



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ PARAMETRŮ VELKOPLOŠNÝCH KAPACITNÍCH SENZORŮ V DOTYKOVÝCH OBRAZOVKÁCH

MEASURING PARAMETERS OF LARGE-AREA CAPACITIVE SENSORS IN TOUCH SCREENS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Baďo

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Martin Baďo

ID: 233254

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Měření parametrů velkoplošných kapacitních senzorů v dotykových obrazovkách

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Moderní elektronická zařízení jsou velmi často ovládána dotykem a pohybem prstů na jeho displeji. Cílem práce je porovnat vlastnosti různých designů kapacitních velkoplošných senzorů, používaných pro tyto účely. Zadaní práce lze shrnout do následujících bodů:

- 1) Vypracujte přehled základních používaných principů velkoplošných kapacitních senzorů a používaných vzorů a materiálů, diskutujte výhody a nevýhody jednotlivých řešení
- 2) Navrhněte systém umožňující automatizaci měření vybraných parametrů dotykových displejů
- 3) Systém realizujte a ověřte jeho vlastnosti
- 4) Proměřte parametry dostupných vzorků senzorů
 - a. Navrhněte a ověřte vhodnou metodiku měření parametrů
 - b. Získaná data z experimentu zpracujte a dle vhodně zvolené metriky porovnejte
- 5) Diskutujte dosažené výsledky

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Zagkanas, V., Papazoglu, G.: Complete guide to capacitive touch sensors. Dostupné z <https://fieldscale.com/learn-capacitive-sensing/>

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 22.5.2023

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Táto práca sa zaoberá vlastnosťami a technológiami použitými pri kapacitných senzoch. Pre účel automatického testovania senzorov bolo vybrané a zhotovené zariadenie LowRider CNC V3. Testované senzory sú z materiálov: strieborné nanovlákná a medené elektródy. Zariadenie pri automatických testoch spôsobovalo určitú mieru elektrostatického alebo elektromagnetického rušenia na senzoch. Senzor z medených elektród výraznejšie reagoval na dotyk, ale aj na rušenie oproti senzoru zo strieborných nanovláknien. Výsledky práce bližšie popisujú reakcie daných senzorov na dotyk a tiež výhody alebo nevýhody automatického testovania.

Kľúčové slová

projektovaná kapacitancia, vzory elektród, kapacitný senzor, dotykový panel, cínom dopovaný oxid inditý, strieborné nanovlákná, medené elektródy, kovová sieťka, automatické testovanie, počítačové číselné riadenie

Abstract

This thesis studies characteristics and technologies used in capacitive sensors. For the purpose of automatic testing of sensors was selected and assembled device LowRider CNC V3. Tested sensors are from materials: silver nanowires and copper electrodes. Device during automatic tests was causing certain level of electromagnetic or electrostatic interference on sensors. Copper electrode sensor responded more significantly to touch but also interference, in comparison with silver nanowires sensor. Results of thesis more closely describe responses by sensors to touch and advantages or disadvantages of automatic testing.

Keywords

projected capacitive touch, electrode patterns, capacitive sensor, touch panel, indium tin oxide, silver nanowires, copper electrodes, metal mesh, automatic testing, computer numeric control

Bibliografická citace

BAĎO, Martin. Měření parametrů velkoplošných kapacitních senzorů v dotykových obrazovkách[online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151864>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2023, 58 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Martin Baďo
VUT ID studenta:	233254
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2022/2023
Téma závěrečné práce:	Měření parametrů velkoplošných kapacitních senzorů v dotykových obrazovkách

Prohlašuji, že svou semestrální práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne: 18. května 2023

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu mojej bakalárskej práce doc. Ing. Petrovi Benešovi, Ph.D. za odbornú a trpezlivú pomoc. Ďalej by som chcel poďakovať kolegom z firmy FORTES interactive, s.r.o., predovšetkým Ing. Liborovi Vošickému a Bc. Michalovi Genserekovi za dobrú komunikáciu a ochotu pri tvorbe zadania a za asistenciu s experimentálnou časťou tejto práce. Vďaka tiež patrí Ing. Tomášovi Goldmannovi z FIT VUT za veľkú pomoc s 3D tlačením.

V Brne dňa: 18. mája 2023

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	8
ZOZNAM TABULIEK	10
ÚVOD	11
1. TEORETICKÝ ÚVOD	12
1.1 ZÁKLADNÉ FYZIKÁLNE ZÁKONITOSTI KAPACITORU	12
1.2 CHARAKTERISTIKY MATERIÁLOV POUŽITÝCH PRI KAPACITNÝCH SENZOROCH URČENÝCH PRE DOTYK	13
1.3 ŠTRUKTÚRY KAPACITNÝCH DOTYKOVÝCH SENZOROV	14
1.3.1 <i>Self-Capacitance štruktúra</i>	14
1.3.2 <i>Mutual-capacitance štruktúra</i>	15
1.4 CHARAKTERISTIKY POUŽITÝCH MATERIÁLOV V SENZOROCH	17
1.4.1 <i>Všeobecný spôsob zápisu odporu pri materiáloch dotykových senzorov</i>	17
1.4.2 <i>Typy materiálov a ich vlastnosti</i>	18
1.5 PARAMETRE VÝBERU DOTYKOVÉHO SENZORU	21
1.5.1 <i>Výber vzorov senzorov a ich základné charakteristiky</i>	22
1.6 VÝBER PARAMETROV K TESTOVANIU	25
2. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	27
2.1 VÝBER ZARIADENIA NA TESTOVANIE	27
2.1.1 <i>Rozhodujúce parametre pre výber zariadenia</i>	27
2.1.2 <i>Úvaha k designu zariadenia</i>	27
2.1.3 <i>Analýza a výber z možných designov testovacieho zariadenia</i>	28
2.2 KONŠTRUKCIA LOWRIDERA CNC V3	34
2.2.1 <i>Tlačenie a vyrezávanie mechanických častí</i>	34
2.2.2 <i>Montáž</i>	35
2.2.3 <i>Chybné elektrické zapojenie</i>	38
2.2.4 <i>Testovanie presnosti</i>	39
2.3 MĚRANIE KAPACITNÝCH DOTYKOVÝCH SENZOROV	41
2.3.1 <i>Pracovné nástroje použité na meranie a analýzu</i>	41
2.3.2 <i>Prvotné testovanie senzorov s LowRiderom V3</i>	41
2.3.3 <i>Potlačenie šumu</i>	43
2.3.4 <i>Merania</i>	46
ZÁVER	52
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	54
ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV	58

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1: Kapacitor s dvoma paralelnými plátni s ukázkou elektrostatického poľa s odlišným potenciálom [4]	12
Obrázok 2: Self-Capacitance štruktúra v kľudovom stave: bez dotyku a s prichádzajúcim dotykom [5] ..	14
Obrázok 3: Self-Capacitance štruktúra, typy konštrukcie a ukážka ghost-touch [6]	15
Obrázok 4: Mutual-capacitance bez dotyku a s dotykom [10].....	16
Obrázok 5: Prirovnanie odporu na jednom štvorci, s jedným rezistorom [5] [11].....	17
Obrázok 6: Prirovnanie dvoch štvorcov spojených vedľa seba na obdĺžnik, so spojením dvoch rezistorov sériovo [5] [11].....	17
Obrázok 7: Prirovnanie dvoch štvorcov spojených pod seba na obdĺžnik, so spojením dvoch rezistorov paralelne [5] [11].....	17
Obrázok 8: Ukážka použitia ITO vrstiev v dotykovom displeji [15].....	18
Obrázok 9: Strieborné nanovlákná [14].....	19
Obrázok 10: Moiré vzor [16]	19
Obrázok 11: Ukážka moiré vzoru na displeji [17]	19
Obrázok 12: Uhlíkové nanopúčiky (Carbon nanobuds) [21]	20
Obrázok 13: Štvorcové kapacity s umiestnením vedľa seba [11].....	22
Obrázok 14: Diamantový vzor [11]	23
Obrázok 15: Manhattan s priečnikmi [11]	23
Obrázok 16 Interleaved grid vzor [23].....	24
Obrázok 17: Interleaved grid vzor na panely [23]	24
Obrázok 18: Angled Cross vzor [23]	24
Obrázok 19: Angled Cross vzor základný element [23]	24
Obrázok 20: Iné typy vzorov [33].....	25
Obrázok 21: Robotic Touch Panel Tester – TakTouch 1000 [25]	28
Obrázok 22: PrintNC V3.0 [26].....	29
Obrázok 23: CNC v 3.3 [27].....	30
Obrázok 24: LowRider CNC V3 [28].....	31
Obrázok 25: LowRider CNC V3 - pohľad z boku [28]	32
Obrázok 26: Tlačenie LowRidera CNC V3	34
Obrázok 27: Laserové vyrezávanie do preglejky	35
Obrázok 28: LowRiderV3 YZ pláty	35
Obrázok 29: Postupné mechanické skladanie LowRideraV3	36
Obrázok 30: Vyrezaná a nastriekaná "výplň" pre os X.....	36
Obrázok 31: Čiastočná mechanická kompletizácia LowRideraV3	37
Obrázok 32: Kompletné zostavenie LowRideraV3 bez elektro časti.....	37
Obrázok 33: Finálna podoba LowRiderV3 s elektrickým zapojením	38
Obrázok 34: Kapacitor spôsobujúci skrat so.....	38
Obrázok 35: Zničený driver	38
Obrázok 36: Automatický test pre LowRiderV3 - nakreslenie korunky.....	39
Obrázok 37: LowRiderV3 "square test"	39
Obrázok 38: Test presnosti "dotykov" LowRideruV3	40
Obrázok 39: LowRiderV3 osadený na doske s pripevneným stylusom a dotykovým panelom so senzorom zo strieborných nanovláknien.....	41
Obrázok 40: Smerodajná odchýlka - bočný pohľad, senzor zo strieborných nanovláknien bez nasadeného LowRideraV3	42

Obrázok 41: Smerodajná odchýlka – bočný pohľad, senzor zo strieborných nanovláknien s nasadeným LowRideromV3 a vykonaným jedným dotykom	42
Obrázok 42: Ukážka aplikácie feritových krúžkov na vývody káblov	43
Obrázok 43: Navlečenie pocínovaného medeného tienenia na káble	44
Obrázok 44: Smerodajná odchýlka - bočný pohľad, po aplikovaní tienenia	44
Obrázok 45: Smerodajná odchýlka - bočný pohľad, senzor bez rušenia LowRideromV3, nové meranie ..	45
Obrázok 46: Smerodajná odchýlka - bočný pohľad, dotyk stylusom pri aktívnej osi Z, LowRideruV3	45
Obrázok 47: Ukážka veľkosti senzora	46
Obrázok 48: Použité "nástroje" na dotyk na senzoroach	46
Obrázok 49: Manuálne meranie, senzor medené elektródy	47
Obrázok 50: Manuálne meranie, senzor zo strieborných nanovláknien	47
Obrázok 51: Ilustratívny obrázok ukazujúci vplyv rušenia na kvalitu získaných dát	48
Obrázok 52: Medené elektródy, meranie LowRideromV3, 15 dotykov	50
Obrázok 53: Legenda ku grafom na určenie umiestnenia krivky v matici uzlov	50
Obrázok 54: Strieborné nanovlákná, meranie LowRideromV3, 15 dotykov	50
Obrázok 55: Senzor zo strieborných nanovláknien, priemer hodnôt dotyku stylusom pomocou zariadenia LowRiderV3.....	51
Obrázok 56: Senzor medených elektród, priemer hodnôt dotyku stylusom pomocou zariadenia LowRiderV3.....	51

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1: Hodnoty odporu a vodivosti najpoužívanějších vodičov v senzoroach [5].....	13
Tabuľka 2: Hodnoty odporu a vodivosti najpoužívanějších dielektrík v senzoroach [5] [34] [35]	13
Tabuľka 3: Hlavné rozdiely medzi mutual-capacitance a vzájomne-kapacitnou štruktúrou [5][6][7][11].	16

ÚVOD

Od roku 2007 [1], kedy bol Stevom Jobsom z firmy Apple predstavený prvý iPhone, svet elektroniky zažil zlom. Ľudia po celom svete začali stále viac preferovať elektroniku s dotykovou obrazovkou, namiesto fyzických tlačidiel. Ako najväčší dôvod môže byť považovaný, či už pri spotrebnej elektronike alebo systémoch v priemysle, že fixné fyzické tlačidlá nechávajú obmedzený priestor pre displej. Aj keď užívateľ fyzické tlačidlá nepotrebuje, sú tam. Pri dotykových obrazovkách celá užívateľská plocha môže byť prispôsobená takým spôsobom, aby z nej mal užívateľ čo najväčší prospech.

Smartphon iPhone prvej generácie použil technológiu PCAP [2] (projected capacitive technology), na rozdiel od dotykových displejov založených na odporovej technológii, ktorá bola použitá v značnej miere dovtedy. Popularita týchto telefónov viedla zákazníkov a firmy k adaptovaniu PCAP technológie a v dnešnej dobe prevažná väčšina je PCAP. Len iPhonov sa predalo za rok 2021 v hodnote 191.973 miliardy dolárov [3]. Všeobecne sa predpokladá, že dominancia tejto technológie bude pokračovať, až kým sa nevynájde niečo, čo by ju efektívne nahradilo. V sci-fi filmoch je možno vidieť holografickú technológiu (napr. Iron Man, Blade Runner 2049), len budúcnosť ukáže, či to bude nový trend.

Cieľom tejto práce je porovnať vlastnosti a charakteristiky rôznych senzorov za pomoci automatického zariadenia. V teoretickom úvode tejto práce je vypracovaný prehľad základných princípov a vlastností používaných senzorov s porovnaním medzi nimi. V experimentálnej časti je navrhnuté a vybrané zariadenie, ktoré bude na automatické testy použité. Následne je tam opísané konštruovanie zariadenia s overením jeho vlastností. Merania sa nezaobišli bez prekážok. Tie budú detailne opísané v podkapitole: 2.3 Merania Kapacitných Dotykových Sensorov.

