý rovnaký prípravok na osadzovanie, ako pri postupe lepenia. Jediným rozdielom bol len spôsob výroby prípravku, a to za použitia SLA 3D tlačiarne, ktorá sa vyznačuje väčšou presnosťou pri výrobe ako FDM. Povrchová úprava ihličky umožňuje prispájkovanie cínom, ktoré zabezpečí dostatočnú pevnosť a vodivé prepojenie. Výhodou tejto metódy je jej rýchlosť, prenosnosť a opakovateľnosť, zatiaľ čo jej nedostatkom je potreba použitia ihličky, na ktorú je možné prispájkovať cín, čo môže byť vyriešené pokovaním ihličky.



Obrázok 4.14 Prispájkovaná ihlička

## 4.8 Návrh fixácie karty so sondami

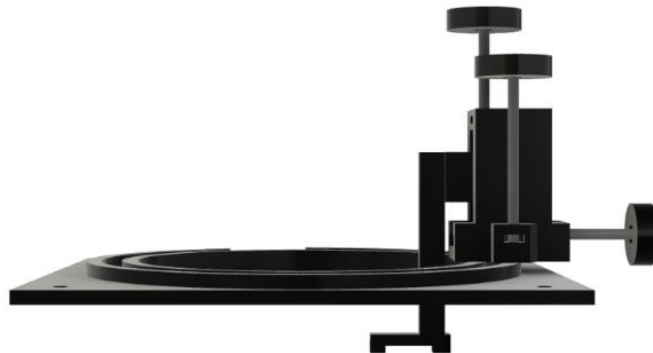
Pri návrhu mechanizmu fixácie karty so sondami sa bral dôraz na zistenia z pôvodného mechanizmu. Nedostatkami predošlého spôsobu boli dlhý čas vkladania karty a nerovnomerné dotiahovanie skrutkami, čo vo výsledku spôsobovalo rôznych prehyb karty podľa dotiahnutia a jej následné poškodenie. Problém s nerovnomernou silou dotáčania karty bol vyriešený pružinami s plechovou podložkou, ktorá rozkladá silu rovnomerne, viď. obrázok 4.15.



Obrázok 4.15 Model fixovania karty so sondami

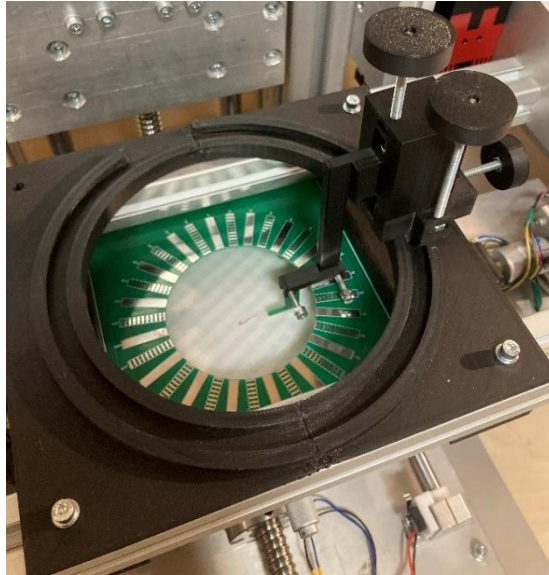
## 4.9 Návrh pre osadzovanie sond na kartu

Jedným z krokov v procese prípravy karty so sondami je aj jej osadenie sondami. Pre tento projekt bol zvolený postup vlastného osadzovania sond, vzhľadom na viaceré výhody, ktorými sa vyznačuje, ako zníženie nákladov a poskytnutie rýchleho vykonávania úprav, čo je dôležité najmä pri výskumných testovaniach. Pre proces vlastného osadzovania bola navrhnutá jednoduchá sústava, vid'. obrázok 4.16, ktorá toto osadzovanie zjednodušuje. Pohyb sústavy je okolo osi z celých 360°, s možnou fixáciou vybraného miesta. Ďalej je možné s osadzovanou sondou hýbať v 2 smeroch, a to po osi Z a po osi Y. V spojení s rotáciou poskytuje tento prípravok možnosť osadiť sondu na ktorúkoľvek vybranú pozíciu a nastaviť hrot sondy tak, aby presne smeroval na plôšku na čipe. Pohyby v jednotlivých osiach sú zabezpečené vodiacimi drážkami v tvare T a závitovou tyčou M4, ktorá prenáša krútiaci pohyb na lineárny. Stúpanie metrického závitú je 0,7 mm, čo odpovedá pohybu 2  $\mu\text{m}$  na 1°. Vôľa a nepresnosť tohto závitú nie je podstatná, keďže jeho vyžitie je určené k čisto manuálnemu nastavovaniu a minimálnej záťaži.



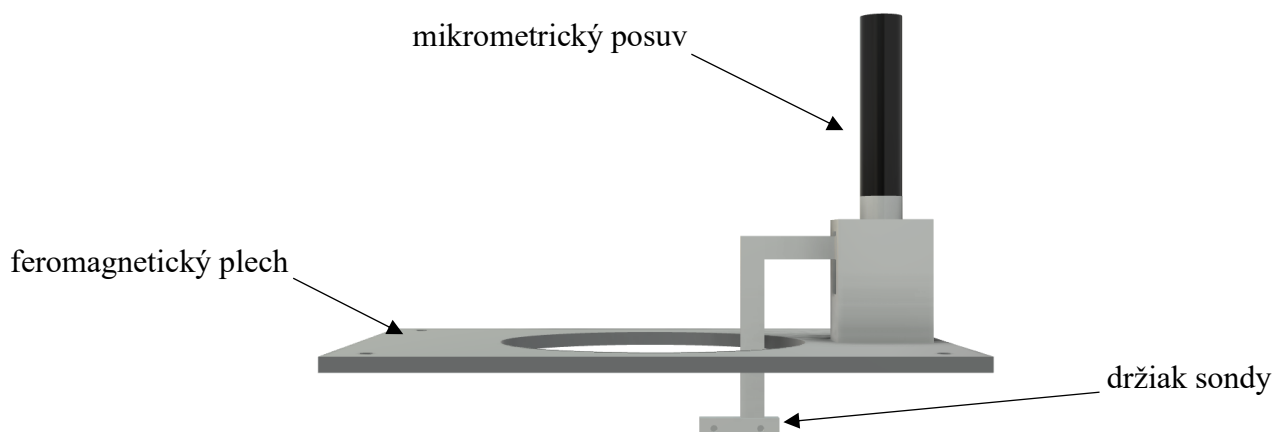
Obrázok 4.16 Model navrhnutého osadzovacieho prípravku pre sondy

Kompletná sústava na osadzovanie bola vytlačená na 3D tlačiarni z PLA, vid'. obrázok 4.17. Tento prístup bol zvolený pre rýchle overenie konceptu v praxi. Pri testovaní boli zistené viaceré nedostatky v presnosti a v pevnosti, ktoré komplikovali osadzovanie. Najväčším problémom bola vôľa vo vodiacich drážkach, ktorá spôsobovala kývanie osadzovanej ihličky pri pohybe. Toto kývanie v jednotlivých osiach nespôsobovalo závažné komplikácie, no v spojení všetkých os spôsobovalo odchýlky do 0,5 mm. Problémy by bolo možné vyriešiť zmenou materiálu na hliník a využitím presnejších skrutiek, tieto zmeny by však spôsobili značné zvýšenie nákladov na obrábanie, preto bol zvolený prístup, pri ktorom sa zjednodušila sústava na osadzovanie sond.



Obrázok 4.17 Koncept sústavy na osadzovanie sond

Zjednodušenie sústavy spočíva v myšlienke odstránenia posuvov v osiach X a Y a rotácie okolo osi Z, a ponechanie len posuvov v osi Z. Posuvy v osiach X a Y by boli vykonávané ručným posuvom operátora celej sústavy na feromagnetickú plochu. Udržanie nastavenej polohy by zabezpečoval elektromagnet. Najdôležitejší pohyb je v osi Z, pretože nastavuje polohu ihličky na sonde oproti plôške na čipe. Z tohto dôvodu by bol pre jeho pohyb zvolený mikrometrický posuv s drážkou v tvare T. Výsledný model vid' obrázok 4.18.



Obrázok 4.18 Model zjednodušeného osadzovacieho prípravku pre sondy

Tento prípravok v sebe obsahuje elektromagnet, ktorý slúži na fixáciu pozície. Zapnutie a vypnutie elektromagnetu sa ovláda tlačidlom, ktorého signál je spracovávaný rovnakým mikrokontrolérom, ako pri ovládaní LED modulu. Schéma zapojenia tlačidla

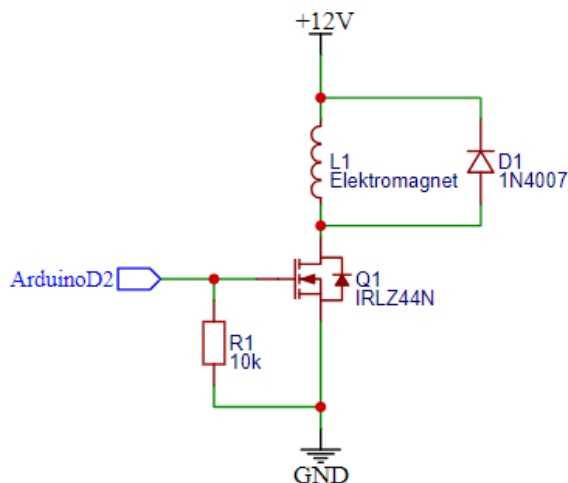
k mikrokontroléru, vid'. obrázok 4.19. Obvod sa skladá z n-kanálového MOSFET tranzistoru Q1, ktorého hradlo je uzemnené cez 10 K $\Omega$  odpor R1, pre zabezpečenie zatvoreného kanálu. Ku cievke elektromagnetu L1 je pripojená dióda, pretože eliminuje napät'ové špičky na cievke pri jej spínaní. Odpor cievky elektromagnetu je 53,2  $\Omega$ , čo určuje maximálny prúd podľa rovnice

$$I_L = \frac{U}{R_L} = \frac{12}{53,2} = 0,225 \text{ A} \quad (4.4)$$

kde  $I_L$  je maximálny prúd,  $U$  napájacie napätie a  $R_L$  odpor cievky elektromagnetu. V rovnici nie je zahrnuté napätie na MOSFET-e, ktoré je možno zanedbať z dôvodu, že MOSFET je plne saturovaný a jeho hodnota rádovo menšia. Stratový výkon na MOSFET-e je vypočítaný podľa rovnice

$$P_{Q1} = I_L \cdot R_{DSon} = 0,225 \cdot 0,22 = 0,05 \text{ W} \quad (4.5)$$

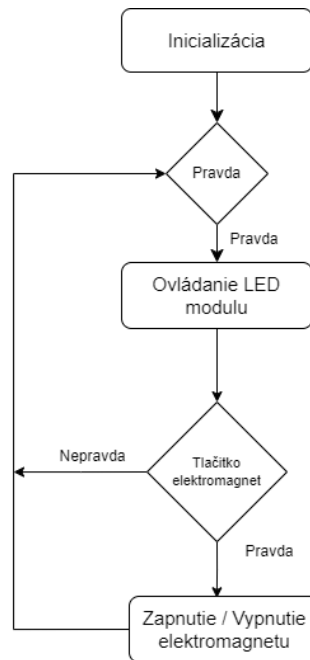
kde  $P_{Q1}$  stratový výkon na MOSFET-e,  $I_L$  je maximálny prúd cez cievku a  $R_{DSon}$  je odpor MOSFET-u pri zopnutí. Výsledný stratový výkon je niekoľkonásobne menší než maximálny stratový výkon pre puzdro TO-220, ktorý je 50 W.