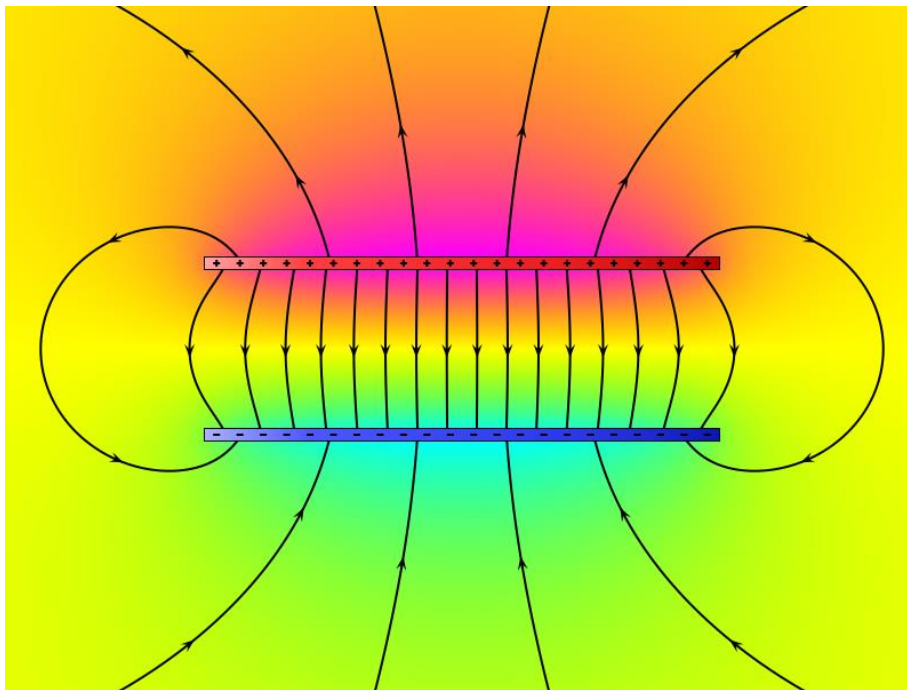
1. TEORETICKÝ ÚVOD

V tejto kapitole sú zhrnuté základné princípy fungovania kapacitných senzorov na veľkoplošných dotykových displejoch. Funkciou týchto senzorov je reagovať na dotyk užívateľa rýchlo a efektívne. Čo znamená, že miesto na obrazovke, na ktoré užívateľ pôsobí, by malo reagovať odozvou. Táto odozva je na základe určitých fyzikálnych javov, ktoré sú nižšie opísané.

1.1 Základné fyzikálne zákonitosti kapacitoru

Kapacitor tvoria vždy dva vodiče a izolant medzi nimi a v ich okolí, ktorý sa volá dielektrikum. Capacitor môže byť náhodný, kde sú napríklad paralelne dva vodiče vedľa seba a dielektrikum tvorí vzduch. Nechcená kapacitancia sa volá “parazitná“, lebo spôsobuje zhoršenie vlastností súčiastok oproti ich ideálnym. Okrem blízko položených vodičov sa to môže diať u napríklad tranzistorov, induktorov, diód atď. Medzi kapacitnými plátmi a v ich okolí vzniká elektrostatické pole. Vizualná reprezentácia na obrázku č.1 ukazuje, že elektrostatické siločiarly smerujú od plátu s pozitívnym nábojom, k náboju s negatívnym nábojom (zemniaci plát).

Pole na tomto obrázku bolo presne spočítané pre rovnakú distribúciu náboja, ale potenciál na každom pláte nie je presne rovnaký. Najväčší pozitívny potenciál zobrazuje fialová, žltá je neutrálny a modrá je negatívny potenciál. [4]



Obrázok 1: Capacitor s dvoma paralelnými plátmi s ukázkou elektrostatického poľa s odlišným potenciálom [4]

1.2 Charakteristiky materiálov použitých pri kapacitných senzoroch určených pre dotyk

Základný vzťah pre vodivosť:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (1)$$

Kde σ je vodivosť, v jednotkách Siemens na meter ($\frac{S}{m}$) a ρ je rezistivita v Ohm-metroch (Ohm · m).

Tabuľka 1: Hodnoty odporu a vodivosti najpoužívanejších vodičov v senzoroch [5]

Materiál	ρ [Ohm · m]	σ [S/m]
Meď (Cu)	$1.68 \cdot 10^{-8}$	$5.95 \cdot 10^7$
Žihaná meď	$1.72 \cdot 10^{-8}$	$5.81 \cdot 10^8$
Striebro (Ag)	$1.59 \cdot 10^{-8}$	$6.29 \cdot 10^7$
Indium Tin Oxide(ITO)	$7.20 \cdot 10^{-6}$	$1.39 \cdot 10^5$

Tabuľka 2: Hodnoty odporu a vodivosti najpoužívanejších dielektrík v senzoroch [5] [34] [35]

Materiál	ρ [Ohm · m]	σ [S/m]	ϵ [C ² /(N·m ²)]
Vzduch	$1.30 \cdot 10^{16}$ do $3.30 \cdot 10^{16}$	$3.00 \cdot 10^{-15}$ do $7.70 \cdot 10^{-15}$	$8.86 \cdot 10^{-12}$
Sklo	10^{11} do 10^{15}	10^{-15} do 10^{-11}	28 $\cdot 10^{-12}$ do $110.3 \cdot 10^{-12}$
Polyethylene (PE)	10^{16}	10^{-16}	$25 \cdot 10^{-12}$
Polyethylén terephtalát (PET)	10^{21}	10^{-21}	27 $\cdot 10^{-12}$ do $35.4 \cdot 10^{-12}$
Polystyrén (PS)	10^{18} do 10^{19}	10^{-19} do 10^{-18}	21 $\cdot 10^{-12}$ do $24 \cdot 10^{-12}$
Polykarbonát (PC)	10^{16} do 10^{18}	10^{-18} do 10^{-16}	27 $\cdot 10^{-12}$ do $31 \cdot 10^{-12}$
Poly methyl methacrylát (PMMA)	10^{19}	10^{-19}	17 $\cdot 10^{-12}$ do $44 \cdot 10^{-12}$

Z tabuliek je zjavné, že pomer najväčšej vodivosti a najnižšej rezistivity dosahujú najdrahšie kovy. Ale práve kvôli cene je populárne ITO, lebo dosahuje dostatočne vysokú vodivosť a rezistivitu, vzhľadom na náklady. V rámci dielektrík dosahuje najväčšiu rezistivitu PET. Najlepšiu permitivitu dosahuje PMMA a sklo, záleží ale na presnom zložení tohto materiálu.

1.3 Štruktúry kapacitných dotykových senzorov

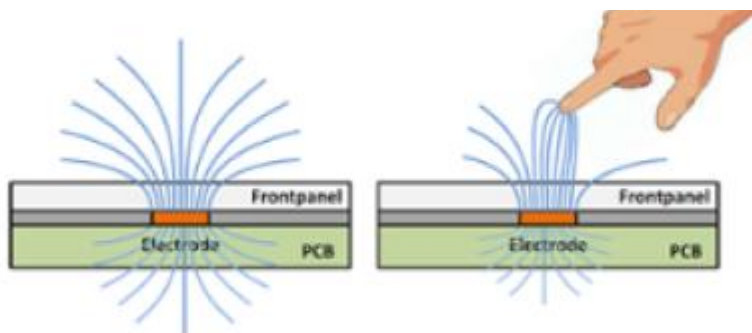
Dotykový panel s kapacitnou technológiou (PCAP) zaznamenáva a vyhodnocuje zmeny v kapacitancii na svojej ploche. Na základe toho vyhodnocuje, kde došlo k dotyku od užívateľa. Ako bolo ukázané v kapitole 1.1, siločiar kapacitoru sa nachádzajú medzi kapacitnými plátmi, ale aj v ich okolí. Tohto javu sa PCAP dotykové senzory snažia plne využiť. Odporové (resistive) dotykové obrazovky, na rozdiel od PCAP, fungujú na báze tlaku prsta na obrazovku. Pri odporových displejoch nezáleží čím je dotyk vykonaný. Aby dotyk, pri PCAP, bol zaznamenaný, užívateľ sa musí dotýkať s minimálnymi prekážkami medzi prstom a displejom. Ak je medzi prstom a displejom nevodivý, izolačný materiál, napr. bavlnená rukavica, čím hrubšia vrstva takéhoto materiálu, tým je väčšia náročnosť pre senzor a kontrolór správne zachytiť dotyk a určiť jeho pozíciu.

1.3.1 Self-Capacitance štruktúra

Tak ako bolo spomínané, štandardný kapacitor má dve plochy a dielektrikum medzi nimi. Self-Capacitance štruktúra ale používa akoby jeden plát kapacitoru. Kapacitor s dvoma plátmi si drží väčšinu elektrostatických siločiar medzi plátmi. Ale jeden plát kapacitoru v tejto štruktúre “hľadá“ na čo sa naviaže (napr. voda pri meraní výšky hladiny v nádrži).

Táto štruktúra sa používa prevažne na kapacitné dotykové tlačidlá, slajdre, kolieska atď. Sú jednoduché na prevedenie, presné a s dobrým snímaním dotyku. Majú odozvu 1/0 tzn. dotyk/bez dotyku. [5]

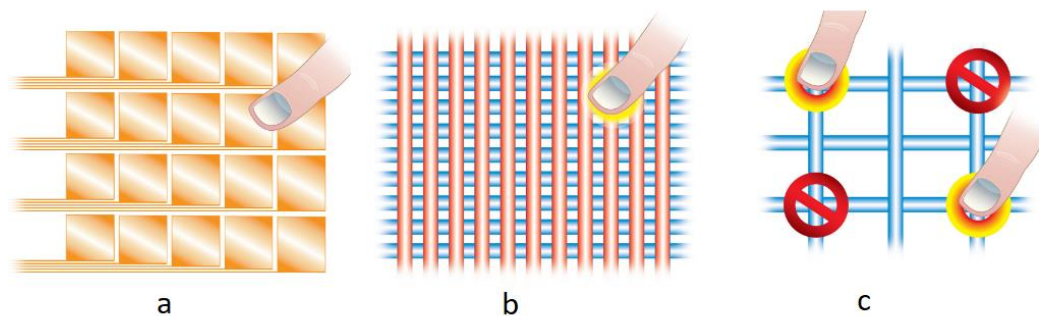
Obrázok 2: Self-Capacitance štruktúra v kludovom stave: bez dotyku a s prichádzajúcim dotykom [5]



Pri self-capacitance štruktúre je meraná kapacitancia medzi elektródou a zemou. Sú dva typy zoskupenia, ktoré sa väčšinou používajú: multi-bloková konštrukcia (obr. 3, a) a konštrukcia riadkov a stĺpcov (obr. 3, b).

V multi-blokovej konštrukcii (obr. 3, a), každý blok je individuálne adresovaný a prepojený s kontrolórom. To umožňuje viac ako jeden dotyk na obrazovke súčasne, ale vzhľadom na veľký počet prepojení, zriedka sa používa nad viac ako 3,5 palcové displeje [6].

Pri konštrukcii stĺpcov a riadkov (obr. 3, b), každý riadok a stĺpec je individuálne adresovaný kontrolórom. Nie je možné premeriavať kapacitné hodnoty pri každom priesečníku riadka so stĺpcom, preto táto konštrukcia je limitovaná na jeden dotyk. Pri viac ako jednom dotyku vzniká tzv. falošný dotyk (obr. 3, c), kedy kontrolór nevie identifikovať priesečník, pri ktorom došlo k dotyku. To môže viesť k priradeniu nesprávnych koordinácií dotyku oproti správnym. Vykonanie zoomu pomocou dvoch prstov na displeji ale môže byť podporované. [6] [7]

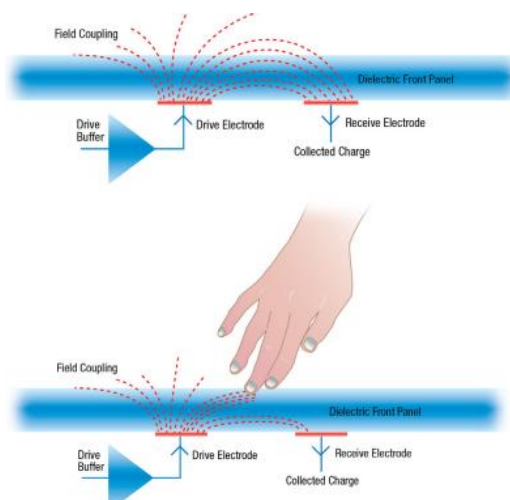


Obrázok 3: Self-Capacitance štruktúra, typy konštrukcie a ukážka ghost-touch [6]

1.3.2 Mutual-capacitance štruktúra

Táto štruktúra taktiež meria zmenu kapacity. Na rozdiel od self-capacitance štruktúry, ktorá obsahovala jeden plát kapacitoru a sledovala zmenu kapacitancie vzhľadom na "zem", mutual-capacitance štruktúra obsahuje obidva pláty kapacitoru, čo si vyžaduje dva druhy elektród. Jeden druh vysielajú (Transmitters → Tx) a druhý prijíma (Receivers → Rx). Kontrolór sleduje zmenu kapacity medzi každým párom Tx-Rx. Mutual-capacitance štruktúra, na rozdiel od self-capacitance, detekuje zmenu kapacitancie na priesečníkoch, namiesto celých riadkov a stĺpcov. Aj to je dôvod, prečo táto štruktúra je oveľa lepšia v zachytení viacerých dotykov naraz (multi-touch) a nevznikajú falošné dotyky tak ako pri self-capacitance štruktúre. Teoreticky sa môže zachytiť neobmedzené množstvo dotykov. [8] [9]

Na obrázku č.4 je znázornené elektrostatické pole medzi dvoma plátmi v mutual-capacitance štruktúre. Pri približovaní ruky sa kapacitancia postupne naviaže na prst, čím sa mení a pokiaľ zmena prekročí nejakú hranicu, kontrolór vyhodnotí, že došlo k dotyku na určitej pozícii.