Obrázok 4.19 Schéma zapojenia elektromagnetu

Tlačidlo pri stlačení spája vstup mikrokontroléra so zemou. Pri nestlačení tlačidla je vstup pripojený cez interný rezistor na napájacie napätie mikrokontroléra. Vstupný signál sa spracováva metódou poolingu podľa vývojového diagramu, vid'. obrázok 4.20. Z dôvodu nenáročnosti na rýchlosti spracovania zmeny stavu tlačidla, nie je potrebné využiť riešenie s interptom, pretože doba, počas ktorej sa posielajú dáta na LED modul, je niekoľkonásobne menšia ako doba, počas ktorej je stlačené tlačidlo. Vstup tlačidla je ošetrený o zákmyty na softvérovej vrstve za pomoci funkcie, ktorá zaznamenáva do neznamienkovej, 32-bitovej premennej, prečítanú hodnotu a bitovo ju posúva do ľavej strany. Výstup funkcie sa zmení iba v prípade, ak sú všetky bity premennej rovné 0.

Pre zapnutie alebo vypnutie elektromagnetu sa kontroluje na tlačidle sekvencia aktuálnej a predošlej prečítanej hodnoty na tlačidle.



Obrázok 4.20 Blokový diagram ovládania elektromagnetu

## 4.10 Návrh vákuového stolčeka

Vákuový stolček, vid' obrázok 4.21, sa skladá z mikrometrickeho stolčeka a z plastovej podložky, ktorou je vedený externý zdroj vákuu. Táto podložka má možnosť rotácie okolo osi Z o 270°. Maximálny uhol rotácie je daný spôsobom prívodu vákuu na stolček. Rotácia je plne motorizovaná krokovým motorom 28BYJ-48 s prevodovaním v pomere 1:7,5. Ozubené kolieska a úchyt pre motor sú vyrobené na 3D tlačiarňami z PLA. Najdôležitejšou požiadavkou na výrobu stolčeka je rovinnosť plochy, na ktorej je umiestnený čip, a preto bol na výrobu vybraný materiál, ktorý vo svojom surovom stave poskytuje vysokú rovinnosť. Vákuum je cez stolček vedené dierou vo vnútri, na ktorú bude kolmo vyvrtaná diera s priemerom 0,5 mm. Táto diera zabezpečuje fixáciu čipu na mieste. Vákuum je ovládané ručným ventilom, vid' obrázok 4.22.



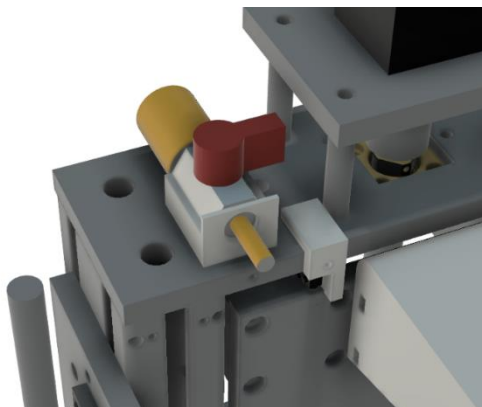
Obrázok 4.21 Model navrhnutého vákuového stolčeka

Motorizovaná rotácia obmedzuje maximálny pohyb v osi Y, a to z dôvodu, že krokový motor je pripevnený o pevnú časť stolčeka. Toto riešenie bolo zvolené najmä pre jeho jednoduchosť a pre nepotrebnosť obrábania mikrometrického stolčeka. Pohyb v ose X je rovnako ako v osi Y obmedzený pripevnením motora, no v prípade osi X je obmedzenie podstate menšie a menej závažné. Výrazný pohyb v osiach X a Y je nepravdepodobný, keďže ich úlohou je čo najpresnejšie doladenie nastavenia. Presnosť rotácie okolo osi Z závisí na polohe plochy na čip v osiach X a Y, a to z dôvodu, že so zväčšujúcou sa vzdialenosťou plochy na čip dochádza aj k zväčšeniu vôle medzi ozubenými kolesami. Maximálne hodnoty možností pohybu sú uvedené v tabuľke, vid'. tabuľka 4.4.

Tabuľka 4.4 Možnosti pohybu mikrometrického stolčeka

	osi		
	X	Y	Z
posuv	2 mm	13 mm	370°
presnosť [μm]	1	1	2°

Ventil je umiestnený na podložke vyrobenej na 3D tlačiarni, ktorá je skrutkami pripevnená na ľavú stranu na osi Z, kde neprekáča ostatným pohybujúcim sa časťami prístroja. Toto umiestnenie bolo zvolené taktiež pre zachovanie vhodného vedenia hadičky vákua, pri ktorom bolo nutné predchádzať kritickému polomeru jej ohybu. V opačnom prípade by ohyb mohol spôsobiť prerušenie vedenia vákua.



Obrázok 4.22 Model navrhnutého ovládania vakuua

## 4.11 Návrh elektronického zapojenia

Návrh elektrického prepojenia je uvedený v blokovej podobe, vid'. obrázok 4.23. Napájanie celého systému zabezpečuje zdroj LRS-150-24 s výstupným napätím 24 V a s maximálnym výstupným prúdom 6,5 A. Podľa výpočtu maximálneho prúdu v rovnici, tento zdroj spĺňa požiadavky s 15% rezervou. Celkový potrebný prúd pre zdroj z 230 V na 24V je vypočítaný ako

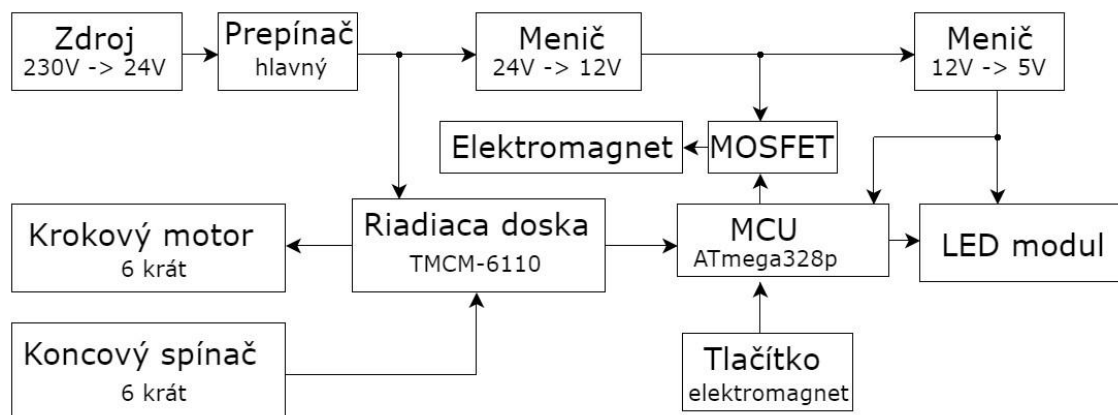
$$\begin{aligned} I_{max} &= 4 \cdot I_{motor} + 2 \cdot I_{28BYJ} + I_{TMCM} + I_{ostatné} \\ &= 4 \cdot 1,26 + 2 \cdot 0,05 + 0,15 + 0,2 = 5,49 \text{ A} \end{aligned} \quad (4.6)$$

kde  $I_{motor}$  je maximálny prúd krokového motora,  $I_{28BYJ}$  je maximálny prúd pre krokové motory 28BYJ,  $I_{TMCM}$  je prúd pre riadiacu dosku TMCM-6110 a  $I_{ostatné}$  je prúd pre osvetlenie elektromagnetu a mikrokontrolér. Zdroj taktiež obsahuje základné druhy ochrany proti prehriatiu, proti preťaženiu, proti nárastu napätia a proti skratu. Napätie 24 V bolo zvolené, pretože účinnosť krokových motorov pri tomto napätí je najlepšia. Napätie 24 V pokračuje ďalej cez hlavný prepínač, ktorý slúži k zapnutiu a vypnutiu celého systému. Následne schéma obsahuje 2 meniče, a to z 24 V na 12V a z 12 V na 5V. Napätie 12 V je určené na ovládanie elektromagnetu, ktorý slúži k fixácii polohy prípravku na osadzovanie sond. Toto napätie je ovládané cez MOSFET, ktorý je ovládaný mikrokontrolérom. Mikrokontrolér má na vstupe tlačidlo "elektromagnet", podľa ktorého sa ovláda MOSFET. Potrebný prúd pre menič s výstupom 12 V bol vypočítaný podľa rovnice

$$I_{max} = I_{elektromagnet} + I_{5V \text{ menič}} = 0,225 + 0,1 = 0,325 \text{ A} \quad (4.7)$$

a následne bol zvolený modul meniča spolu s čipom LM2596, ktorý zabezpečuje potrebný prísun prúdu s rezervou 90%. Napätie 5 V slúži k napájaniu LED modulu a mikrokontroléru. Mikrokontrolér ovláda LED modul podľa ovládacieho signálu z riadiacej dosky. Pre tento menič bol vypočítaný maximálny výstupný prúd v rovnici (4.3)

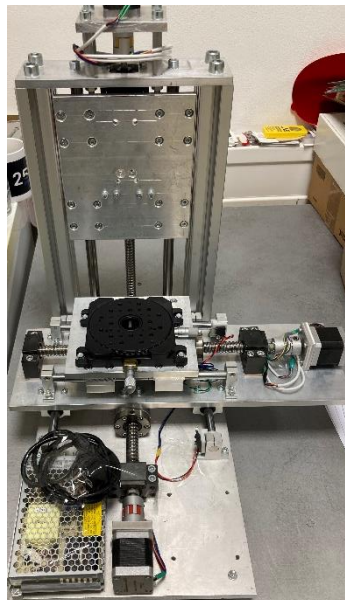
a bol zvolený modul s čipom AMSROL-78NZ, ktorý spĺňa tento parameter s rezervou 92%. Riadiaca doska TCMC-6110 je pripojená k 6 krokovým motorom a koncovým spínačom.



Obrázok 4.23 Blokové schéma

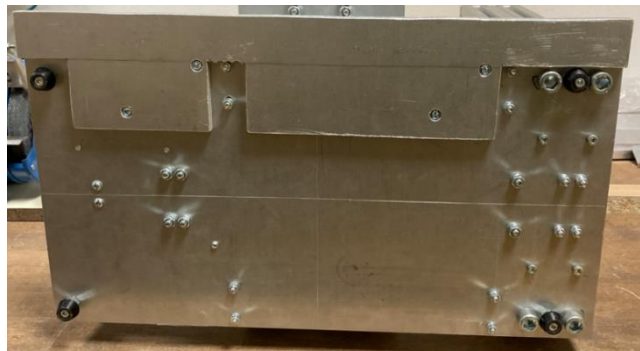
## 5. REALIZOVANÉ ZMENY NA KONŠTRUKCII

V tejto kapitole sú opísané všetky zmeny, ktoré boli vykonané na prístroji. V jednotlivých podkapitolách je vo väčšom detaile rozobraný proces skladania, nedostatky pri obrábaní a ich kompenzácia. Pred skladaním prístroja bolo nutné rozobrať a odmastiť všetku elektroniku a ostatné pomocné časti, aby sa predišlo ich poškodeniu. Súčasťou rozobratého prístroja boli tri osi, vid'. obrázok 5.1, tie však ostali v celku, najmä z dôvodu veľkej časovej náročnosti, ktorú by priniesol proces ich opätovného nastavenia. Z tohto dôvodu sa ich guľôčkové skrutky a ostatné náchylné časti museli prelepiť alebo prekryť, aby sa zamedzilo ich poškodeniu kovovými trieskami, ktoré vznikali pri vŕtaní.



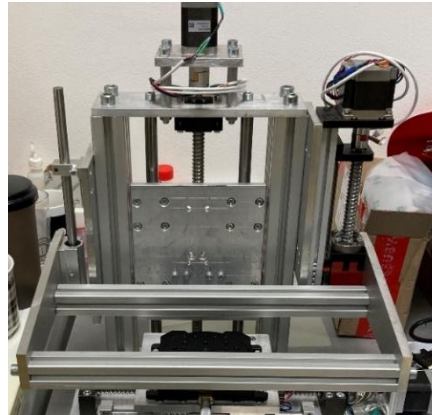
Obrázok 5.1 Rozobratý prístroj

Zväčšenie hlavnej dosky, vid'. obrázok 5.2, bolo pripevnené skrutkami M4 s obyčajnými podložkami a s pérovými podložkami spolu s matkou, ktoré zabraňujú uvoľňovaniu spoja.



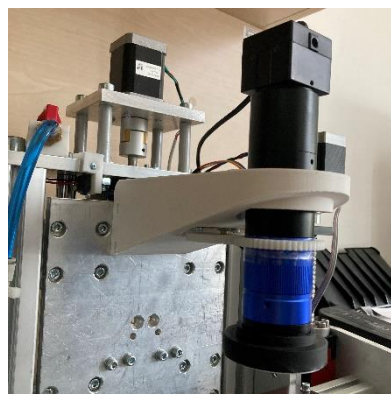
Obrázok 5.2 Pripevnená rozširujúca doska

Zväčšenie pracovnej plochy kontaktovacej hlavy bolo poskladané s dvoch hliníkových profilov, do ktorých boli vytvorené závity. Tieto hliníkové profily boli spojené skrutkami s ramenami kontaktovacej hlavy, vid'. obrázok 5.3. Kolmosť medzi týmito dvoma časťami bola upravená frézou, no aj napriek tomu bolo nutné podložiť niektoré spoje tenkými vrstvami fólie. Po dotiahnutí všetkých skrutiek nasledovalo skontrolovanie, ktorého cieľom bolo zistiť prípadné vznikanie odporu pri pohybe v niektorých pozíciách. Ak by bol odpor pri pohybe prítomný, spôsobil by zbytočné zaťažovanie krokového motora, preskočenie kroku alebo ohyb konštrukcie.



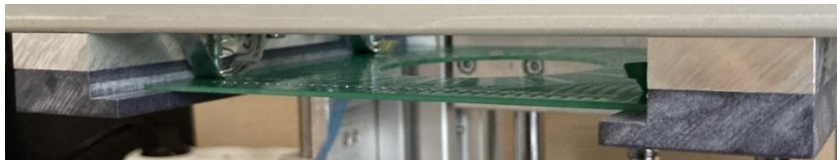
Obrázok 5.3 Poskladaná kontaktovacia hlava

Pri skladaní optickej sústavy bolo potrebné vytvoriť diery na uchytenie hlavy pre kameru, vid'. obrázok 5.4. Počas procesu vŕtania bolo potrebné zabezpečiť, aby sa vyvŕtaný materiál nedostal do guľôčkovej skrutky. Rameno, ktoré drží kameru, bolo vyrobené na 3D tlačiarňi z plastu PLA, a je pripevnené štyrmi skrutkami, ktoré priťahujú matice vo vnútri ramena. Pri výrobe bolo tým pádom podstatné, aby nastavenie smeru tlače vrstiev zabezpečilo čo najväčšiu pevnosť. Súčasťou ramena je ozubený prevod s krokovým motorom, ktorý bol pripevnený dvoma skrutkami do tela ramena. Ozubené koleso pre ovládanie objektívu muselo byť doplnené o vrstvu pásky na vyplnenie medzier.



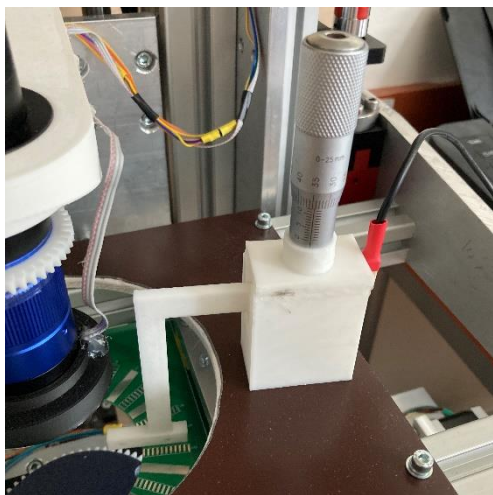
Obrázok 5.4 Poskladaná optická hlava

Pri procese skladania drážky pre hlavu so sondami s automatickou fixáciou bolo podstatné, aby mal vnútorný rozmer rovnakú hodnotu ako šírka karty. Z tohto dôvodu sa postupovalo pri skladaní takým spôsobom, kedy sa jedna strana upevnila pevne a druhá voľne, a následne sa vložila karta dovnútra. Po vložení karty nasledovalo mierne dotiahnutie strany, ktorá bola upevnená voľne. Karta sa následne opakovane vsunula a vysunula, popri čom sa upravila aj poloha nedotiahnutej strany. Nakoniec, keď bolo zaručené presné vkladanie bez prítomnosti odporu, bola úplne dotiahnutá voľnejšia strana.



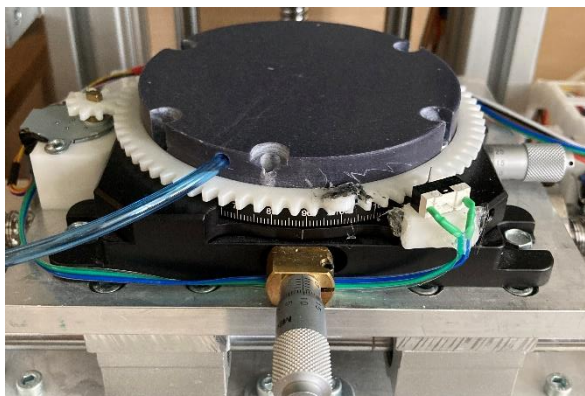
Obrázok 5.5 Drážka pre kartu so sondami

Skladanie prípravku určeného na osadzovanie sond na karty pozostávalo z presného upravenia nepresností na vodiacej drážke, ktoré vznikli pri 3D tlači. Tieto nepresnosti bolo potrebné upraviť tak, aby sa zabezpečil pohyb bez odporu, a zároveň, aby mal čo najmenšiu vôľu. Po odstránení nedostatkov vzniknutých 3D tlačou, bol do tela prípravku priskrutkovaný elektromagnet s napájacími káblami vyvedenými do konektoru na zadnej strane. Vnútna drážka v tvare T bola potretá vrstvou vazelíny, aby sa zmenšilo trenie pri pohybe. Poslednou časťou procesu skladania bolo vloženie mikrometrického posuvu s krytom, ktorý bol prizváraný k telu prípravku. Prizváranie vrchného krytu bolo vykonané z dôvodu, že poskytlo väčšiu pevnosť, ako by bolo dosiahnuté v prípade lepeného spoja.



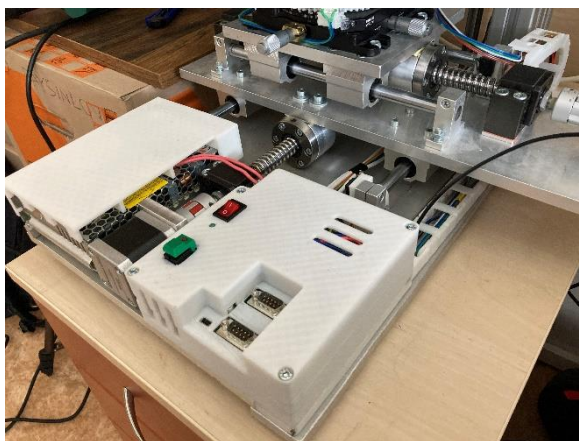
Obrázok 5.6 Poskladaný prípravok na osadzovanie sond

Proces skladania vákuového stolčeka pozostával z navrtania dier pre skrutky, ktoré budú držať plochu pre čip na mikrometrickom stolčeku. Vrtanie dier sa vykonávalo pomaly, aby nedochádzalo k roztaveniu a následnej deformácii materiálu okolo nich. V opačnom prípade by deformácia mohla spôsobiť znehodnotenie rovinnosti plochy. Do podstavca pre čip bola vyvrtaná diera na vákuum. Napriek dodržaniu postupu a pomalého vrtania vznikla nad dierou vypuklina, ktorá bola zrazená hranou zalamovacieho noža. Poslednou časťou bolo vsunutie ozubeného kolesa na podstavec a priskrutkovanie krokového motorčeka.



Obrázok 5.7 Poskladaný vákuový stolček

Realizácia elektronického zapojenia a krytia elektroniky je veľmi dôležitou súčasťou procesu výroby prístroja, najmä preto, lebo zvyšuje jeho spoľahlivosť, bezpečnosť práce a poskytuje možnosť jednoduchších opráv. Všetky vodiče, ktoré vedú do jednej súčiastky, sú spojené v jeden celok bužírkou a sú označené číslom. Pre os Z je využitá ohybná vodiaca cesta, ktorá zamedzuje vzniku nevhodného ohybu vodičov pri pohybe do  $35^\circ$  na 4 cm. Pre krytie bol využitý pôvodný kryt prístroja, upravený o doplnujúce diery na vodiče a nastavbu pre ohybnú vodiacu cestu.



Obrázok 5.8 Kryt elektroniky a ochrana vodičov

## 6. SOFTVÉR

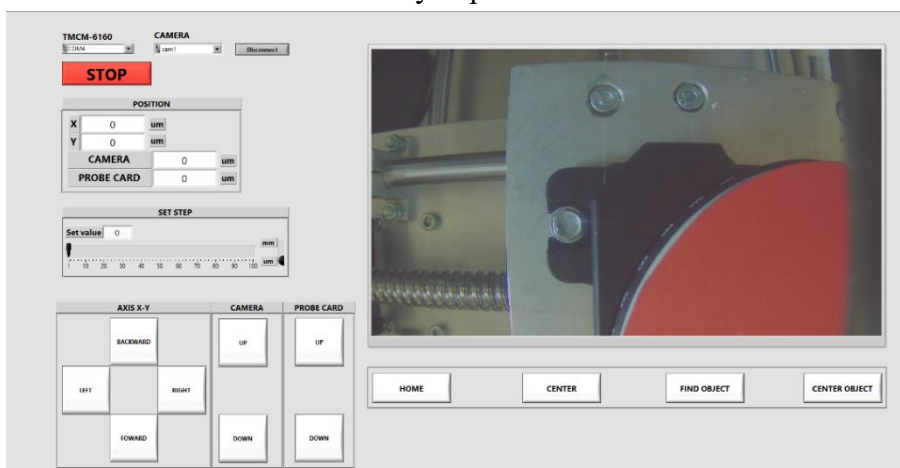
Pri návrhu softvéru na ovládanie prístroja sa vychádzalo zo znalostí získaných počas testovania pôvodného softvéru, ktorý bol vytvorený v programe LabVIEW™. Finálny navrhovaný softvér bude musieť zabezpečovať jednak svoju pôvodnú funkcionality, ale taktiež bude doplnený o ovládacie prvky, ktoré boli pridané na prístroj v rámci diplomovej práce. Cieľom je dosiahnuť kvalitu softvéru, ktorá bude umožňovať užívateľovi jednoduchú a príjemnú prácu s prístrojom.