Obrázok 4: Mutual-capacitance bez dotyku a s dotykom [10]

Tabuľka 3: Hlavné rozdiely medzi mutual-capacitance a vzájomne-kapacitnou štruktúrou [5][6][7][11]

Charakteristika	Self-capacitance	Mutual-capacitance
Elektródový typ	Snímací	Vysielací a prijímací
Počet vrstiev*	1 alebo 2	1 alebo 2
Elektródový design	Riadky stĺpce/multi-bloková	Akýkoľvek dizajn elektród s unikátnymi priesečníkmi
Skenovacia metóda	Každú elektródu	Každý elektródový priesečník
Skenovací čas celého panelu	t	2·t
Typický reakčný čas	6 ms	10 ms
Odmeraná kapacitancia	Kapacitancia elektródy vzhľadom na "zem"	Kapacitancia medzi elektródami
Falošný dotyk	Časté	Skôr nie
Elektromagnetické rušenie	Zlé	Dobré
Vysporiadanie sa s mokrým povrchom	Zlé	Dobré
Multy-touch implementácia (dotykové obrazovky)	Extrémne náročné	Jednoduché
Dizajn senzora	Jednoduchý	Komplexný
Náročnosť prepojenia elektród	Jednoduché	Komplexné

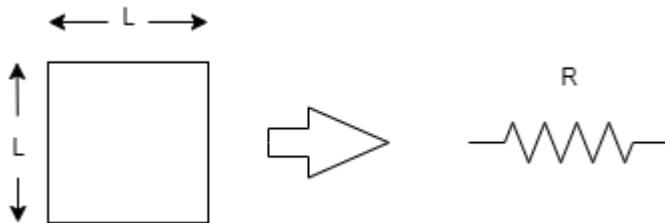
*Vodiče Tx a Rx v 1 vrstve sú na rovnakej úrovni až na prekríženia medzi nimi obsahujúce izolačnú časť. V 2 vrstvách sú Tx a Rx na dvoch rôznych úrovniach.

1.4 Charakteristiky použitých materiálov v senzoch

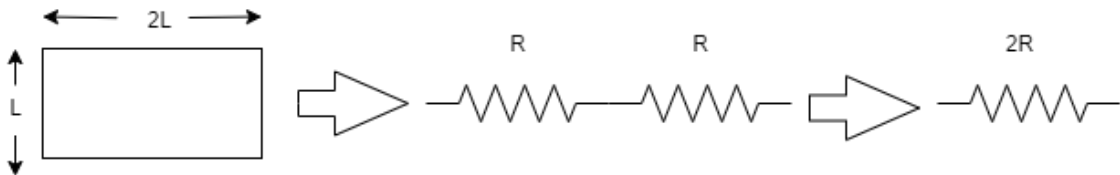
1.4.1 Všeobecný spôsob zápisu odporu pri materiáloch dotkových senzorov

Rezistivita plochy PCAP senzoru sa zaznamenáva v jednotkách Ohm na štvorec (Ω/\square). To znamená, že štvorec vodivého materiálu, z ktorého je senzor, má odpor bez ohľadu na rozmery. Napríklad z materiálu s odporom $50 \Omega/\square$ je vyrezaný štvorec veľkosti $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ alebo $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ a následne zmeraný odpor, v oboch prípadoch bude 50Ω . [5] [11]

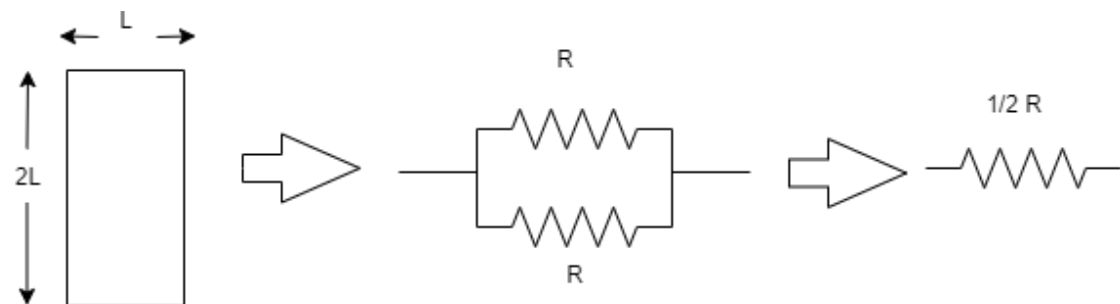
Obrázok 5: Prirovnanie odporu na jednom štvorci, s jedným rezistorom [5] [11]



Obrázok 6: Prirovnanie dvoch štvorcov spojených vedľa seba na obdĺžnik, so spojením dvoch rezistorov sériovo [5] [11]



Obrázok 7: Prirovnanie dvoch štvorcov spojených pod seba na obdĺžnik, so spojením dvoch rezistorov paralelne [5] [11]



V prípade dvoch paralelných párov rezistorov, je výsledný odpor $1/2R + 1/2R$. Pri $2L \times 2L$ je výsledný odpor znovu R . Plocha s rozličnými rozmermi šírky a dĺžky bude musieť byť rozkúskovaná do štvorcov tak, aby bola pokrytá celá plocha. [5] [11]

1.4.2 Typy materiálov a ich vlastnosti

1.4.2.1 Cínom dopovaný oxid inditý (ITO)

Najpopulárnejší transparentný vodič použitý v dotykových obrazovkách. Hrubšia vrstva ITO má nižší odpor, ale horšie optické vlastnosti. Odpor sa pohybuje v rozmedzí $60 \Omega/\square$ až $200 \Omega/\square$. [11]

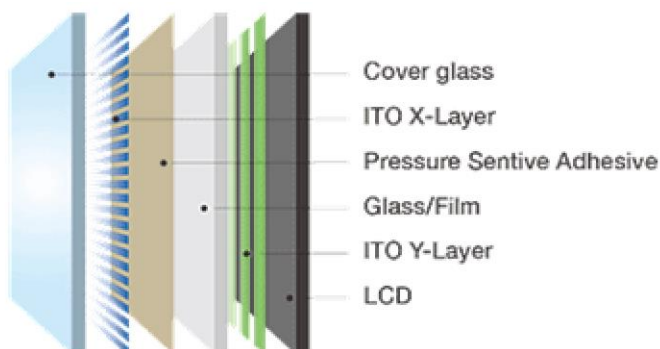
Najväčšie výhody ITO sú:

- Cenová dostupnosť
- Materiálová dostupnosť
- Jednoduchosť vytvárania unikátnych vzorov elektród s rôznymi tvarmi
- Výborné optické vlastnosti

Najväčšia nevýhoda ITO je odpor. Väčšie dotykové plochy, s dlhšími elektródami vyžadujú nižšiu hodnotu odporu na štvorec. Okolo $120 \Omega/\square$ bude fungovať dobre na 7 palcovom displeji, ale nebude fungovať dobre na 15,6 palcovom. Hoci je možné, aby ITO malo odpor $30 \Omega/\square$, ale jeho optické vlastnosti sa výrazne zhoršia. Vo väčšine aplikácií sa ITO používa do maximálnej uhlopriečky 22 palcov. [13] [11] [20]

Ďalšia nevýhoda je flexibilita. ITO je možné naniest' na plastový podklad. Krehkosť ITO spôsobuje, že pri ohnutí za nejakú hranicu alebo pri pravidelnom ohýbaní sa začnú vyskytovať trhliny. Keďže je tiež nevyhnutné použitie vysokých teplôt, pri nanášaní ITO na plastový podklad, presahujúci maximálnu možnú teplotu plasty, ITO nie je vhodný pre flexibilnejšie dotykové displeje. Aj kvôli všeobecnej obave na trhu, že bude nedostatok materiálov na výrobu ITO, vznikli alternatívy, ktoré budú spomenuté nižšie. Medzi ďalšie nevýhody patrí toxicita ITO a narastajúce produkčné náklady. [18]

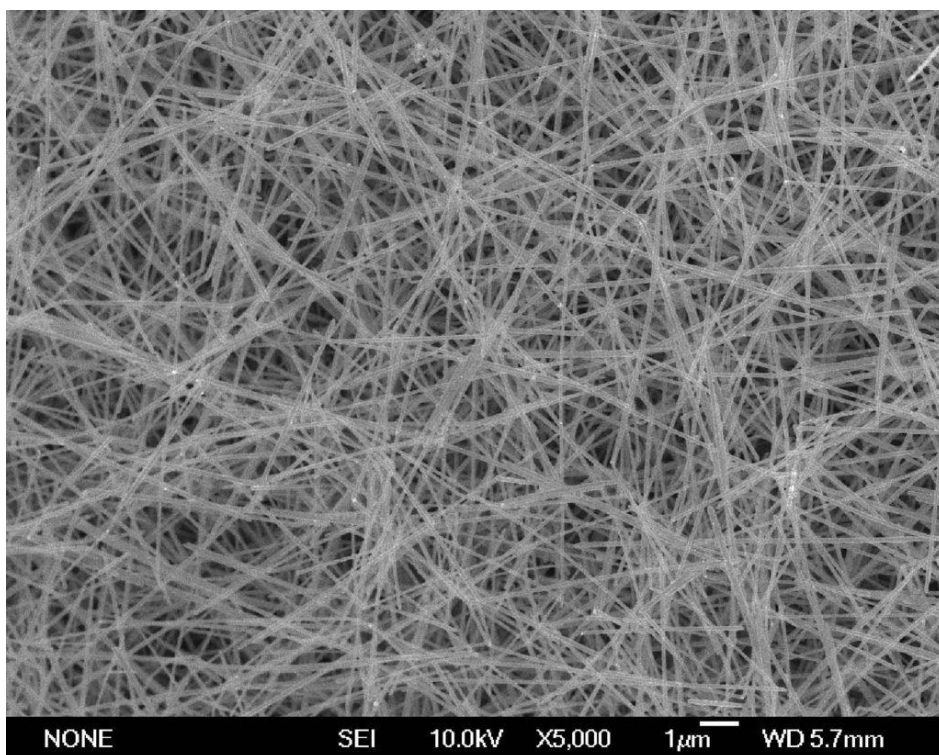
Podľa technického riaditeľa firmy Zytronic, ktorá má rozsiahlu činnosť predaja dotykových panelov v Európe, hlavný dôvod prečo trh odchádza od ITO je inklinácia k integrácii dotyku do samého LCD panelu a tým eliminácia potreby na separátnu dotykovú vrstvu. Výsledkom čoho by bolo užšie, ľahšie zariadenie umožňujúce dotyk. Optické parametre a jas sa tiež zlepšia, zmenšením vzdialenosti a znížením vrstiev medzi LCD a používateľom. Táto integrovaná technológia je ale stále vo vývoji, takže pri menších displejoch prevažuje ITO. [20] [11]



Obrázok 8: Ukážka použitia ITO vrstiev v dotykovom displeji [15]

1.4.2.2 Strieborné nanovlákná (AgNW)

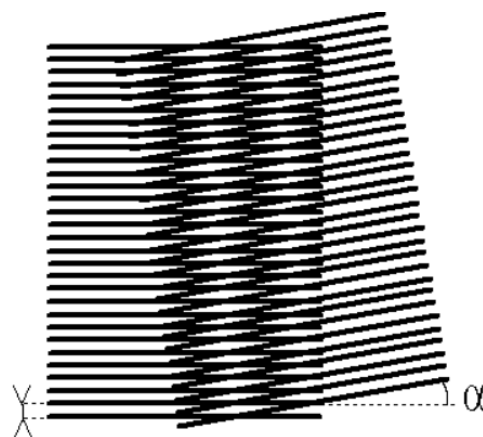
Striebro vo forme nanovlákién a nanočastíc (AgNWs) je vhodná náhrada ITO, ale cena striebra sa pohybuje nad 16 500 CZK/kg [12]. Hoci elektródy majú na senzore určitý vzor, nanovláknový materiál je náhodne rozmiestnený (Obr. 8). Odpor závisí od hustoty rozmiestnenia vlákien tak, že s rastúcou hustotou klesá odpor. Všeobecne sa odpor pohybuje medzi $10 \Omega/\square$ až $100 \Omega/\square$, ale typické hodnoty sú skôr medzi $30 \Omega/\square$ do $50 \Omega/\square$ pre displeje do 65 palcov [20]. Náhodné rozmiestnenie vlákien zabraňuje vytváraniu moiré efektu. [7] [11]



Obrázok 9: Strieborné nanovlákná [14]



Obrázok 11: Ukážka moiré vzoru na displeji [17]



Obrázok 10: Moiré vzor [16]

1.4.2.3 Medené elektródy

Meď je lacnejšia alternatíva k strieborným nanovláknam, ale ľahko oxiduje, takže nižšia cena suroviny je vyrovnaná vyššou cenou spracovania. V porovnaní teda so striebornými nanovláknami, cena je veľmi podobná. Túto nevýhodu sa ale snažia výskumníci odstrániť a je to používaná alternatíva k ITO. [18]

Výhodou tejto technológie je relatívna flexibilita a odpor pod $10 \Omega/\square$. Nízky odpor umožňuje enormné dotykové obrazovky, presahujúce 100 palcov. Pri tejto technológii ale môže vznikáť moiré efekt. [11]

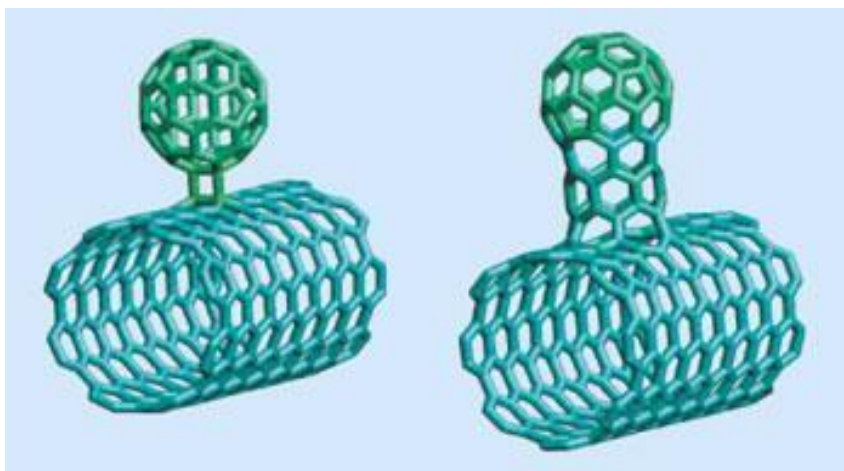
Jednou zo známych európskych firiem, v oblasti dotykových panelov, ktorá využíva medené elektródy, je firma Zytronic. Pri viacerých produktoch používajú medené elektródy, ako napríklad senzor ZyTouch, prispôsobený pre vonkajšie prostredie. Používajú elektródové pásy X-Y $10 \mu\text{m}$ medených elektród, ktoré sú takmer neviditeľné pre ľudské oko pri zapnutom displeji. Je možný aj dotyk s rukavicou. [19]

Technológia s názvom “metal mesh“, čo v preklade znamená “kovová sieťka“, môže tiež obsahovať medené elektródy (používa sa aj so striebornými elektródami). [11]

1.4.2.4 Uhlíkové nanopúčiky (Carbon nanobuds)

Uhlíkové nanopúčiky, ako vidno na obrázku č.12, sú spojením uhlíkových nanotrubic so sférickým spojením uhlíkových elementov napojených na nanotubicu.