### 6.1 Pôvodná aplikácia

Pôvodná aplikácia, vid'. obrázok 6.1, zabezpečovala ovládanie všetkých motorizovaných osí za pomoci nastavenia kroku v okne (SET STEP) a kliknutím na jedno z tlačidiel. Aktuálna pozícia oproti referenčnému bodu bola zobrazovaná v okne (POSITION). Finálny program obsahoval 4 doplnkové funkcie, ktoré zabezpečovali efektívnejšiu prácu s prístrojom. Funkcia (HOME) vyhľadávala referenčné pozície pre všetky osi, funkcia (CENTER) upravovala pozíciu stola na stredu osi X a Y. Funkcie (FIND OBJECT) a (CENTER OBJECT) boli určené na automatické nájdenie čipu za pomoci obrazu z kamery a upravenie jeho pozície tak, aby sa nachádzal v strede kontaktovacej plochy. Softvér komunikoval cez dva USB porty spolu s kamerou a riadiacou doskou TCMC-6110, ktorá ovládala pohyb všetkých motorov.

Hlavné nevýhody pôvodného softvéru:

- Ovládanie klikaním na tlačidlá.
- Manuálne nastavovanie pripojenia.
- Nutnosť použitia programu LabVIEW™ na spustenie softvéru.
- Detekcia obrazu bez nastaviteľných parametrov.



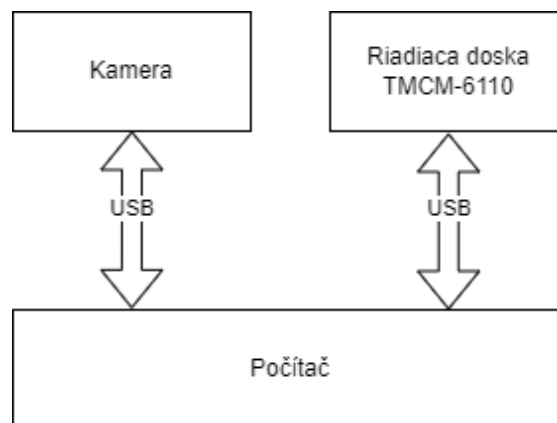
Obrázok 6.1 Grafické rozhranie pôvodného softvéru

## 6.2 Požiadavky na nový softvér

Nový softvér navrhovaný v rámci tejto diplomovej práce by mal odstrániť všetky nedostatky pôvodného softvéru a taktiež zabezpečiť ovládanie pridaných krokových motorov.

- Komunikácia cez USB.
- Ovládanie 6 krokových motorov.
- Ovládanie klávesovými skratkami a ich nastavenie.
- Nastavenie parametrov na detekciu čipu.
- Automatické zaostrenie kamery pre rôzne veľkosti zväčšenia.
- Automatické nastavenie osvetlenia.
- Nájdenie referencie všetkých osí.
- Posuv stolu do stredu.
- Posuv stolu za kliknutím kurzoru v obraze z kamery.
- Zobrazovanie chybových hlášok.

Prepojenie kamery, riadiacej jednotky TCMC-6110 a počítaču, vid' obrázok 6.2, je realizované za pomoci dvoch USB káblov.



Obrázok 6.2 Diagram prepojenia počítaču s prístrojom

## 6.3 Python

Na vytvorenie nového softvéru bol zvolený programovací jazyk Pythonm, a to najmä z dôvodu jeho veľkej popularity, veľkého množstva modulov, jednoduchosti, nespoplatnenej distribúcie a veľkej komunite vývojárov. Python je interpretovaný, interaktívny, objektovo orientovaný programovací jazyk. Podporuje viacero programovacích paradigiem ako objektovo orientované programovanie, procedurálne,

či funkčné programovanie. Python je prenosný, funguje na mnohých variantoch operačného systému Unix, vrátane Linuxu, macOS a Windows.[28] Jeho hlavnou nevýhodou je rýchlosť, ktorá sa prejavuje pri spracovávaní obrazu, ďalšou jeho komplikovanosť pri vytváraní kompilovanej verzie v podobe spustiteľného súboru. PyInstaller je modul na vytvorenie spustiteľného súboru z Python kódu. Funkčnosť takto vytvoreného spustiteľného súboru môže byť problematická a v niektorých prípadoch nespoľahlivá, a preto bol zvolený prístup s absenciou vytvárania spustiteľného súboru. Ďalším problémom, ktorý by sa pri použití tohto programovacieho jazyka mohol vyskytnúť, je existencia viacerých verzií s rôznymi knižnicami Python-u v počítači, čo by spôsobovalo komplikácie pri spustení softvéru. Riešením tohto problému je spúšťanie Python-u vo virtuálnom prostredí.

## 6.4 Python moduly

S prihliadnutím na požiadavky na softvér boli zvolené potrebné moduly pre Python, ktoré sú definované v nasledujúcich podkapitolách. Ostatné využité moduly ako json, či time, sú súčasťou štandardnej knižnice Python-u.

### 6.4.1 pySerial

Tento modul poskytuje prístup k sériovým portom pre Python bežiaci na Windows OS, OSX, Linux a BSD. Modul je využitý v softvéri na komunikáciu s riadiacou doskou TCM-6110 cez USB.[29]

### 6.4.2 tkinter

Tento modul umožňuje vytváranie grafického užívateľského rozhrania a je súčasťou štandardnej knižnice Python-u. Tento modul bol zvolený z dôvodu jeho jednoduchosti a veľkého množstva existujúcej dokumentácie.

### 6.4.3 OpenCV

OpenCV (Open Source Computer Vision) poskytuje komplexnú sadu nástrojov pre vývoj aplikácií na počítačové videnie v reálnom čase. V softvéri zabezpečuje spracovanie obrazu z kamery, spolu s ďalšími funkciami na upravovanie či detekciu hrán. Modul poskytuje 6 metód detekovania hrán, a to Cannyho detekciu hrán, Sobelovu detekciu hrán, Laplaciovu detekciu hrán, Scharrovu detekciu hrán, Prewittovu detekciu hrán a Kirschovu detekciu hrán. [33] [34]

### 6.4.4 Pillow

Pillow je populárny modul používaný na spracovanie obrazu, ktorý poskytuje jednoduché a efektívne prostriedky na otváranie, úpravu a ukladanie rôznych typov obrazových súborov. V softvéri je využívaný na zobrazovanie obrazu z kamery.

### **6.4.5 NumPy**

NumPy je základný balík určený na vedecké výpočty. Je to knižnica, ktorá poskytuje viacrozmerný objekt poľa, rôzne odvodené objekty (ako sú maskované polia a matice) a sortiment rutín pre rýchle operácie na poliach, vrátane matematických, logických, tvarových manipulácií, triedenia, výberu, I/O, diskretných Fourierových transformácií, základnej lineárnej algebry, základných štatistických operácií, náhodných simulácií a mnohých ďalších. V softvéri je táto knižnica využitá pri detekcii hrán.[30]

## **6.5 Virtuálne prostredie**

Virtuálne prostredie je nástroj, ktorý umožňuje vytvárať izolované a nezávislé inštalčné prostredia pre obsahujúce rôzne balíčky pre jednotlivé projekty. Tieto virtuálne prostredia umožňujú izolovať inštalácie balíčkov pre rôzne projekty, čo pomáha zabrániť konfliktom medzi rôznymi verziami balíčkov a zabezpečuje, že každý projekt má svoje vlastné nezávislé prostredie. Pre python je využité virtuálne prostredie venv, ktoré je súčasťou inštalácie Python-u.

## **6.6 Inštalácia a spustenie aplikácie**

Z dôvodu jednoduchosti inštalácie a spustenia aplikácie pre užívateľa je tento problém riešený dvoma batch súbormi, ktoré budú slúžiť k inštalácii a k spusteniu aplikácie. Týmto riešením sa stáva spustenie a inštalácia veľmi podobnými, ako je to pri iných aplikáciách. Inštalčný súbor obsahuje skript na inštaláciu správnej verzie Pythonu, virtuálneho prostredia a potrebných modulov. Súbor na spustenie najprv spúšťa virtuálne prostredie, v ktorom sa ďalej naštartuje aplikácia.

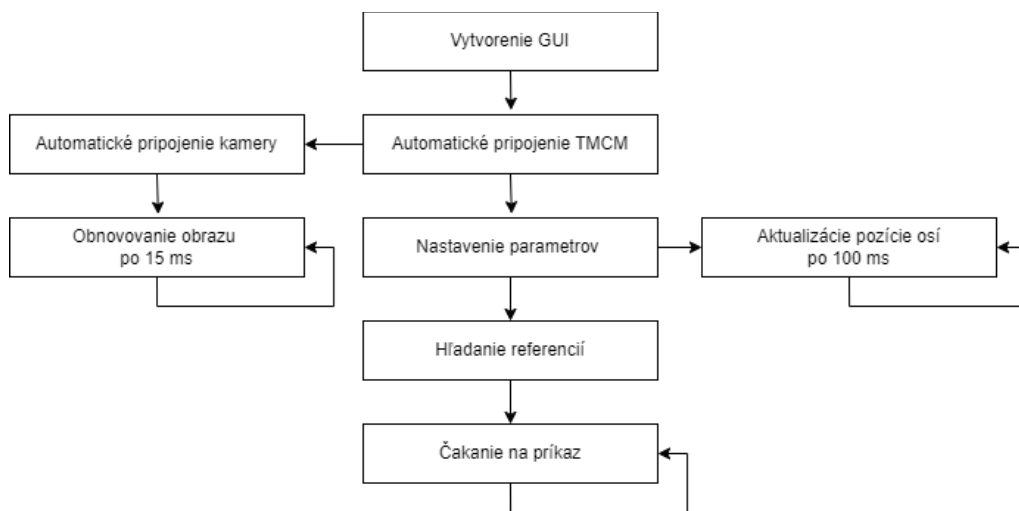
Batch je skriptovací súbor určený pre operačné systémy DOS, OS/2 a Windows. Slúži na spustenie príkazov cez interpretér príkazového riadku. [31]

## **6.7 Architektúra aplikácie**

Aplikáciu je možné rozdeliť do 3 vrstiev, vid'. obrázok 6.3, a to grafická časť, príkazová časť pre TCM-6110 a USB komunikácia. Tento prístup má rozdeliť kód na vrstvy, ktoré je následne jednoduchšie upravovať alebo pridávať ďalšie.