Uhlíkové nanopúčiky majú oproti svojim kovovým protivníkom relatívne vysoký odpor $100 \Omega/\square$ - $200 \Omega/\square$. Tvoria náhodnú sieť molekulových reťazí, čo zabezpečuje viacero vodivých ciest naprieč panelom. Tieto reťazové zoskupenia sú veľmi úzke, čím nechávajú veľa voľného miesta na prenos svetla, čo limituje nechcené optické efekty ako odraz a “optický šum“. Je možné s nimi vytvárať netradičné vzory. Ako najväčší benefit je vysoká flexibilita, čo umožňuje ohnutý (oblý) alebo konštantne ohýbaný senzor. [22] [8]



Obrázok 12: Uhlíkové nanopúčiky (Carbon nanobuds) [21]

1.5 Parametre výberu dotykového senzoru

Firma, ktorá si chce objednať určité množstvo dotykových panelov, sa bude na začiatku tohto procesu zaujímať o niekoľko aspektov. V prvom rade, ako rýchlo, efektívne a cenovo dostupne im môžu byť dotykové panely dodané. Tiež ich bude zaujímať, náročnosť inštalácie alebo zavedenia ich softvéru, kompatibilita s ich hardvérom, servis, ktorý môže dodávateľská firma zabezpečiť. Tieto veci sú spomenuté z dôvodu, že dotykové senzory môžu byť najlepšie na svete, ale pokiaľ dodávateľskej firme trvá dlhú dobu ich vyrobiť alebo sú veľmi náročné na prácu s nimi pre odberateľa, tak zvolia alternatívu, z pohľadu kvality dotykového senzora, ktorá je horšia, ale vie ich priblížiť k ich cieľu.

Predmetom tejto práce sú parametre týkajúce sa kvality dotykového senzoru s vplyvom na celkovú kvalitu dotykového panela. Táto práca sa nezameriava na experimentálnu alebo málo využívanú technológiu, ale na známe spôsoby, ako pristupovať k sensorom dotyku v bežne používaných dotykových paneloch.

Prvá vec, o ktorej zákazník rozhoduje, je veľkosť displeja. Ako bolo spomínané v predošlej podkapitole 1.4.2, senzor z ITO je použiteľný iba do určitého rozmeru. Pokiaľ zákazník bude mať záujem o dotykový panel o veľkosti napríklad 60 palcov, tak ITO mu navrhnuté nebude. Dôvod, prečo by to výhradne mal žiadať nie je, pokiaľ nemá v sklade drahý materiál, z ktorého sa ITO vyrába. Zákazník môže mať záujem o malý dotykový displej nosený na tele (tzn. wearables). Flexibilita tohto displeja môže byť benefitom. Preto mu môže byť odporučený senzor z uhlíkových nanopúčikov, ktorý disponuje práve vlastnosťou relatívnej flexibility.

Dodávateľské firmy sa väčšinou zameriavajú na jeden typ senzoru, ktorý sa snažia predat' zákazníkovi. Pomocou kvality displeja a prídavných služieb, ktoré zabezpečia rýchlu krivku učenia, čo sa týka inštalácie a zavedenia dotykových panelov do zákazníkových lokácií sa snažia, aby práve ich produkt bol pre zákazníka prístupný. Pravdepodobnosť, že zákazník si bude chcieť u jednej dodávateľskej firmy vybrať z niekoľkých odlišných materiálov a technológií sensorov, je nízka (pokiaľ sa nejedná o veľkoodberateľa).

Zákazníci, zaujímajúci sa o dotykové panely, si ale musia dávať pozor na zaujatosť dodávateľských firiem voči svojej technológii, ktorú na trhu ponúkajú. Je to vidno aj v spomínanej dodávateľskej firme Zytronic, špecializujúcej sa na senzory s medenými elektródami. V príspevku, na ich webstránke od technického riaditeľa Andrewa Morrisona [20], je vyzdvihnutá technológia medených elektród, keďže jeho firma panely s touto technológiou predáva. Vôbec pritom nespomenie moiré efekt, ktorý môže vzniknúť. Možno medené elektródy vyladili do dokonalosti a tento efekt už sa u nich nevyskytuje. Ľahšie sa ale predáva produkt, keď sa dáva dôraz na benefity, preto zdravý skepticizmus je na mieste.

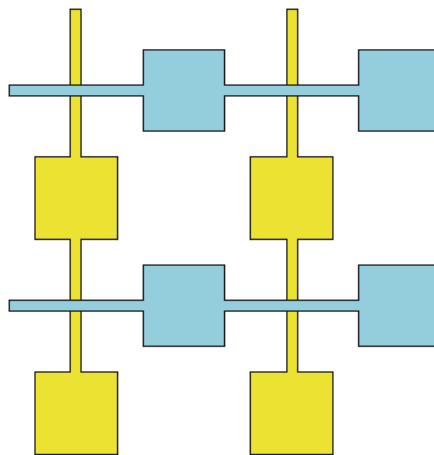
Zhrnutie všetkých parametrov, ktoré sú podstatné pre klienta pri výbere vhodného senzora, podľa priority:

1. Veľkosť displeja
2. Cena
3. Optická priehľadnosť
4. Presnosť lokalizovania dotyku
5. Časová odozva displeja na dotyk
6. Počet súčasných dotykov
7. Imunita voči elektromagnetickému rušeniu
8. Dotyk s bariérou (rukavica)
9. Minimálna reakčná veľkosť

1.5.1 Výber vzorov senzorov a ich základné charakteristiky

Táto podkapitola sa zaoberá vzormi (patterny) elektród kapacitných senzorov, ktoré umožňujú dotyk. Je možné sa ale pozrieť iba na vzory a ich charakteristiky, ktoré sú verejne dostupné. Odberateľským firmám, pre ich špecifické požiadavky, je ponúkané okrem dostupných riešení, navrhnutie vzorov na mieru. Takéto informácie sú predmetom obchodného tajomstva, z dôvodu značnej miery zdrojov vynaložených na vývoj. Samotné elektrostatické simulácie je náročné vytvoriť. Následné vyrobenie skúšobných vzorov a ich testovanie si vyžaduje veľkú mieru nákladov a expertízy.

Najjednoduchší spôsob, akým by sa dal vytvoriť mutual-capacitance dotykový senzor, je použiť dve vrstvy transparentného vodiča. Kapacity, ktoré sú ale presne nad sebou, si držia elektrostatické pole hlavne medzi nimi, preto je lepšie, keď sú viac vedľa seba. Keby boli v tvare štvorca rozmiestnené podobne ako na šachovnici (Obr. 13), veľa miesta by bolo nevyužitého, čo by malo negatívny vplyv na celkový výkon dotykového senzora. Preto s natočením o 45° vznikne známy diamantový vzor (Obr. 14). [11]



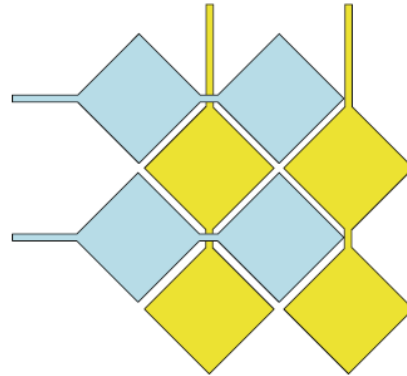
Obrázok 13: Štvorcové kapacity s umiestnením vedľa seba [11]

1.5.1.1 Diamantový vzor

Toto je najrozsiahljší vzor vo všetkých dotykových obrazovkách. Tento vzor je používaný pri ITO, lebo je jednoduchý na výrobu pre svoj nenáročný design. Pri tomto vzore sú kapacitory poskladané do diamantovej štruktúry a môžu byť rozprestreté vo dvoch vrstvách. Horná vrstva tvorí stĺpcovú vrstvu a dolná riadkovú. [23]

Zvyčajne je už ale tento vzor jednovrstvový, používajúci mostíky na prechody medzi horizontálnou a vertikálnou vrstvou. Tieto mostíky sú oddelené od budiacich elektród dielektrickým materiálom. [24]

V tomto vzore kapacitor tvorí malá plocha, kde horizontálny krk prechádza cez vertikálny. Inak sa to nazýva aj uzol. Veľký vplyv na kapacitanciu má pole na okrajoch diamantov. Preto je veľmi náročné vypočítať reálnu hodnotu.[11]



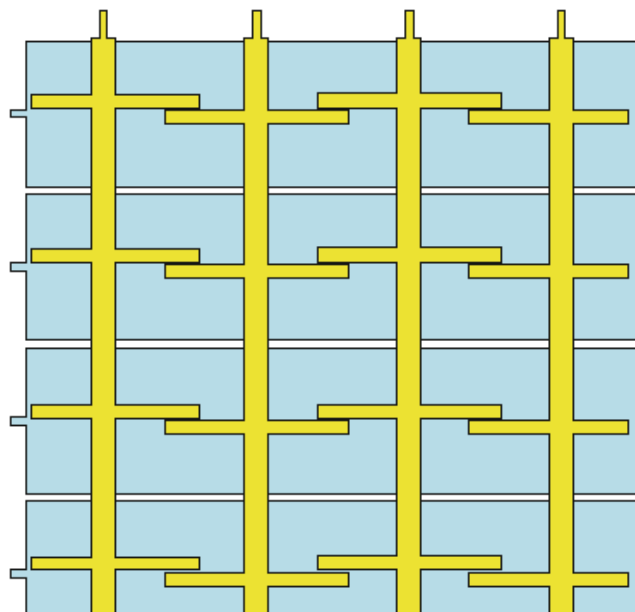
Obrázok 14: Diamantový vzor [11]

1.5.1.2 Manhattanský vzor

Je to druhý najrozšírenejší vzor, v ktorom budiace elektródy tvoria spodnú vrstvu širokých obdĺžnikov a snímacie elektródy sú úzke obdĺžniky. Na obrázku č. 15 je Manhattanský vzor s pridanými priečnikmi, aby vykryli "hluché miesto", kde sa pri čisto obdĺžnikovom tvare snímacích elektród zachytáva horšie dotyk. [11]

Najväčší benefit tohto vzoru je, že široké budiace elektródy na spodku chránia senzor od elektrického smogu displeja, ktorý je pod senzorom.

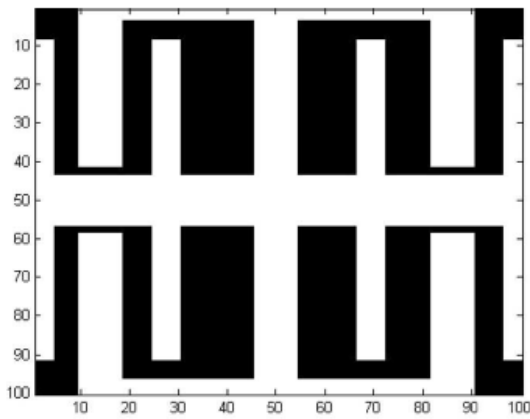
Najväčší nedostatok je koncentrácia elektrostatického poľa v okolí snímačej elektródy, ktorá je nad budiacou. Mimo snímaciu elektródu má tento vzor problém zachytiť dotyk. To môže byť trochu zlepšené priečnikmi, ale obmedzene, čo môže mať za následok problematické zachytenie dotykov malých prstov. [11]



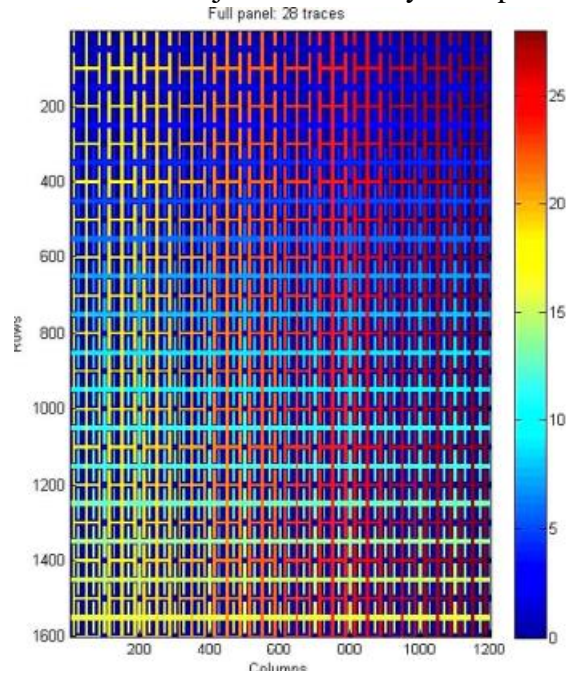
Obrázok 15: Manhattan s priečnikmi [11]

1.5.1.3 Interleaved grid vzor

Hlavný cieľ dizajnéra bolo vytvoriť takú sieť vzorov, ktorá zmenší počet elektród v kapacitnom systéme prekladaním elektród. To má mať za následok veľkú plochu, kde prst je snímaný dvoma príľahlými elektródami, tým pádom je lepšie zachytenie prstu s menším počtom elementov v paneli. Prst pri pohybe má mať stále dosah na niektorú z elektród, tým pádom senzor má lepšie snímať dotyk. Na obrázku č.16 je základný element tohto vzoru a na obrázku č.17 je celková dotyková plocha panelu s týmto vzorom. [23]

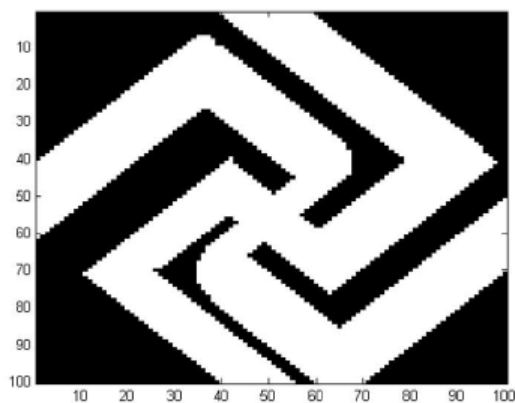


Obrázok 16 Interleaved grid vzor [23]

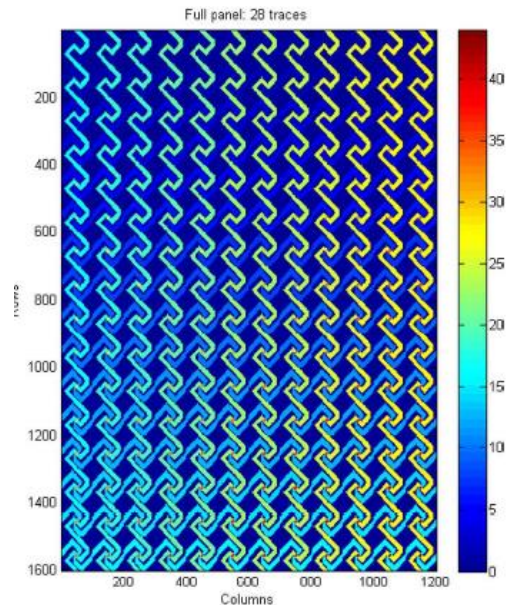


Obrázok 17: Interleaved grid vzor na panely [23]

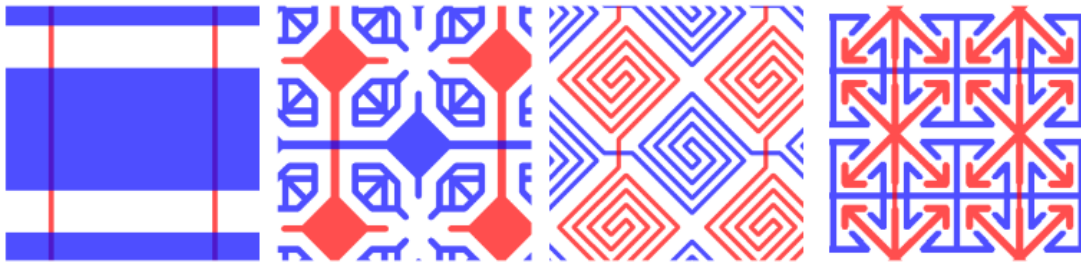
1.5.1.4 Ukážky ďalších vzorov



Obrázok 19: Angled Cross vzor základný element [23]



Obrázok 18: Angled Cross vzor [23]



Obrázok 20: Iné typy vzorov [33]

1.6 Výber parametrov k testovaniu

V experimentálnej časti bakalárskej práce budú testované tri dotykové panely s aktívnou plochou o uhlopriečke 43 palcov (943x531mm). Podkladový materiál je sklo o uhlopriečke 56 palcov (1181x794x5mm). Jeden dotykový panel má senzor z medených elektród a druhý zo strieborných nanovlákien.

Keďže sa jedná o sklo, medzi ktorým sa nachádza senzor, parameter flexibility odpadá. Tiež pri takýchto veľkých plochách sa flexibilita nepožaduje. Tieto vzorky nemajú ani žiadne zaoblenie.

Množstvo simultánnych dotykov sa nebude v tejto práci testovať. Táto práca sa zameriava na testovanie jedného dotyku. Tak isto predmetom tejto práce nebude cenová analýza týchto senzorov, keďže nie je zámerom tejto práce vývoj senzorov z doteraz nepoužívaných materiálov.

Zo všetkých parametrov, ktoré by sa mohli testovať, boli vybrané dva hlavné, ktoré súvisia s tým, čo firma FORTES interactive s.r.o. komunikuje s klientmi. S touto firmou je naviazaná spolupráca, v rámci tejto bakalárskej práce.

Prvý parameter je presnosť zachytenia dotyku, ktorý sa prezentuje firmou FORTES interactive s.r.o., s odchýlkou pod 2 mm. Keďže táto hodnota je ale po spracovaní softvérom, bude sa hodnotiť, ako je senzor schopný dotyk zachytiť a zaznamenať malý posun v koordináciách dotyku. Testovať sa bude statickým dotykom stylusu na dotykovú plochu, čo znamená, že stylus sa po ploche posúvať nebude, urobí sa na ploche bod.

Druhý je reakcia senzora na dotyky rôznych typov stylusov, prípadne dotyk prsta. Meranie bude zahŕňať vykonanie dotykov v približne rovnakej oblasti na všetkých senzoroch a následnú analýzu dát.

V pláne bolo merať aj čas odozvy (response time), ktorý je prezentovaný firmou, že sa nachádza pod 5 ms. Softvér, ktorý je momentálne dostupný, má značne pomalšie vzorkovanie, takže toto meranie nie je možné. ShowVoltage, ktorý je použitý na

merania, vzorkuje s periódou približne 850 ms, čo je násobne vzdialené od hodnoty, ktorá by bola potrebná na meranie času odozvy.

2. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

2.1 Výber zariadenia na testovanie

2.1.1 Rozhodujúce parametre pre výber zariadenia

Za najdôležitejší aspekt výberu zariadenia musí byť predovšetkým možnosť montáže v časovom období do maximálne dvoch mesiacov (od prijatia potrebných komponentov) do finálneho stavu pre človeka, čo to robí prvýkrát. Taktiež sa montáž musí zaoberať s čo najmenším vybavením dielne. Zostavy, ktoré budú vyžadovať profesionálnu dielňu, nebudú môcť byť realizované. Keďže firma FORTES interactive s.r.o nedisponuje priestorom, ktorý by bol určený iba na toto zariadenie, musí byť prístroj relatívne jednoducho uskladniteľný.

Ako nasledovný kľúčový parameter je opakovateľná presnosť zariadenia. V predošlej kapitole bolo spomenuté, že bude testovaná presnosť zachytenia dotyku. Preto zariadenie musí byť veľmi presné, aby bola zachytená odchýlka senzoru, namiesto odchýlky zariadenia. To znamená, že zariadenie s odchýlkou viac ako 0.5 mm nebude dostatočné. Ideálne, aby sa to približovalo k 0.1 mm.

V prípade, že by merania obsahovali väčšie množstvo dotykov, je potrebné, aby zariadenie bolo dostatočne rýchle. To si vyžaduje určitý výkon v motoroch. Keďže je rýchlosť testovania menej dôležitá ako presnosť testovania, musí rýchlosť byť uvažovaná vzhľadom na čo najväčšiu presnosť zariadenia.

Posledný parameter pre zariadenie je dodržanie rozpočtu okolo 20 000 CZK.

2.1.2 Úvaha k designu zariadenia

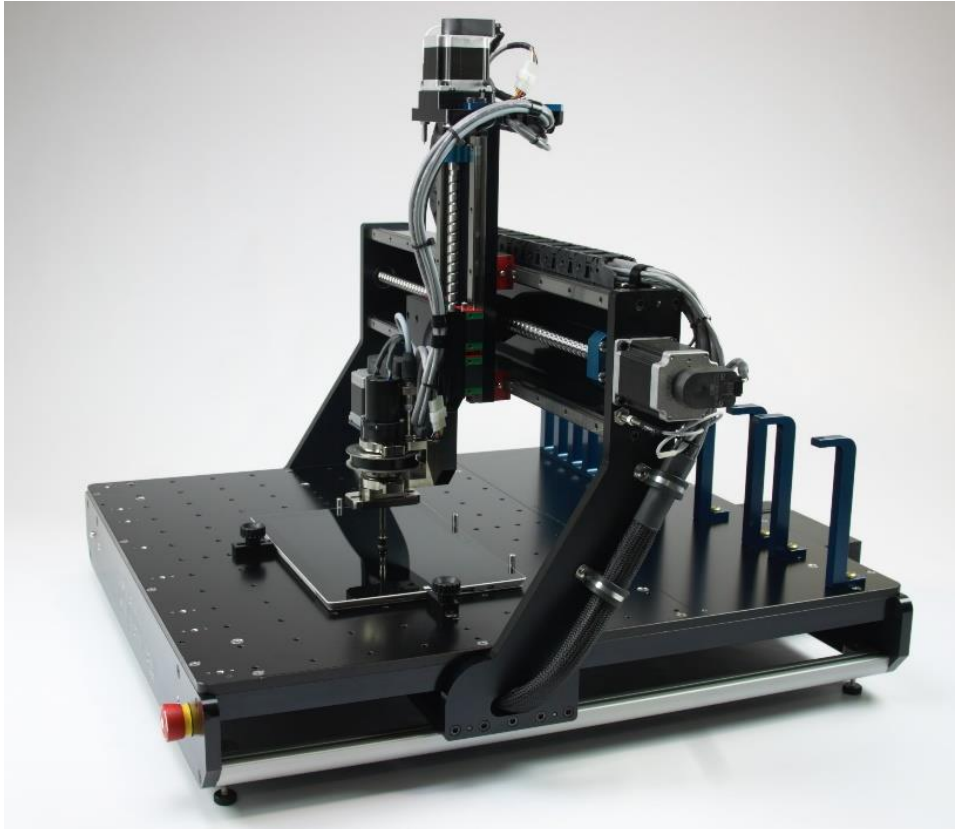
Po špecifikovaní všetkých najdôležitejších parametrov pre zariadenie je možné vybrať správny design, vhodný pre účely testovania veľkých dotykových panelov.

Prvý spôsob by mohol byť, aby design bol kompletne navrhnutý od začiatku bez použitia externých zdrojov. Tak isto všetky súčiastky a komponenty by boli kúpené alebo svojpomocne vyrobené. Je zrejmé, že tento prístup by za žiadnych okolností nespĺnil vyhradený časový interval. Namiesto 1-2 mesiacov by to trvalo 1-2 roky (veľmi optimisticky). Tiež, tento prístup nespĺňa priestorové možnosti.

Ďalší spôsob je, prebrať už existujúci design a upraviť ho tak, aby bol vhodný pre účel tejto práce. Design 3D tlačiarne by mohol vyhovovať, čo sa týka požadovanej presnosti týchto tlačiarní. Tie sú väčšinou malých rozmerov, keďže tlačia v 3D priestore. Osi X a Y môžu merať 40-50 cm. Pri veľkosti senzora so sklom s rozmermi 1181x794x5mm je potrebné prebrať iný typ designu. Tým je CNC (Computer Numerical Control), čo sú počítačom riadené obrábacie stroje.

2.1.3 Analýza a výber z možných designov testovacieho zariadenia

Nápad s transformáciou CNC zariadenia na testovanie dotykových displejov nie je ojedinelý. Firma Tactile Automation inc. vyvinula práve takéto zariadenie, ako je vidno na obrázku č.21. S rozsahom pohybu 530 mm pre os X a Y [25] ide o zariadenie, ktoré môže testovať smartphony, tablety prípadne notebooky, ale rozhodne to nie je určené pre testovanie veľkých dotykových panelov.

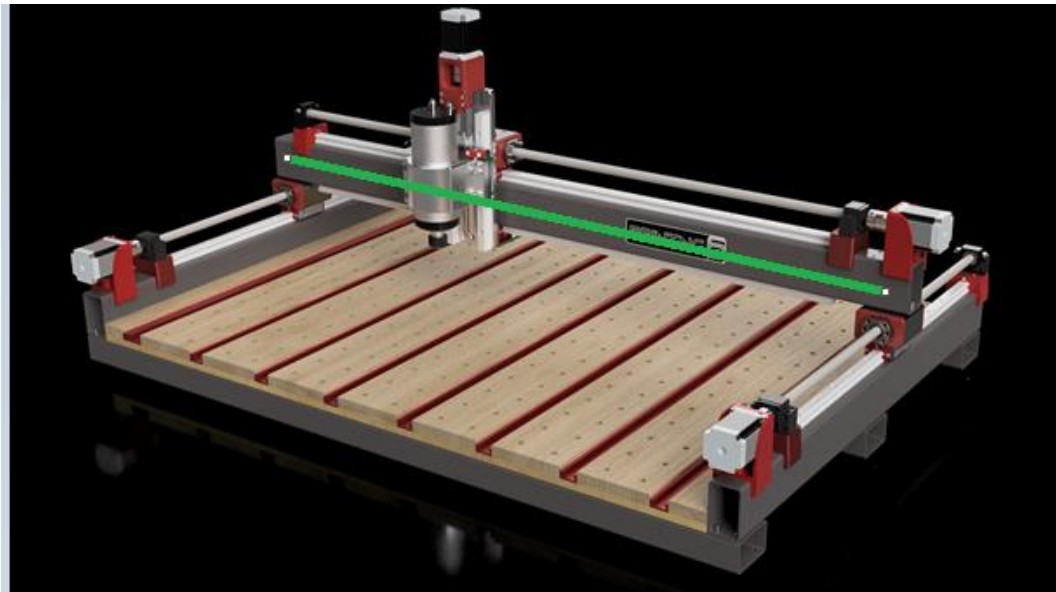


Obrázok 21: Robotic Touch Panel Tester – TakTouch 1000 [25]

CNC zariadenia väčšinou používajú krokový motor, kvôli jeho presnosti. Preto všetky designy, ktoré budú spomínané, používajú tento typ motora. Zariadenie z obrázku č.21, podľa stránky firmy, môže mať viacero typov motorov [25].

2.1.3.1 PrintNC

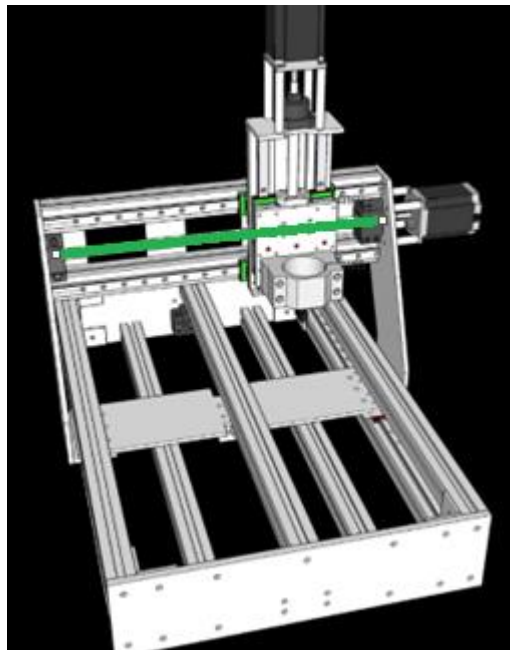
Na obrázku č.22 je koncepcia CNC s názvom PrintNC, ktorá je open-source [26]. Všetky informácie sú dostupné na internete s aktívnou komunitou na sociálnej sieti Discord. Na obrázku je zelenou úsečkou zvýraznená os X, ktorá pre potreby tejto bakalárskej práce bude musieť byť okolo 1200 mm pohyblivej časti. Hlavná konštrukcia PrintNC je oceľová (šedej farby), aby zariadenie nadobudlo robustnosť a mohlo sa pohybovať relatívne rýchlo, bez ohnutia konštrukcie alebo bez pohnutia celou konštrukciou.