Obrázok 6.3 Vrstvy aplikácie



Obrázok 6.4 Vývojový diagram aplikácie

Funkcionalita aplikácie je opísaná vo vývojovom diagrame, vid'. obrázok 6.4. Postupne po spustení, sa v bloku (Vytvorenie GUI) vytvoria okná a inicializujú sa premenné v grafickom rozhraní. Následne sa aplikácia v bloku (Automatické pripojenie TCM) snaží nájsť pripojenú riadiacu dosku. Ak sa jej to podarí, tak si s ňou vytvorí prepojenie a pokračuje v diagrame ďalej, ak nie, tak čaká na manuálne nastavenie portu. Po úspešnom prepojení s riadiacou doskou sa nastaví všetky potrebné parametre dosky v bloku (Nastavenie parametrov). Ak sa podarí nastaviť všetky parametre, tak sa spustí hľadanie referencií v bloku (Hľadanie referencií). Potom program skončí v nekonečnej slučke (Čakanie na príkaz), v ktorom čaká na príkaz, ktorý ďalej predáva riadiacej doske alebo inej časti v aplikácii. Späťne po prejení cez blok (Automatické pripojenie TCM) sa spúšťa blok (Automatické pripojenie kamery), ktorý vytvorí spojenie s kamerou a následne prejde do bloku (Obnovovanie obrazu po 15 ms), čo je časovač, ktorý sa spúšťa každých 15 ms a zobrazuje obraz z kamery v grafickom rozhraní. Následne po bloku (Nastavenie parametrov) sa volá blok (Aktualizácia pozície

osí po 100 ms), ktorý zisťuje aktuálne pozície vo všetkých osiach. Kroky, ktoré sa vykonávajú v jednotlivých blokoch, sú podrobnejšie opísané v nasledujúcich kapitolách.

## 6.8 Vytvorenie GUI

Grafické rozhranie pre užívateľa je vytvorené za pomoci modulu tkinter podľa návrhu, vid'. obrázok 6.5, ktorý vychádza z predošlej aplikácie. Tento návrh bol doplnený o nastavenie intenzity osvetlenia v okne (LED intensity) a nastavenie kamery v okne (Camera settings), funkciu (Click and move) a parametre pre nastavenie detekcie čipu v okne (Chip detection). Celé rozhranie je rozdelené do troch frame-ov, ktoré definujú hlavné rozdelenie na bočnú lištu, spodnú lištu a hlavný frame pre obraz z kamery, ktorého veľkosť sa závisle mení na veľkosti displeja. Všetky okná sú vytvorené ako frame-y, v ktorých sú jednotlivé prvky umiestňované do mriežky. Prístup umiest'ovania do frame-ov za pomoci mriežky poskytuje rýchlu a jednoduchú možnosť pridávania ďalších prvkov. Všetky ovládacie prvky majú svoj názov alebo piktogram spolu s klávesovou skratkou, s ktorou sú prepojené. Prepojenie klávesovej skratky je možné zapnúť a vypnúť v hornej lište Settings a active shortcuts. Prepojenia je možné upravovať v hornej lište Settings a shortcuts, kde sa vytvorí nové okno, v ktorom je možné uložiť zmeny alebo resetovať pôvodné nastavenia.

The image shows a GUI application window titled 'Settings'. It is divided into several sections:

- Connections:** Includes checkboxes for 'TMC2M connection' and 'Camera connection', and a 'Stop (enter)' button.
- Positions:** A table with columns for parameter names and values:
 

axis X	0	um
axis Y	0	um
axis Z camera	0	um
axis Z probe	0	um
table angle	0	°
- LED Intesity:** A section with an 'Automatic (u)' checkbox and a slider set to 50%.
- Camera settings:** Includes a 'Magnification (m)' slider (set to 50%), an 'Auto focus (g)' checkbox, and other controls with keyboard shortcuts like (k), (l), (u), and (h).
- Step size:** A section with a '0' checkbox, a '50%' slider, and labels 'um (u)' and 'mm (y)'. It also includes '(wheel)' labels.
- Table:** A grid of buttons with keyboard shortcuts:
 

(a)	(w)	(e)	(e)
(a)	(d)		
	(s)		(d)
- Functions:** A row of buttons: 'Home', 'Center', 'Center chip', and 'Click an move' (with a checkbox).
- Chip detection:** A section with a 'Find chip (g)' checkbox and three sliders labeled 'th1', 'th2', and 'th3', each set to 50%.
- Messages:** A large empty rectangular area at the bottom.

The central part of the window is a large empty rectangle, intended for the camera image.

Obrázok 6.5 Návrh GUI aplikácie

## 6.9 Automatické pripojenie TMC

Automatické nájdenie a pripojenie riadiacej dosky je funkcia, ktorá zjednodušuje a uľahčuje prácu s prístrojom. Využíva k tomu modul serial, ktorý vytvorí slovník všetkých dostupných portov na počítači. V tomto slovníku sa následne hľadá port, na ktorý je pripojené zariadenie so sériovým názvom TMCSTEP. Ak je takéto zariadenie nájdené, vytvorí sa prepojenie. V opačnom prípade sa vypíše varovné upozornenie a čaká sa na manuálne nastavenie portu. Rýchlosť prenosu je nastavená na 9600 bitov za sekundu, 8 bitov bez parity.

## 6.10 Nastavenie parametrov

Nastavenie parametrov motorov je nutné urobiť pri každom novom pripojení, z dôvodu, že riadiaca doska neposkytuje uloženie všetkých parametrov do EEPROM. Pre všetky motory sa nastavujú rovnaké parametre s odlišnými hodnotami. Tieto hodnoty boli buď prebraté z nastavení pôvodného prístroja alebo dopočítané pomocou TMCL kalkulačky. Parametre sa zapisujú pomocou príkazu SAP, ktorý je vysvetlený v kapitole Čakanie na príkaz. Pre každý motor je potrebné nastaviť 12 parametrov, ktoré sú uvedené s vysvetlením, vid' tabuľka 6.1 .

Tabuľka 6.1 Parametre motoru

parameter	príkaz	vysvetlenie
maximálna rýchlosť	4	Maximálna rýchlosť pre príkaz z MVP.
maximálna zrýchlenie	5	Maximálna zrýchlenie / spomalenie pre príkaz z MVP.
maximálny prúd	6	Maximálny prúd pre motor.
prúd v nečinnosti	7	Prúd, ktorý sa používa, keď motor nebeží pre udržanie pozície.
ľavý referenčný spínač	13	Zapnutie / vypnutie ľavého referenčného spínača.
rozlíšenie mikrokrokov	140	Určuje počet medzi krokov v jednom kroku motora pre presnejšie pozície.
rampový deliteľ	153	Exponent parametru ovplyvňuje rýchlosť zrýchľovania / spomaľovania.
pulzný delič	154	Exponent parametru ovplyvňuje rýchlosť.
mód hľadania referencie	193	Vyber módu hľadania referencie.
rýchlosť hľadania referencie	194	Rýchlosť motora pri hľadaní referencie.
rýchlosť pri referencii	195	Rýchlosť motora po stlačení referenčného spínaču.
čas k vypnutiu	214	Doba k prepnutiu do nečinnosti.

Hodnoty nastavovaných hodnôt parametrov sú rozdelené do troch skupín podľa motora a jeho aplikácie. Prvá skupina sú motory pre os X, Y a Z pre kameru. Z dôvodu, že majú

tieto motory podobné parametre, boli pre nich vypočítané rovnaké parametre. Druhá skupina obsahuje motory 28BYJ-48 pre ovládanie zväčšenia a rotácie stolčeka.

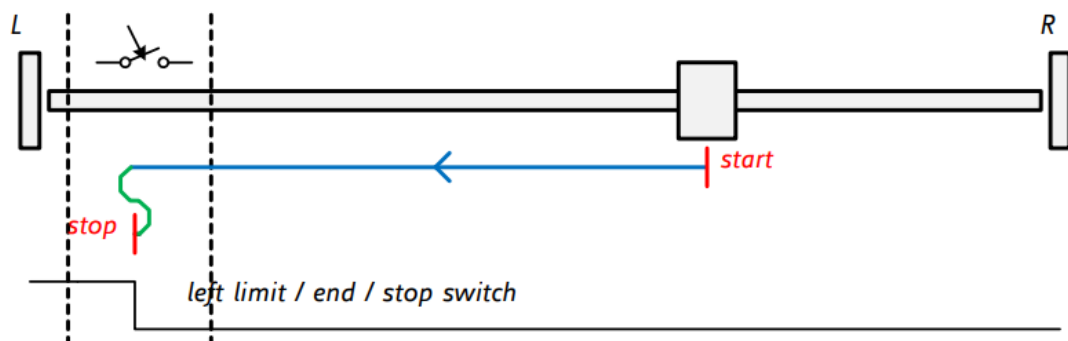
Týmto dvom motorom museli byť upravené prúdy. V poslednej skupine je motor, ktorý ovláda hlavu pre kartu so sondami, pre ktorý bolo nutné upraviť parametre prúdu tak, aby zvládol udržať svoju pozíciu pri osadzovaní sond, kde môže byť zaťažený užívateľom. Zoznam hodnôt pre parametre prúdu, vid'. tabuľka 6.2. Ostatné parametre, ktoré sú pre všetky motory rovnaké, sú uvedené zdrojom kóde.

Tabuľka 6.2 Prúdy pre jednotlivé osi

parameter	os					
	X	Y	Z kamera	Z karta so sondami	Y rotácia	zväčšenie
maximálny prúd	0,67	0,67	0,67	0,92	0,07	0,07
prúd v nečinnosti	0,25	0,25	0,25	0,46	0,05	0,05

## 6.11 Hľadanie referencií

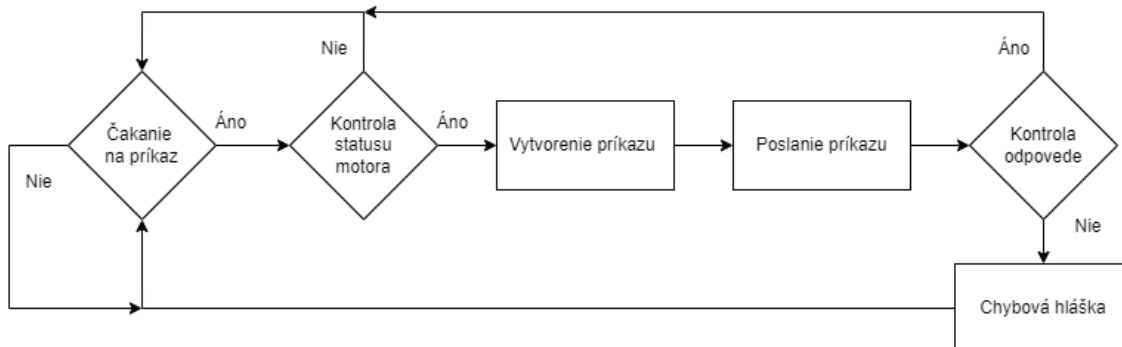
Funkcia hľadanie referencií je závislá na nastavených parametroch, ktoré určujú jej mód a rýchlosť. Pre všetky osi je nastavený rovnaký mód hľadania, vid'. obrázok 6.6, ktorý je určený na hľadanie jedného referenčného spínača. Hľadanie referencií je proces, ktorý sa automaticky spúšťa pri zapnutí prístroja, ale zároveň môže byť spustený aj tlačidlom (HOME) v aplikácii. Tento príkaz má druhú najvyššiu prioritu hneď po príkaze stop. To znamená, že príkaz hľadanie referencií je možné prerušiť len funkciou (STOP). Motor má na modrej trase nastavenú vyššiu rýchlosť ako na zelenej. Po stlačení referenčného spínača dôjde k zníženiu rýchlosti, pričom motor obráti smer otáčania a pokračuje až k rozopnutiu spínača. Potom opäť obráti smer a pokračuje k stlačeniu referenčného spínača.[22]



Obrázok 6.6 Postup hľadanie referencie [32]

## 6.12 Čakanie na príkaz

Program čaká na príkaz, ktorý môže prísť z 2 rôznych zdrojov, a to z klávesnice a myši alebo z kliknutia na tlačidlo v aplikácií, vid'. obrázok 6.7. Oba prípady sú spracovávané pomocou modulu tkinter, ktorý poskytuje možnosť vytvoriť procesy pri stlačení klávesy, alebo myši. Aplikácia rozdeľuje svoje príkazy podľa priority, ktorá im bola vytvorená v softwarovej vrstve pre zabezpečenie bezpečnej a správnej funkčnosti. Najvyššiu prioritu má jedna funkcia stop, ktorá zastaví všetky motory. Nižšiu prioritu má funkcia hľadania referencie a najnižšiu úroveň majú všetky ostatné funkcie. Zároveň majú všetky tieto funkcie s najnižšou prioritou ochranu pred prerušením ďalším príkazom. Proces vytvorenia nového príkazu začína kontrolou statusu, v ktorom sa kontroluje, či daný motor aktuálne nevykonáva predošlý príkaz. Ak stále vykonáva predošlý príkaz, nový príkaz je ignorovaný.