Obrázok 22: PrintNC V3.0 [26]

2.1.3.2 Hliníková CNC konštrukcia

Ďalšia koncepcia je na obrázku č.23. Ide prevažne o hliníkovú konštrukciu. Autor tohto konceptu na jeho stránke [27] detailne opisuje celý postup, so všetkými súčiastkami, ktoré si objednal aj s ich cenami. Vyšlo ho to na cca 16 000 CZK v roku 2017 (s pripočítaním ďalších nákladov). Autor plánoval pracovať s obrobkom s maximálnymi rozmermi 500x300x50 mm. Pre použitie v rámci tejto práce by sa musela zväčšiť daná koncepcia viac ako dvojnásobne. Čo by znamenalo cenu okolo 40 000 CZK s cenami z roku 2017. Takže reálna cena by bola značne vyššia. Koncepcia PrintNC vychádzala cenovo podobne nehľadiac na to, že obe tieto koncepcie si vyžadujú určité skúsenosti s prispôbením materiálu, aby mohol byť konštrukčne použiteľný. To znamená vybavenie relatívne profesionálnej dielne. Tým pádom, obe tieto koncepcie nespĺňajú rozhodujúce parametre pre výber zariadenia z podkapitoly 2.1.1.



Obrázok 23: CNC v 3.3 [27]

Vďaka týmto koncepciám a komunikácií s ľuďmi viac znalými v tejto oblasti, bol pre účel tejto práce jasne odporučený LowRider CNC V3.

2.1.3.3 LowRider CNC V3

LowRider CNC V3, ktorý je na báze “open-hardware“, čo znamená, že modely dielov s celkovým designom sú voľne dostupné na internete. Táto otvorená koncepcia má vlastnú stránku a fórum, do ktorého prispievajú ľudia konštruujúci zariadenie s rôznymi problémami alebo vylepšeniami.[38] Diely, ktoré sú červené a čierne na obrázku, sú vytlačené na 3D tlačiarňi (okrem pozdĺžnej časti, ktorá ide cez celú os X, tá je vyrezaná z dreva). Keďže je možnosť si to vytlačiť lokálne v Brne, boli by ušetrené značné náklady. Predbežná cena je okolo 17 000 CZK za zariadenie, takže to necháva priestor na ďalšie náklady, ktoré vzniknú pri konštrukcii. Týmto by výborne zariadenie spĺňalo jeden z kľúčových parametrov opísaných z kapitoly 2.1.1 a to je cena.



Obrázok 24: LowRider CNC V3 [28]

Najdôležitejší parameter zo spomínanej kapitoly 2.1.1 tiež spĺňa a tým je montáž do 2 mesiacov a jednoduchá uskladniteľnosť. Až na základné nástroje, nie je nevyhnuté opracovanie, narezávanie, vyvrtávanie alebo ohnutie kovov, aby bola vyrobená konštrukcia zariadenia. Takže je to časovo a vybavením zvládnuteľné. Taktiež, ako je možno vidno z obrázkov č.24 a č.25, zariadenie nie je fixne pripevnené na podklad, na ktorom bude testovaný dotykový panel. Podľa predošlých koncepcií boli zariadenia ako jeden celok. Podklad, na ktorom by bol dotykový panel, bol súčasťou zariadenia. To robilo tie koncepty náročné na uskladnenie. V prípade LowRiderV3, sa po testovaní môže zariadenie odňať od dosky s koľajnicou a relatívne ľahko uskladniť.

Presnosť zariadenia je podľa užívateľov fóra [29], ktorí zariadenie využívajú na obrábanie materiálov, s odchýlkou do 0.5 mm. Záleží na obrábanom materiáli. Keďže táto práca sa nevenuje obrábaniu materiálov, dala by sa testovacia činnosť dotykových panelov pripodobniť k laserovému gravírovaniu. Je to presná činnosť a materiál

nevytvára odpor na zariadenie. Pri laserovom gravírovaní spomínali užívatelia presnosť s odchýlkou okolo 0.1 mm. To by spĺňalo parameter z podkapitoly 2.1.1. [30][31]



Obrázok 25: LowRider CNC V3 - pohľad z boku [28]

V prípade, že by bolo potrebné použiť zariadenie pri teste s veľkým množstvom dotykov a väčším rozmerom senzora ako sa bude testovať v tejto práci, je možné vypočítať približný čas, ktorý by to mohlo trvať. Pre takýto výpočet je možné vychádzať z najnovších maximálne testovacích rýchlostí, pri prechodnom pohybe zariadenia (nie proces obrábania). Tieto rýchlosti zahŕňujú nasadenie obrábacieho nástroja s predpokladanou váhou 1.5 kg, čo LowRider V3 adaptovaný na testovanie dotkových paneloch nebude zahŕňať. Maximálne testované rýchlosti pre os X je 600 mm/s, os Y s 300 mm/s a os Z s 60 mm/s. [32] Pri predpoklade, že testovací stylus bude pri každom dotyku potrebné dať do výšky 100 mm a senzor by bol veľkosti 1450x820mm, testovacia matica s 1200 dotykmi bude vo formáte 50x24 dotykov. Rozostup medzi dotykmi bude približne 29 mm po dĺžke a 34 mm po šírke. Pri týchto požiadavkách na osi Z by bolo zabratých 1.1 hodiny pri rýchlosti 60 mm/s ($((1200 \cdot 200) / 60) / 3600$). Pokiaľ by sa testy robili po dĺžke, čo znamená po osi Y, pohyb na osi X by celkovo trval rádovo sekundy, takže ten nebude zahrnutý do výpočtu. Po osi Y tým pádom musí precestovať 34 800 mm ($1450 \cdot 24$). Pri predpoklade, že nedosiahne na tejto osi svoju maximálnu rýchlosť, ale iba 100 mm/s by čas pohybu bol 5.8 minúty. Pri celkovom zaokrúhlení času na 1.2 hodiny je čas 1200 dotykov bez započítania

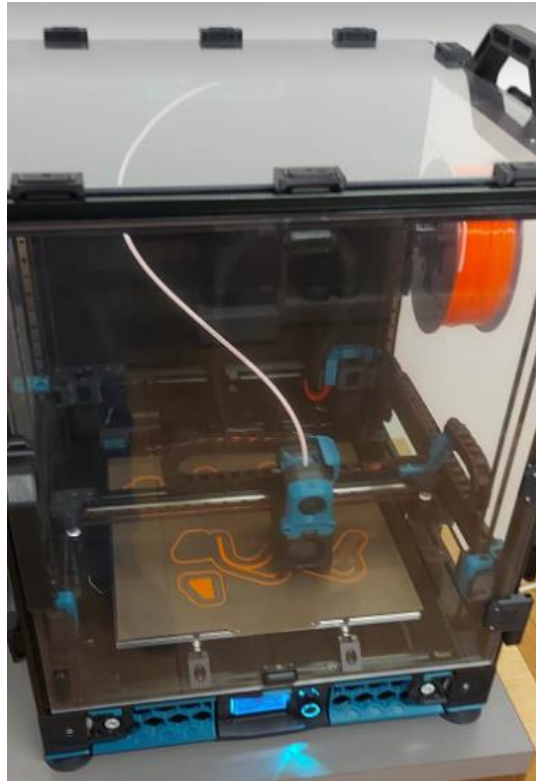
značného odľahčenia zariadenia. Aj keby os Z cestovala polovičnou rýchlosťou a celkový čas by bol 2.5 hodiny, na taký počet dotykov je to prijateľné.

Týmto môže byť zhrnuté, že zariadenie LowRider CNC V3 spĺňa všetky stanovené kritéria, takže môže byť použité v tejto bakalárskej práci.

2.2 Konštrukcia LowRidera CNC V3

2.2.1 Tlačenie a vyrezávanie mechanických častí

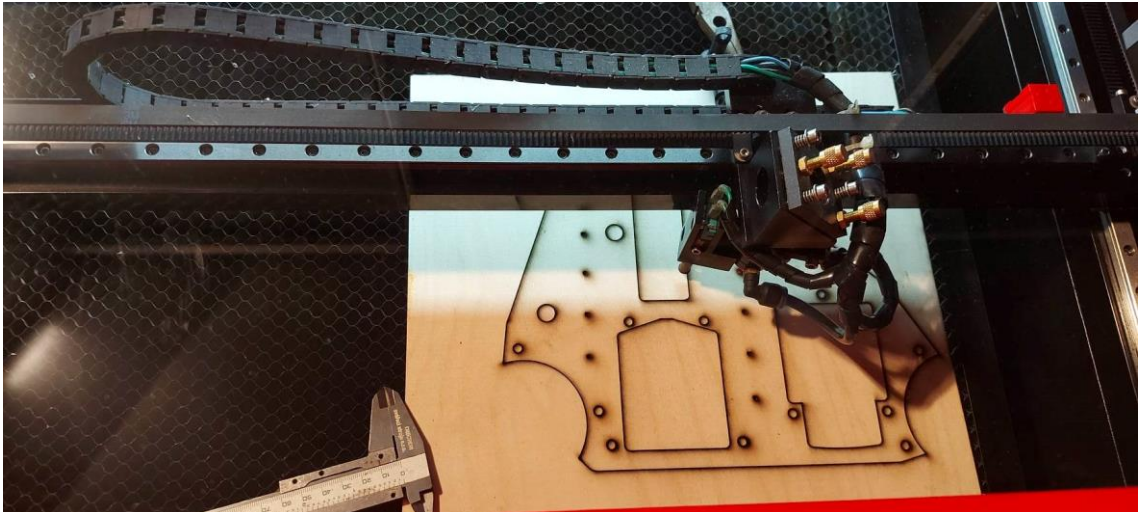
Zakúpené boli 3 kg ABS filamentu, keďže tento typ bol odporučený prevádzkovateľom tlačiarne pre daný účel.



Obrázok 26: Tlačenie LowRidera CNC V3

Zo stránky firmy V1Engineering [36] bol objednaný “LowRider v3 Hardware kit“ obsahujúci 5 krokových motorov Nema 17, napájacie a predlžovacie káble, kovové mechanické časti a iné komponenty. Tak isto bola objednaná SKR Pro1.2 doska s piatimi BIGTREETECH TMC2209 V1.2 drivermi a dotykovou obrazovkou TFT35 E3 V3.0.

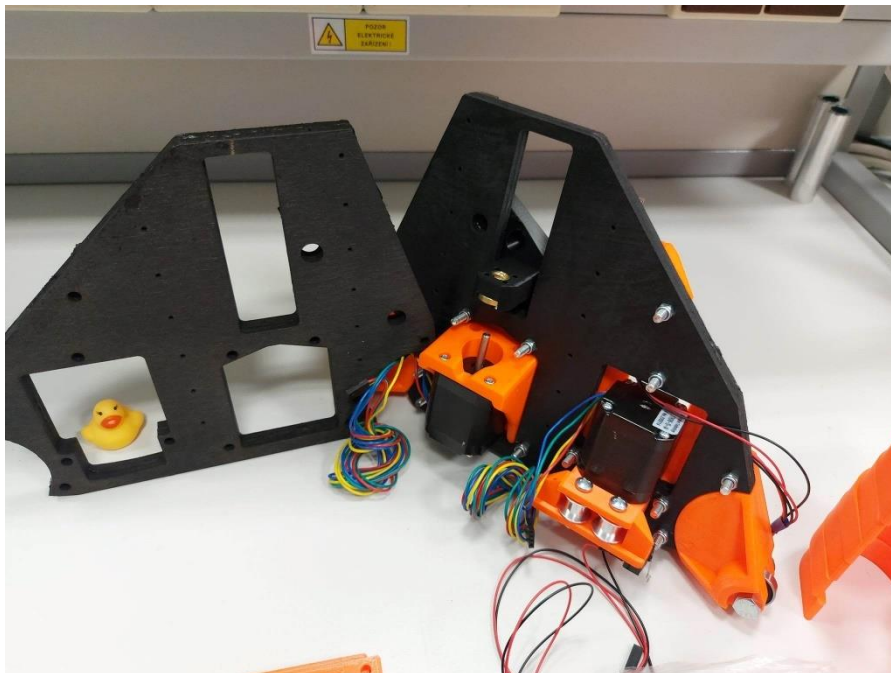
Bočné strany LowRideruV3 by mali byť z dreva. Je možné ich vytlačiť na 3D tlačiarňi, ale keďže sa jedná o veľké kusy, nevošli by do používanej tlačiarne. Na to bola použitá brezová preglejka 6.5 mm. Jedna bočná strana bola vyrezaná dvakrát, aby kus mohol mať 13 mm, po spojení lepidlom. Z tohto materiálu napokon bola spravená iba jedna bočná strana, lebo preglejka stratila svoj rovný tvar, pravdepodobne z dôvodu okolitého prostredia, ako napríklad vlhkosť a zmena teploty pri prenose preglejky. Druhá strana bola z dreva, ktoré bolo dostupné v školskej dielni.



Obrázok 27: Laserové vyrezávanie do preglejky

Takto vyrezané bočné strany boli nastriekané čiernou farbou a mechanická montáž mohla začať.

2.2.2 Montáž



Obrázok 28: LowRiderV3 YZ pláty

Pre využitie prístroja na testovanie väčších dotykových panelov so šírkou do maximálnych 1220 mm pre šírku skla dotykového panelu, bola vypočítaná kalkulačkou [37] dĺžka hliníkovej tyče na 1400 mm. Jedná sa o os X prístroja.



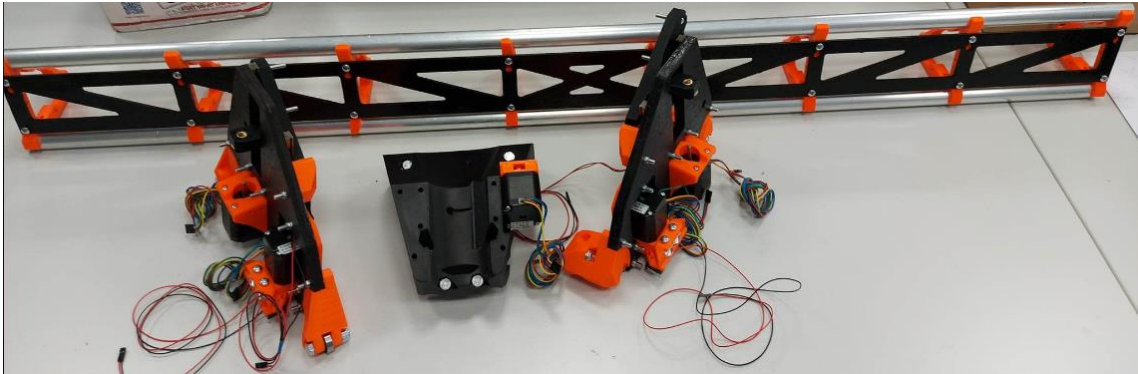
Obrázok 29: Postupné mechanické skladanie LowRideraV3

Posledná časť, ktorá chýbala na kompletizáciu LowRideraV3, bola výplň medzi hlinenými tyčami na osi X zariadenia. Táto časť sa zvykne vyrezávať samotným prístrojom, keďže zariadenie je CNC. Ale v rámci tejto bakalárskej práce je účel iný, preto zo Sololitu s hrúbkou 5 mm bola vyrezaná táto výplň na zákazku a následne nastriekaná čiernou farbou.

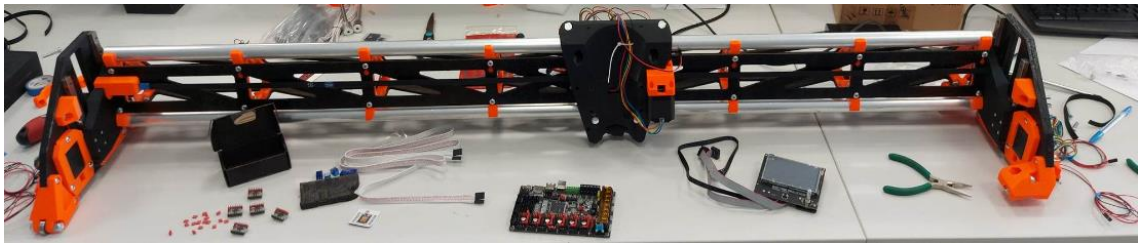


Obrázok 30: Vyrezaná a nastriekaná "výplň" pre os X

Následne mohol byť LowRiderV3 kompletne mechanicky zmontovaný.



Obrázok 31: Čiastočná mechanická kompletizácia LowRideraV3



Obrázok 32: Kompletné zostavenie LowRideraV3 bez elektro časti

Filament ABS, ktorý bol použitý na tlačenie všetkých potrebných častí, sa ukázal ako spoľahlivý a pevný materiál. Pre väčšinu, okrem dvoch komponentov, sa použil infill na úrovni 30%, čo je dostatočná pevnosť komponentov. Pri montáži došlo k poškodeniu iba pri dvoch komponentoch, a to z dôvodu hrubého zaobchádzania. Neónovo oranžová, spolu čiernou a prirodzenou farbou hliníka, spolu s pekným designom zariadenia, dopomohli k vizuálne peknému zariadeniu.

Na všetky spoje, medzi hriadeľmi krokových motorov a pohyblivou mechanickou časťou, bolo do závitov upevňovacích skrutiek aplikované lepidlo, aby časom nedošlo k ich uvoľneniu a možnému poškodeniu mechanickej časti. Na zakrytie káblov bola použitá sťahovacia bužírka, ktorá sa po nahriatí zahrievacou pištoľou stiahla a kompaktno zakryla celú kabeláž.

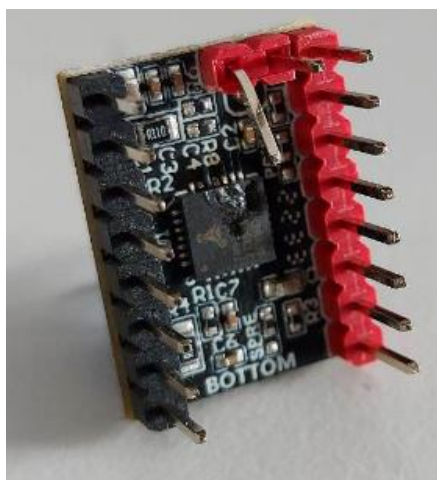
K spojzndeniu LowRideraV3 bolo treba ešte dokúpiť pracovnú plochu, po ktorej sa bude pohybovať. Bola zvolená OSB doska s hrúbkou 18 mm, šírkou 1600 mm a dĺžkou 1200 mm, vzhľadom na umiestnenie a pohyb LowRideraV3. Po doplnení hliníkovej koľajnice a pásov, mechanická časť bola skompletizovaná. Elektrické spojzndenie LowRideraV3 sa ale nezaobišlo bez problémov.



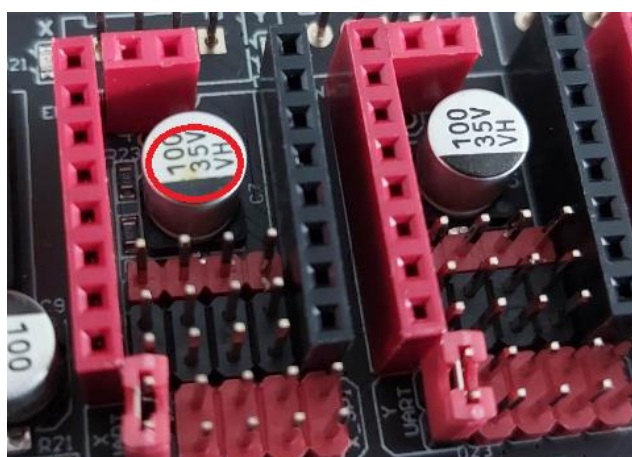
Obrázok 33: Finálna podoba LowRiderV3 s elektrickým zapojením

2.2.3 Chybné elektrické zapojenie

Ako bolo už spomínané, LowRiderV3 je open-source model, ku ktorému je návod na odporúčanú montáž spolu s fórom, na ktorom prebieha diskusia. Keďže mechanické montovanie išlo bez problémov, zabudlo sa kriticky zhodnotiť, či návod a postup praktizovaný inými, je ten najrozumnejší. LowRiderV3 používa mechanické endstopy, namiesto softwarových, takže bolo odporúčané na všetkých driveroch ohnúť nepotrebný pin, pre správnosť fungovania zariadenia. Všetky piny boli ohnuté a všetkých 5 driverov zapojených do SKR dosky. Po zapojení do elektrickej siete, v priebehu približne 3 sekúnd sa z driverov začalo dymiť. Okamžite bola doska odpojená od elektriny, ale škoda bola spôsobená. Došlo k dotyku pinu s doskou, cez kapacitor, driver bol zkratovaný a čip na ňom zhorený. Takto bolo zničených všetkých 5 driverov, ktoré museli byť znova objednané.



Obrázok 35: Zničený driver

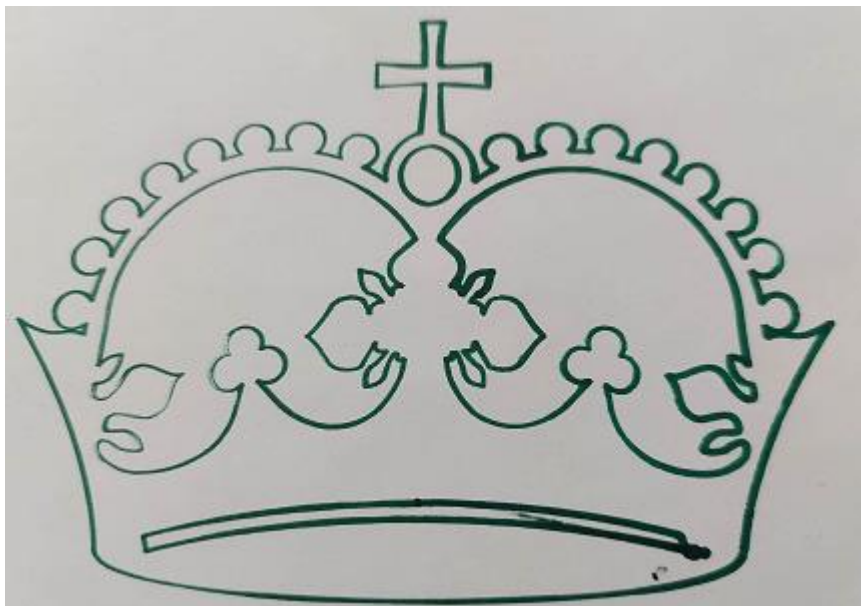


Obrázok 34: Kapacitor spôsobujúci skrat so stopou po horení

Okrem týchto problémov s drivermi nebol iný problém s elektrickou časťou LowRideruV3, takže po prepojení notebooku so zariadením, sa začalo s manuálnym a následne automatickým ovládaním zariadenia.

2.2.4 Testovanie presnosti

Pre prvý automaticky test zariadenia bolo zvolené nakreslenie korunky. To prebehlo úspešne.



Obrázok 36: Automatický test pre LowRiderV3 - nakreslenie korunky

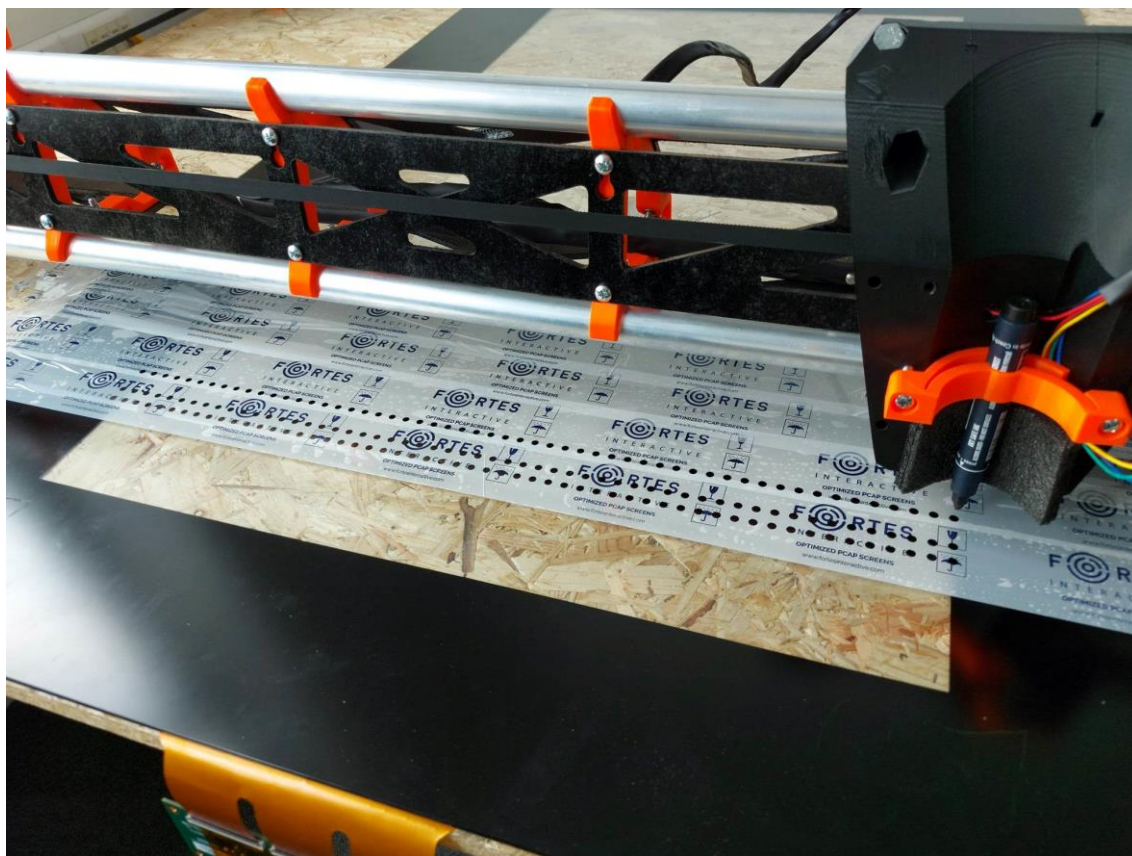
Následne bol vykonaný test presnosti zariadenia, takzvaný "square test". Zariadenie malo prejsť do obdĺžnika a fixkou urobiť označenie s rozmermi 1200 mm x 900 mm. Pri prvom teste zariadenie urobilo označenia v rohoch obdĺžnika s rozmermi 1196x897 mm, ako je možné vidieť na obrázku č. 37. Test bol nastavený tak, aby tieto označenia prístroj zopakoval niekoľkokrát. Zariadenie bolo schopné vždy identicky tieto značky spraviť, z čoho vyplýva, že sa nejedná o odchýlku, ale skôr o uhol a nastavenie fixky, ktorou bol tento test prevedený.



Obrázok 37: LowRiderV3 "square test"

Ďalší test presnosti tohto zariadenia už bol zameraný na konkrétnu aplikáciu LowRideraV3. Jednalo sa o testovanie dotykov a ich opakovateľnosť. Na to, aby bolo poznať voľným okom, či má zariadenie viditeľnú odchýlku, bola použitá permanentná fixka, s ktorou zariadenie túto radu dotykov zopakovalo päťkrát.

Fixka bola pripevnená na LowRiderV3, pomocou Pen Holder, ktorý bol vymodelovaný v programe SOLIDWORKS pre túto bakalársku prácu a vytlačený na 3D tlačiarňi spolu s ostatnými komponentmi. Tieto držiaky na stylusy a fixky boli jediné modely urobené pre túto prácu, ostatné boli stiahnuté z internetu, keďže sa jedná o open-hardware produkt. Z testu, s týmito opakovanými dotykmi vyplýva, ako je vidno na obrázku, že odchýlka je zanedbateľná, pravdepodobne v najnižších desatinách milimetra (predpoklad je okolo 0.1 mm). Takže sa môže prejsť na meranie kapacitných dotykových senzorov.