Obrázok 6.7 Postup hľadanie referencie

Obsah správy príkazu obsahuje 9 bajtov a odpoveď na príkaz je v rovnakej dĺžke, ale s odlišným významom jednotlivých bajtov. Význam jednotlivých bajtov príkazu a odpovede, vid'. obrázok 6.8. Bajty správ sa posielajú v poradí od adresy až po kontrolný súčet na koniec. Adresa špecifikuje adresu riadiacej jednotky, ktorá je iníciaľne 0. Podľa dokumentácie pre TCMC-6110 sú k jednotlivým príkazom priradené čísla, ktoré sa v správe definujú ako príkaz. Typ je číslo, ktoré definuje možnosti príkazu. Motor určuje číslo motoru, pre ktorý je príkaz určený. Hodnota je ako jediná definovaná ako 32-bitové znamienkové číslo, ktoré dopĺňa informáciu podľa príkazu, typu a motoru. Kontrolný súčet je súčet všetkých bajtov a jeho výsledná hodnota je 8 posledných bitov čísla. Tento súčet poskytuje určitú ochranu pri chybách v komunikácií. V odpovedi na správu sú niektoré významy pozmenené, ako napríklad modul a status. Modul definuje odpovedajúci modul a status definuje číslami, ku ktorým sú priradené rôzne významy.

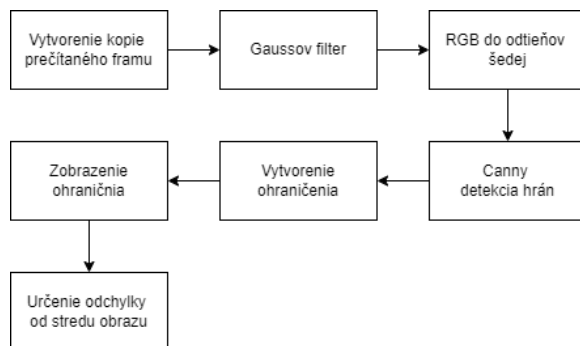
príkaz	
adresa	neznamienkové 8 bitov
príkaz	neznamienkové 8 bitov
typ	neznamienkové 8 bitov
motor	neznamienkové 8 bitov
hodnota	znamienkové 32 bitov
kontrolný súčet	neznamienkové 8 bitov

odpoveď	
adresa	neznamienkové 8 bitov
modul	neznamienkové 8 bitov
status	neznamienkové 8 bitov
príkaz	neznamienkové 8 bitov
hodnota	znamienkové 32 bitov
kontrolný súčet	neznamienkové 8 bitov

Obrázok 6.8 Štruktúra správ

### 6.13 Detekcia čipu

Na detekcie hrany čipu sa vyžíva metóda Cannyho detekcia hrán, ktorú poskytuje modul OpenCV. Metóda Cannyho bola vybraná z dôvodu, že poskytuje vysokú presnosť a nízky šum, a taktiež jednoduchú implementáciu v porovnaní s ostatnými metódami. Postup detekcie hrán spočíva v 7 krokoch, vid'. obrázok 6.9. Prvým krokom je vytvorenie kópie snímku obrazu. Tento snímok je následne rozmazaný Gausovým filtrom, aby sa odstránili ostré prechody. Následne je zmenená farba snímku na odtiene šedej z dôvodu, že modul OpenCV pre metódu Canny podporuje len čiernobiele obrázky. Ďalším krokom je detekcia hrán metódou Canny. Detegované hrany sa v nasledujúcom kroku pridajú do snímku a aproximujú sa pre vytvorenie obdĺžnika, ktorý ohraničuje čip. Posledným krokom je prevod snímku vo formáte poľa na formát zobraziteľný v aplikácii, za pomoci modulu Pylow. Získané parametre obdĺžnika sa využívajú k výpočtu odchýlky od stredu pri volaní funkcie (Center chip). Proces hľadania vykonáva každých 15ms, pokiaľ je povolená detekcia čipu v aplikácii pod názvom (Find chip).



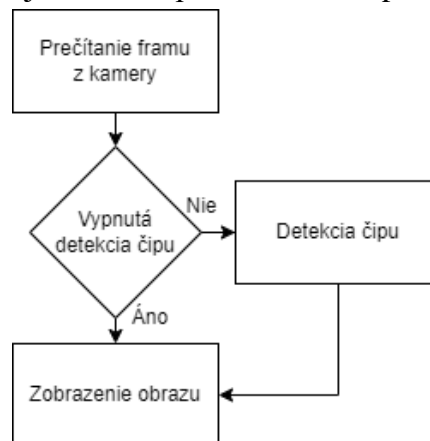
Obrázok 6.9 Postup hľadania čipu

## 6.14 Automatické pripojenie kamery

Automatické pripojenie kamery pripája vždy prvú kameru, ktorú nájde. Využíva pri tom modul OpenCV, ktorý vytvorí list všetkých dostupných zariadení na počítači. Tento list však neobsahuje žiadne informácie o kamere, takže nie je možné presne určiť, ktorá kamera je na prístroji. Z tohto dôvodu si užívateľ môže upraviť výber kamery v roletke (Camera connection).

## 6.15 Obnovovanie obrazu

Obnovovanie obrazu sa vykonáva každých 15 ms, čo odpovedá 66,6 Hz. V realite sa frekvencia obrazu môže znižovať v závislosti na rýchlosti spracovania obrazu z kamery, a taktiež je ovplyvnená detekciou čipu, ktorá ju spomaľuje. Proces obnovovania obrazu, vid'. obrázok 6.10. Tento diagram sa rozdeľuje na dve vetvy, a to na priamu vetvu pri vypnutej detekcii čipu a vetvu so zapnutou detekciou čipu.



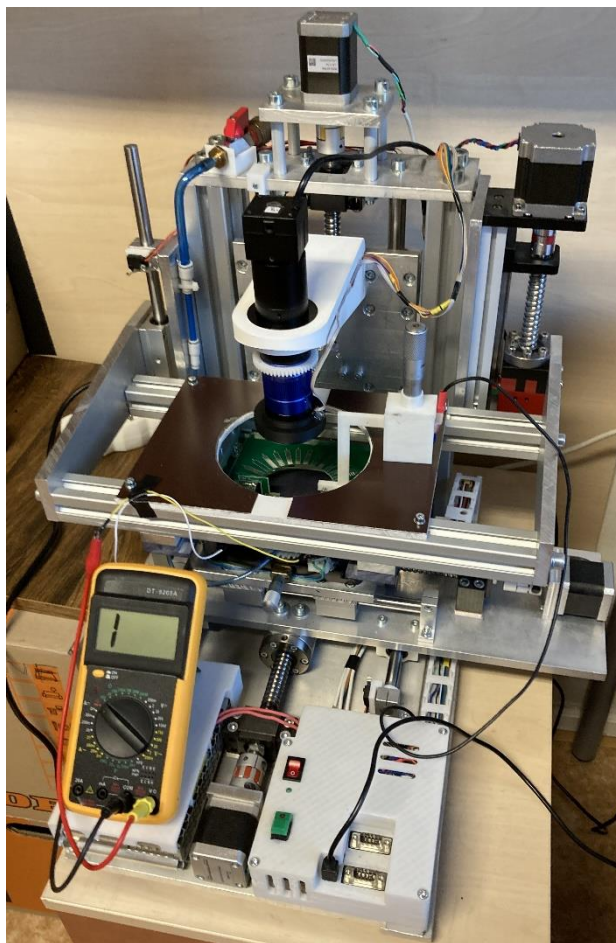
Obrázok 6.10 Diagram obnovovania obrazu

## 6.16 Opakujúce sa úlohy

Medzi opakujúce sa úlohy patrí okrem obnovovania obrazu i upravovanie zaostrenia pri zmene zväčšenia, získavanie aktuálnej polohy a nastavovanie intenzity osvetlenia. Všetky tieto procesy využívajú časovač z knižnice tkinter.

## 7. TESTOVANIE

Testovanie prístroja vid'. obrázok 7.1 bolo vykonané zmeraním parametrov prístroja a na 2 odrezaných čipoch z kremíkovej dosky. Výsledky a postupy jednotlivých testov sú uvedené v nasledujúcich podkapitolách. Prvý testovaný čip bol bipolárny NPN tranzistor KD610 o rozmere 3 mm x 3 mm. Druhý testovaný čip bol bipolárny tranzistor KF506 o rozmere 1 mm x 1 mm. Jednotlivé čipy boli skladované v nádobkách s ostatnými čipmi, čo mohlo spôsobiť ich poškodenie. Pri manipulácii s čipmi bola používaná ESD pinzeta, aby sa zabránilo ich poškodeniu. Cieľom testovania bolo zistiť funkčnosť jednotlivých častí prístroja. Na sondy boli použité vyradené ihličky rôznych typov a s rôznym poškodením. Najčastejšie poškodenie ihličky bolo jej ohnutie alebo zlomený hrot. Tieto poškodenia komplikovali proces osadzovania ihličiek na sondy ale aj samotné kontaktovanie čipu. Počas testovania bolo nedostupné vákuum, preto sa čip priliepala sekundovým lepidlom na pásku nalepenú pod ním.



Obrázok 7.1 Dokončený prístroj

## 7.1 Parametre prístroja

Parametre prístroja ako presnosť a opakovateľnosť sú veľmi dožité na zabezpečenie spoľahlivého testovania čipov a z toho dôvodu boli zamerané a spracované, vid'. tabuľka 7.1. Pre spracovanie parametrov ako presnosť a opakovateľnosť bol využitý obraz z kamery, ktorý sa prepočítaval z pixelov na vzdialenosť. Tento prístup bol zvolený z dôvodu, nedostupnosti dostatočne presného meracieho prístroju. Meranie pre osi X a Y bolo realizované pri minimálnom zväčšení 0,7 kedy jeden pixel odpovedá 1  $\mu\text{m}$ . Pomer medzi pixelom a vzdialenosťou bol určený posunutím mikrometrického stolčeka o definovanú vzdialenosť a dopočítaním koľko pixelov vzdialenosti odpovedá. Všetky ostatné parametre boli zamerané za pomoci posuvného meradla s presnosťou 10  $\mu\text{m}$ . Rovinnosť stolčeka, vid'. obrázok 7.2, oproti karte so sondami ,vid'. obrázok 7.2, bola meraná na 25 bodoch s medzerou 20 mm.

Tabuľka 7.1 Parametre dokončeného prístroja

	osi			
	X	Y	Z kamera	Z kontaktovacia hlava
<b>posuv [mm]</b>	96	86	45	53
<b>presnosť [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	2	2	2	2
<b>opakovateľnosť [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 10$	$\pm 10$
<b>rýchlosť [mm/s]</b>	20	20	20	10

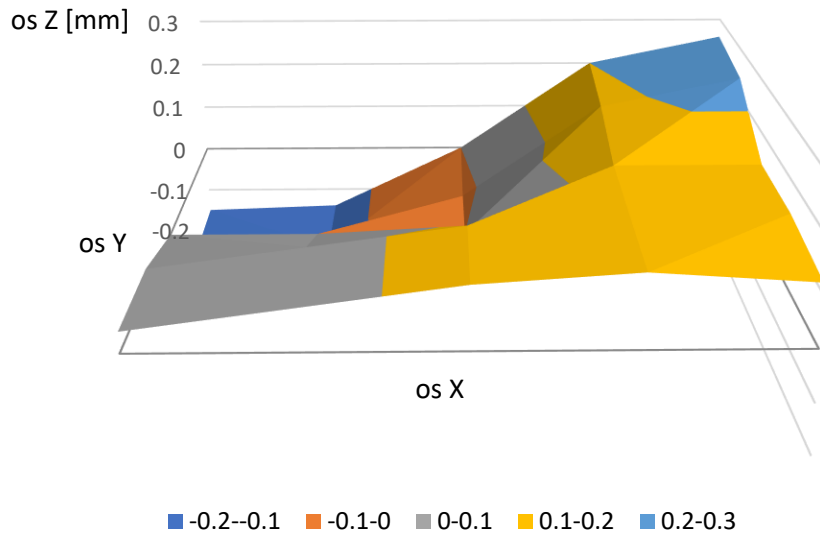
Pracovná plocha v ktorej sa stolček (os X a Y) môže pohybovať sa zmenšila z dôvodu upevnenia koncových spínačov a pridanej rezervy. Pohyb v osi Z bol upravený tak, aby sa predišlo kolízii so stolčekom. Presnosť pohybu v jednotlivých osiach je 2  $\mu\text{m}$ , čo znamená, že odchýlka príkazu a reálnej vzdialenosti bola odstránená. Opakovateľnosť v osi X a Y je  $\pm 1 \mu\text{m}$ , čo bolo odmerané za pomoci obrazu z kamery. V ostatných osiach bolo využité posuvné meradlo, ktoré ovplyvnilo presnosť merania na  $\pm 10 \mu\text{m}$ .

Tabuľka 7.2 Parametre mikrometrického stolčeka

	osi		
	X	Y	Z
<b>posuv</b>	2 mm	13 mm	270 °
<b>opakovateľnosť</b>	-	-	$\pm 1$ °
<b>presnosť [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	1	1	2 °

Parametre maximálneho posuvu mikrometrického stolčeka sa zmenšili z dôvodu motorizácie rotácie. Presnosť a opakovateľnosť rotácie okolo osi Z sú závislé na nastavení osí X a Y. Posuv v osiach X a Y nie je predpokladaný z dôvodu že prístroj

dosahuje dostatočnú presnosť takže odmerané hodnoty pre rotácie boli zistené pri nastavení osí X a Y v nulovej pozícií. Opakovateľnosť v osiach X a Y je závislá na operátorovi prístroja, pretože sa nastavuje manuálne, takže ju nebolo možné určiť.



Obrázok 7.2 Rovinnosť stolčeka voči karte so sondami

Z výsledkov merania rovinnosti stolčeka oproti kontaktovacej hlave je vidieť, že rovina je naklonená do ľavého zadného rohu. Rozdiel medzi maximom a minimom vo výške je 0,42 mm na vzdialenosti 100 mm. Priemerná hodnota odchýlky je určená podľa rovnice

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 62,8 \mu m \quad (7.1)$$

Rovinnosť plochy sa zlepšila oproti pôvodnému prístroju o 30,2  $\mu m$ , čo je v praktickom využití dostačujúce. [22] V praxi čip o veľkosti 1 mm x 1 mm bude mať rozdiel vzdialenosti na jeho krajoch ku kontaktovacej hlave 4,2  $\mu m$ .

## 7.2 Postup pri praktickom testovaní

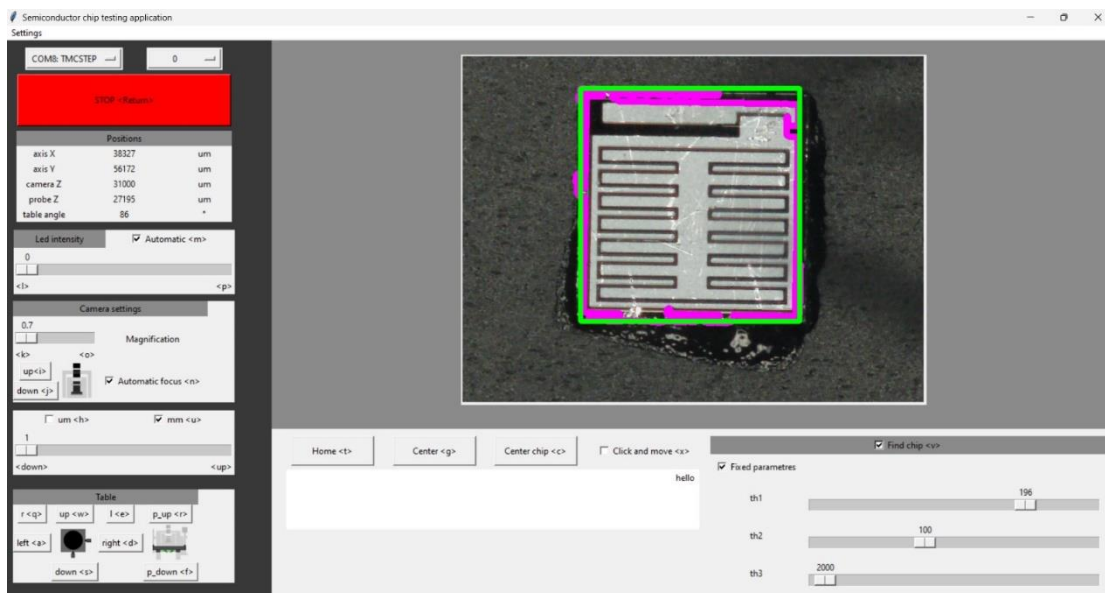
Postup testovania spočíval v postupe nasledujúcich krokov.

1. Osadenie ihličky na sondu.
2. Zapnutie prístroja a aplikácie.
3. Vloženie čipu do stredu stolčeka.
4. Príkaz (Center).
5. Upravenie uhlu čipu.

6. Povolenie možnosti (Find chip) a nastavenie parametrov hľadania.
7. Príkaz (Center chip).
8. Upravenie polohy hlavy so sondami tak, aby bola približne 2 cm nad stolom.
9. Vloženie sondy do prípravku na osadzovanie sond a upravenie polohy hrotu sondy nad kontaktovaciu plošku čipu, zapnutie elektromagnetu prípravku.
10. Upravenie výšky prípravku s mikrometrickým posuvom tak, aby bol hrot sondy čo najbližšie k povrchu plôšky čipu.
11. Následne sa za pomoci cínovej pasty prispája sonda ku karte.
12. Krok 9 až 11 sa opakuje aj pre ostatné sondy.
13. Jemnými krokmi sa vykonáva znižovanie výšky hlavy so sondami, až pokiaľ sa hrot jemne neposunie dopredu, čo znamená, že hrot sa dotkol plôšky čipu.

### 7.3 KD610

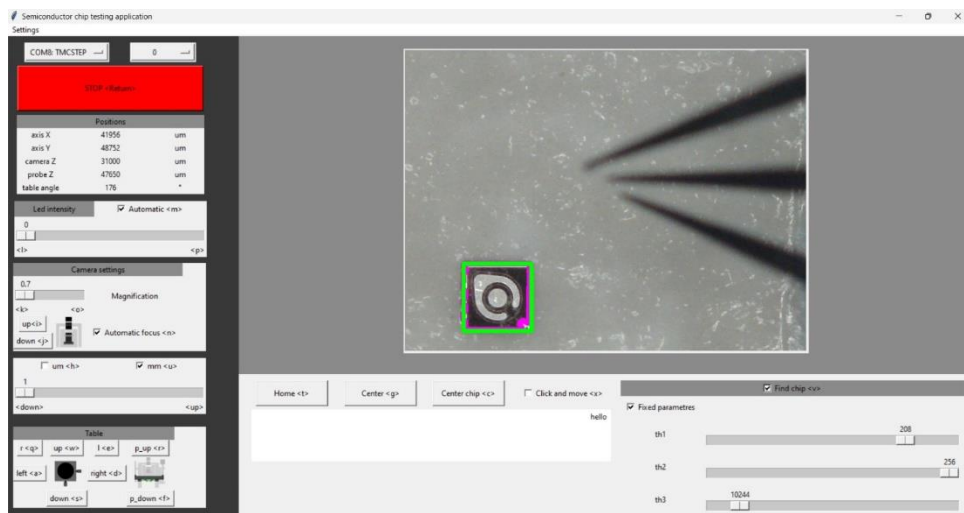
Na tranzistore KD610 bol kontrolovaný PN prechod medzi bázou a emitorom za pomoci voltmetra. Osadzovanie sond na kartu pre tento čip bolo najjednoduchšie v porovnaní s ostatnými testovanými čipmi, vďaka jeho veľkosti kontaktov. Okrem vytvorenia kontaktu na čip bola otestovaná automatická detekcia čipu, vid'. obrázok 7.3, ktorá dostatočne vycentrovala čip, vďaka jeho veľkým plôškam. Úroveň napätia na PN prechod medzi bázou a emitorom sa podarilo zmerať na 0,673 V.



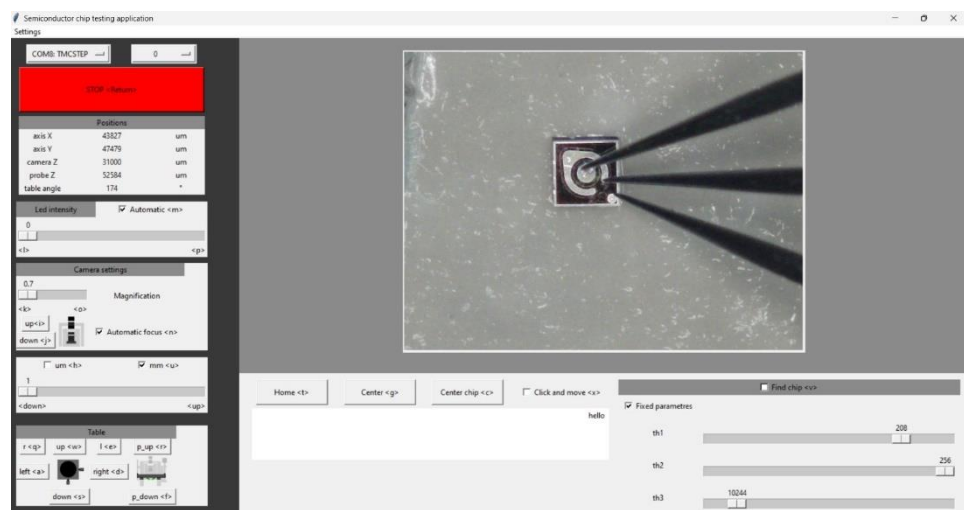
Obrázok 7.3 Automatická detekcia čipu KD610

## 7.4 KF506

KF506 je rozmermi 3-krát menší ako KD610, čo komplikovalo osadzovanie sond na kartu. Polohu prípravku na osadzovanie bolo potrebné niekoľkokrát za sebou upravovať, z dôvodu, že medzery v prípravku pre takýto malý čip nie sú dostatočne malé. Z tohto dôvodu sa predĺžila aj doba nastavovania. Automatická detekcia bola schopná nájsť čip, vid'. obrázok 7.4, bolo však nutné upraviť parametre hľadania. Po vycentrovaní nájdeneho čipu a po upravení polohy hlavy pre kartu so sondami sa hroty sond dotkli kontaktov čipu, vid'. obrázok 7.5, ale PN prechod medzi emitorom a bázou sa nepodarilo zmerať. Celé meranie sa opakovalo na novom čipe, aby sa predišlo chybe, v prípade že by bol prvý testovaný čip poškodený.



Obrázok 7.4 Automatická detekcia čipu KF510



Obrázok 7.5 Detail kontaktov na čipe KF510

## 8. ZÁVER

Cieľom tejto diplomovej práce bolo zhrnúť potrebné teoretické poznatky do rešerše a následne tieto znalosti využiť v praktickej časti, a síce pri analýze a návrhu potrebných zmien na pôvodnom poloautomatickom polohovacom prístroji, a taktiež pri návrhu softvéru, ktorým má byť prístroj ovládaný používateľom. Súčasťou praktickej časti práce bolo taktiež otestovanie funkčnosti prístroja s použitím čipu vyrezaného z kremíkovej dosky.

Po porovnaní viacerých metód a prístrojov určených na testovanie čipov v rámci rešerše teoretickej časti sa nazbierané informácie následne pretavili do praktickej časti, v ktorej bola najprv vykonaná analýza nedostatkov pôvodného prístroja. Jej výsledkom bol zoznam nedostatkov a ďalších zmien vyplývajúcich zo zadania práce, ktoré bolo v rámci praktickej časti vyriešiť. Po navrhnutí riešení všetkých nedostatkov nasledovala ich implementácia na prístroj samotný, ktorá prebehla úspešne, čím sa finalizovali úpravy na prístroji mechanického charakteru. K úplnej finalizácii projektu potom už chýbali len dva kroky. Prvým z nich bolo vytvorenie softvéru, ktorý by bol pre užívateľa jednoduchý na ovládanie, a ktorý by zároveň poskytoval funkciu automatickej detekcie čipu vloženého do prístroja.

Poslednou časťou práce bolo finálne otestovanie funkčnosti prístroja spolu so softvérom, ktoré bolo realizované za použitia dvoch čipov rôznych veľkostí. Výsledkami testovania boli potvrdené základné parametre prístroja, čím sa zároveň splnili všetky ciele definované v zadaní diplomovej práce. Finálna verzia prístroja spĺňa všetky požiadavky potrebné k tomu, aby mohol byť využívaný k svojmu účelu. Z finálneho testovania prístroja je taktiež možné navrhnuť ďalšie vylepšenia alebo zmeny, ktoré by mohli byť v budúcnosti aplikované na prístroj pre ešte lepšie zefektívnenie práce s ním, ako napríklad upravenie prípravku na osadzovanie sond na kartu alebo doplniť ďalšiu kameru, ktorá by znížila pravdepodobnosť poškodenia ihličky alebo čipu tým, že by sledovala vzdialenosť medzi nimi.

## LITERATÚRA

- [1] ADDISON. ABOUT WAFERS. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.addisonengineering.com/about-wafers.html?fbclid=IwAR3329r6n-6XhWySr9SI1ChyiUHJleO0ZQj1cQ10HXrQf59MTPvQUhsg310>. [cit. 2023-9-10].
- [2] FORMFACTOR. Cascade MPS150. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.formfactor.com/product/probe-systems/150-mm-systems/mps150/>. [cit. 2023-9-10].
- [3] MPICORPORATION. MPI TS150. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.mpi-corporation.com/wp-content/uploads/ASTPDF/MPI-TS150-Manual-Probe-System-Data-Sheet.pdf> [cit. 2023-9-12].
- [4] MPICORPORATION. MPI TS2000 Series. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.mpi-corporation.com/wp-content/uploads/ASTPDF/MPI-TS2000-Series-Automated-Probe-System-Data-Sheet.pdf>. [cit. 2023-9-12].
- [5] MPICORPORATION. MPI TS3500. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.mpi-corporation.com/wp-content/uploads/ASTPDF/MPI-TS3500-Automated-Probe-System-Data-Sheet.pdf>. [cit. 2023-9-13].
- [6] MPIAST. Device Characterization for Modeling and Process Development. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.mpi-corporation.com/ast/applications/device-characterization/>. [cit. 2023-9-13].
- [7] MPIAST. High Power Device Tests. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.mpi-corporation.com/ast/applications/high-power/>. [cit. 2023-9-20].
- [8] MPIAST. RF and mmW Applications. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.mpi-corporation.com/ast/applications/rf-and-mmw/>. [cit. 2023-9-20].
- [9] MPIAST. Design Validation and IC Engineering. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.mpi-corporation.com/ast/applications/design-validation/>. [cit. 2023-9-20].
- [10] MPIAST. Failure Analysis (FA). Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.mpi-corporation.com/ast/applications/failure-analysis/>. [cit. 2023-9-23].
- [11] MPIAST. Wafer Level Reliability (WLR). Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.mpi-corporation.com/ast/applications/wlr/>. [cit. 2023-9-23].
- [12] MPIAST. Silicon Photonics On-Wafer Test. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.mpi-corporation.com/ast/applications/silicon-photonics-on-wafer-test/>. [cit. 2023-9-23].
- [13] MPIAST. Wafer Level MEMS Test. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.mpi-corporation.com/ast/applications/wafer-level-mems-test/>. [cit. 2023-10-2].
- [14] MPICORPORATION. MPI MicroPositioner. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.mpi-corporation.com/wp-content/uploads/ASTPDF/MPI-MicroPositioner-Selection-Guide.pdf>. [cit. 2023-10-5].

- [15] FORMFACTOR. PH Series. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.formfactor.com/product/probe-cards/dram/ph-series/>. [cit. 2023-10-5].
- [16] FORMFACTOR. Genus. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.formfactor.com/product/probe-cards/flash/genus/>. [cit. 2023-10-5].
- [17] FORMFACTOR. Advanced Wafer Probe Cards. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.formfactor.com/download/advanced-wafer-probe-cards-brochure/?wpdmdl=18681&refresh=658db30edab8a1703785230>. [cit. 2023-10-5].
- [18] FORMFACTOR. Pyramid RF. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.formfactor.com/product/probe-cards/rf-front-end/pyramid-rf/>. [cit. 2023-10-18].
- [19] FORMFACTOR. Hikari. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.formfactor.com/product/probe-cards/optical/hikari/>. [cit. 2023-10-18].
- [20] FORMFACTOR. Pyramid Parametric. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.formfactor.com/product/probe-cards/parametric/pyramid-parametric/>. [cit. 2023-10-18].
- [21] FORMFACTOR. Pyramid-MW. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.formfactor.com/product/probe-cards/rf-mmw-radar/pyramid-mw/>. [cit. 2023-10-18].
- [22] KOTIAN, Tomáš. Návrh poloautomatického polohovacího systému pro měření polovodičových čipů [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134675>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Alexandr Otáhal.
- [23] JLCPCB. PCB Manufacturing & Assembly Capabilities. Online. ©2023. Dostupné z: <https://jlcpcb.com/capabilities/pcb-capabilities>. [cit. 2023-11-2].
- [24] MULTI-CB. Conductor / Ampacity. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.multi-circuit-boards.eu/en/pcb-design-aid/surface/conductor-ampacity.html>. [cit. 2023-11-2].
- [25] TABARKA, Roman. Návrh pracoviště pro robotické bodové svařování. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149316>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jakub Bražina.
- [26] tme. WS2811. Online. ©2024 Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/26d574b43ad9ddaffa4d5bcd140ec145/WS2811.pdf>
- [27] VISION DOCTOR. OPTICS. Online. ©2023. Dostupné z: <https://www.vision-doctor.com/en/optical-basics/lens-mount-and-flange-back.html>. [cit. 2023-12-15].
- [28] docs.python.org. General Python FAQ. Online. ©2024 Dostupné z: <https://docs.python.org/3/faq/general.html#what-is-python>. [cit. 2024-03-15].

- [29] pythonhosted . pySerial. Online. ©2024. Dostupné z:  
<https://pythonhosted.org/pyserial/pyserial.html#overview>. [cit. 2024-03-15].
- [30] numpy. NumPy User Guide. Online. ©2024. Dostupné z:  
<https://numpy.org/doc/1.17/numpy-user.pdf>. [cit. 2024-03-22].
- [31] techtarget. batch file. Dostupné z:  
<https://www.techtarget.com/searchwindowsserver/definition/batch-file>. [cit. 2024-03-23].
- [32] TMC6110 TMCL™ Firmware Manual. In: trinamic [online]. 2013 [cit. 2020-10-17]. Dostupné z:  
[https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/Modules\\_Documents/TMC6110\\_TMCL-firmware\\_manual.pdf](https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/Modules_Documents/TMC6110_TMCL-firmware_manual.pdf)
- [33] LORENC, Ján. KEYBOARD AND KEYS IMAGE RECOGNITION. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=252215](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=252215).  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, Ústav informačních systémů. Vedoucí práce Jan Pluskal.
- [34] ONDRIGA, Patrik. AUTOMATICKÝ OŘEZ SNÍMKŮ V PROSTŘEDÍ ANDROID. Dostupné z:  
[https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=245533](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=245533).  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, Ústav informačních systémů. Vedoucí práce Dušan Kolář.

# ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

THT	Through-hole technology
SMD	Surface mount technology
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
DRAM	Dynamická paměť s náhodným přístupem
IOT	Internet vecí
RF	Radiové frekvencie
LED	Svetlo emitujúca dioda
FR4	Flame retardant
IGBT	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
MOSFET	Tranzistor s polovodičovým polem s oxidem kovu
SLA	Stereolitografie
FDM	Modelování tavené depozice
3D	Trojrozmerný priestor
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
PLA	Polylaktidové vlákno
USB	Universal Serial Bus
I/O	Vstupy / výstupy

Symboly:

$M_{stat}$	Statický krútiaci moment	(Nm)
$F_{MAX}$	Sila pôsobiaca na os	(N)
$P_h$	Stúpanie guľôčkovej skrutky	(m/ot)
$\eta_c$	Účinnosť prenosu pohybu	(-)
$d_{min}$	Minimálna veľkosť hrany čipu	(m)
$p_{pixel}$	počet pixelov hrany senozora	(-)
$d_{pixel}$	Veľkosť hrany pixela	(m)
$x$	Zväčšenie objektívu	(-)
$I_{max}$	Maximálny prúd	(A)
$I_{LED}$	Prúd LED	(A)
$I_{MCU}$	Prúd mikrokontroleru	(A)
$I_L$	Prúd elektromagnetom	(A)
$U$	Napätia	(V)
$R_L$	Odpor cievky	( $\Omega$ )
$P_{Q1}$	Stratový výkon na tranzistore Q1	(W)

$R_{DSon}$	Odpor v zopnutom stave	( $\Omega$ )
$I_{motor}$	Prúd krokového motora	(A)
$I_{28BYJ}$	Prúd motorom 28BYJ	(A)
$I_{TMCM}$	Prúd TMCM-6110	(A)
$I_{ostatné}$	Prúd ostatných častí	(A)
$I_{elektromagnet}$	Prúd elektromagnetom	(A)
$I_{5V\ menič}$	Prúd meničom s výstupom 5V	(A)

# **ZOZNAM PRÍLOH**

Príloha A – Zdrojový kód a 3D model prístroja