Obrázok 38: Test presnosti "dotykov" LowRideruV3

2.3 Meranie kapacitných dotykových senzorov

2.3.1 Pracovné nástroje použité na meranie a analýzu

Pri meraní bude použitý softvér s názvom ShowVoltage. Po pripojení kontrolóra so senzorom a spojením s počítačom, vyčíta “surové” dáta zo senzora. Program je schopný ukladať dáta v maticovom tvare do programu Excel. Dáta sú hodnoty reprezentujúce napätie, ale v rozsahu, ktorý je daný programom. Nerepresentujú preto reálne hodnoty napätia, ktoré pre potreby tejto práce nie sú podstatné. Dáta zobrazujú úrovne takto daného napätia na jednotlivých uzloch (prekríženia vertikálnych a horizontálnych elektród) senzora. Tieto dáta, za pomoci programu MATLAB sú ďalej spracované.

2.3.2 Prvotné testovanie senzorov s LowRideromV3

Pre vytvorenie metodiky testovania bol použitý senzor zo strieborných nanovlákien. Prvé meranie bolo vykonané ešte pred nasadením LowRideraV3. Ďalšie meranie bolo s nasadeným LowRideromV3 a s vykonaním jedného dotyku.

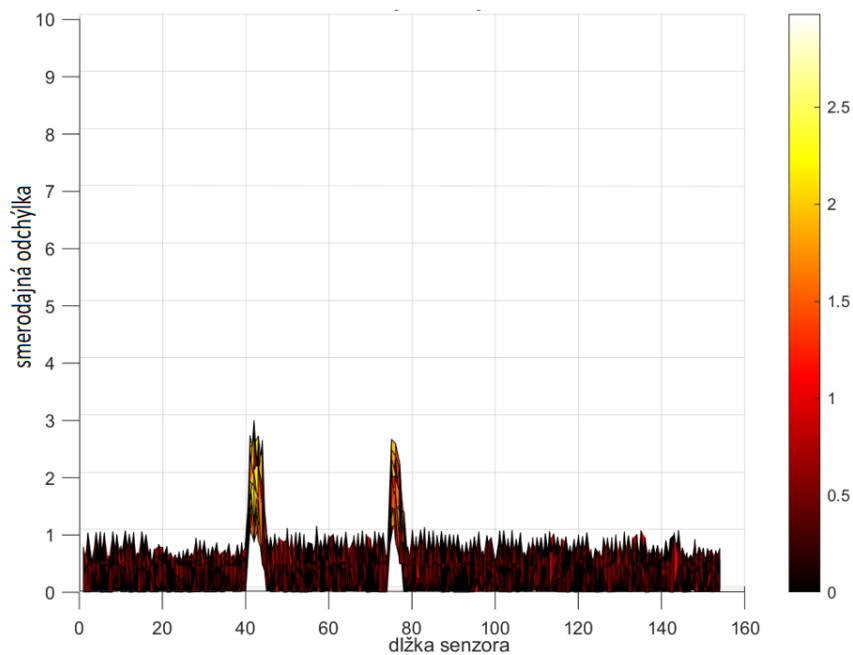


Obrázok 39: LowRiderV3 osadený na doske s pripevneným stylusom a dotykovým panelom so senzorom zo strieborných nanovlákien

Výstupné dáta z programu ShowVoltage, pre senzor zo strieborných nanovlákien, sú vo formáte 80x158 matic, so vzorkovacou periódou približne 810 ms. Každý dátový bod reprezentuje jeden uzol na senzore. Tie sú vzdialené od seba 6 mm na dĺžku a 6.6 mm na šírku. Vykresľovanie je v 3D grafe, spravené pomocou funkcie v programe MATLAB, surf(). Použitý je bočný pohľad 3D grafu, z dôvodu najlepšej viditeľnosti dát. Smerodajná odchýlka, na nasledujúcich obrázkoch, je vykreslená so vzťahom:

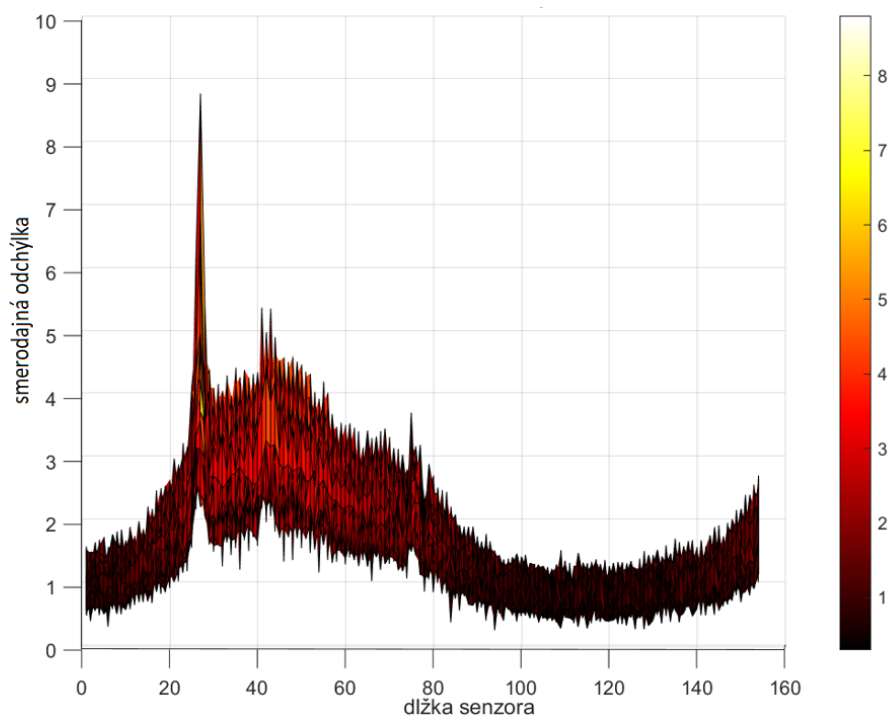
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

N počet meraní, x_i dáta z danej matice na danom uzly, \bar{x} priemerné dáta z daného uzlu zo všetkých dát



Obrázok 40: Smerodajná odchýlka - bočný pohľad, senzor zo strieborných nanovlákien bez nasadeného LowRideraV3

Na obrázku č.40 je možno vidieť, že rozptyl dát zo 16 matíc je v rozsahu 0-1, s väčšinou hodnôt pohybujúcich sa blízko nule. Dva pásy s vyššími hodnotami sú buď mierne poškodené elektródy alebo hodnoty horšie interpretované kontrolórom. Farebný číselný rozsah je napravo, hneď vedľa grafu. Dĺžka senzora je v počte uzlov.



Obrázok 41: Smerodajná odchýlka – bočný pohľad, senzor zo strieborných nanovlákien s nasadeným LowRideromV3 a vykonaným jedným dotykom

Na obrázku č.41 je vidno dotyk stylusom, keďže sa dáta merali aj pred samotným dotykcom, je tým pádom vidieť v smerodajnej odchýlke. Okrem dotyku je v okolí vidno zvýšené hodnoty, ktoré vznikli rušením LowRideraV3. Zariadenie malo aktívnych všetkých 5 krokových motorov. Šum sa nachádza práve v okolí, kde bolo zariadenie, keďže zvýšené hodnoty je vidno iba v jednej polovici senzora. Zašumené hodnoty, oproti senzoru bez LowRideruV3, sú 1-15 násobne väčšie ako hodnoty senzora z obrázku č.40.

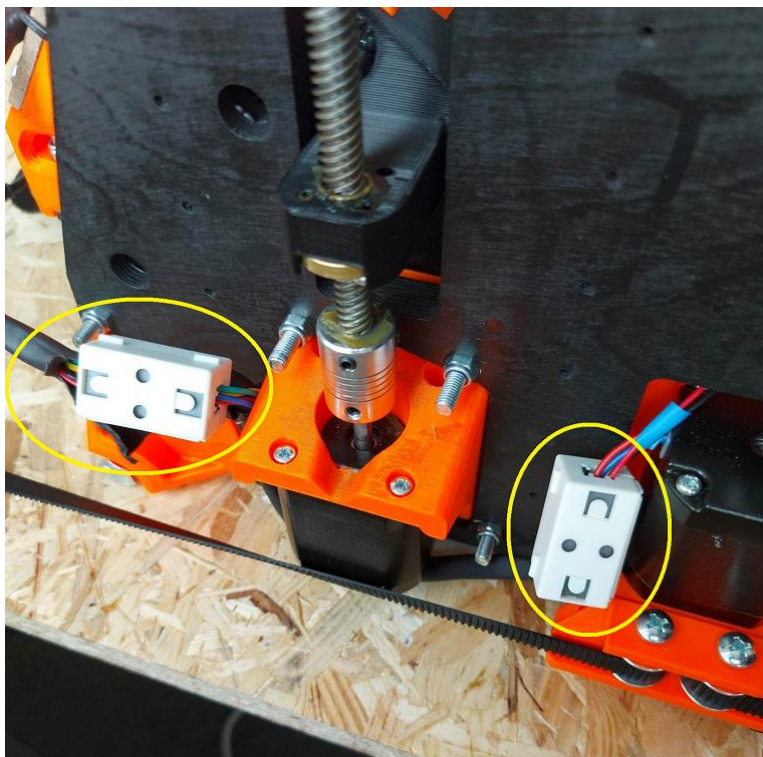
Pre vypracovanie metodiky a meranie hodnôt senzora, namiesto merania hodnôt šumu, je dôležité sa pokúsiť tento šum eliminovať.

2.3.3 Potlačenie šumu

Keďže sa jedná o rušenie po celej dĺžke LowRideraV3 (jeho os X) a cez celú šírku senzora, môže byť vyvodené, že primárnym zdrojom rušenia je napájanie krokových motorov prostredníctvom káblov.

2.3.3.1 Feritové krúžky

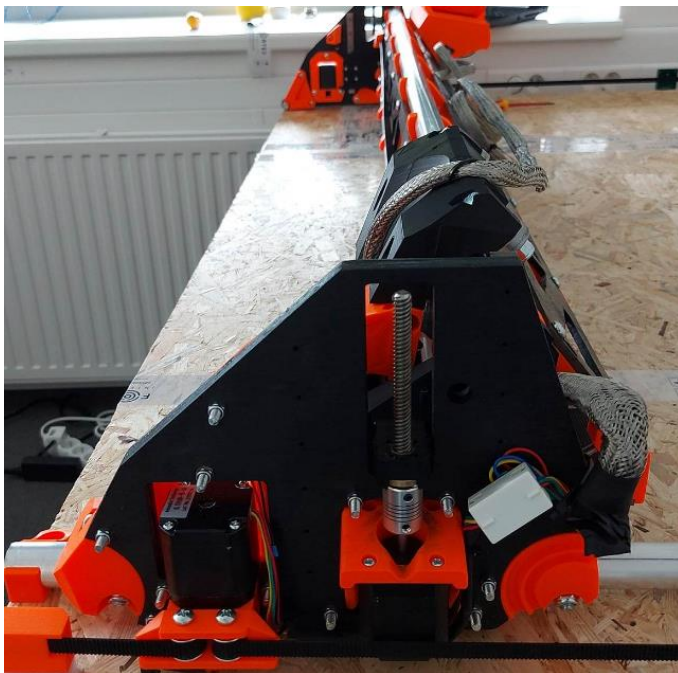
Prvý pokus na potlačenie rušenia bol v podobe feritových krúžkov, ktoré boli aplikované na káble vychádzajúce z motorov a na káble pred vstupom do SKR V1.2 základnej dosky LowRideruV3. Celkovo ich takto bolo aplikovaných desať. Keby bolo rušenie elektromagnetického typu, tak by sa to malo do určitej miery potlačiť. Rušenie, potlačené ani znížené, nebolo.



Obrázok 42:
Ukážka aplikácie feritových krúžkov na vývody káblov

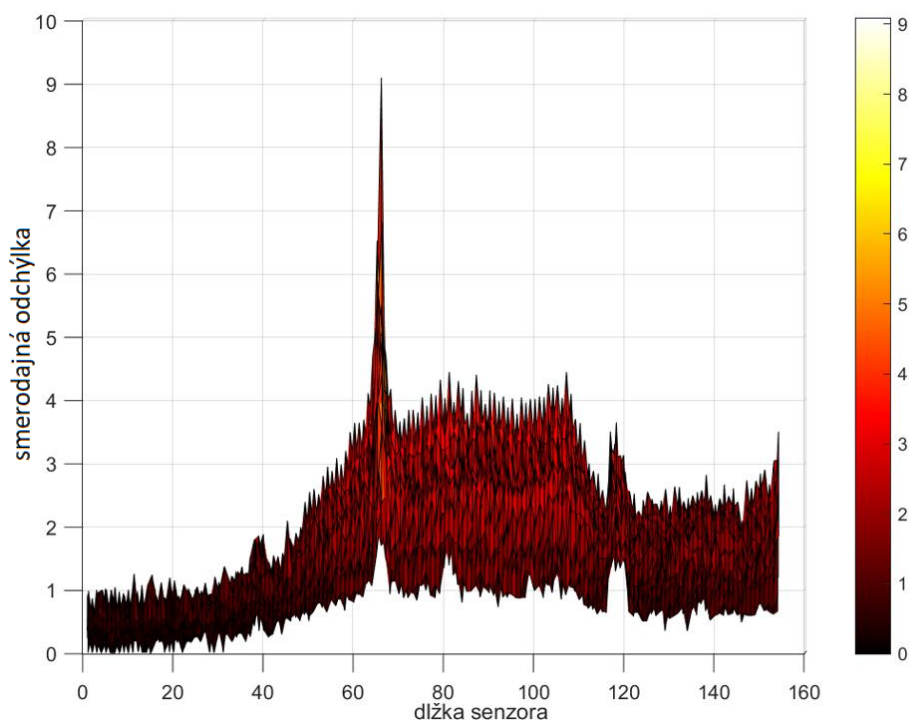
2.3.3.2 Medené pocínované tienenie

Na všetky káble bolo navlečené medené pocínované tienenie. Na to boli naletované zemniace káble, ktoré boli privedené na zem napájania zariadenia. Týmto bola snaha o potlačenie elektrostatického rušenia. Začiatky a konce boli upevnené sťahovacou bužírkou.



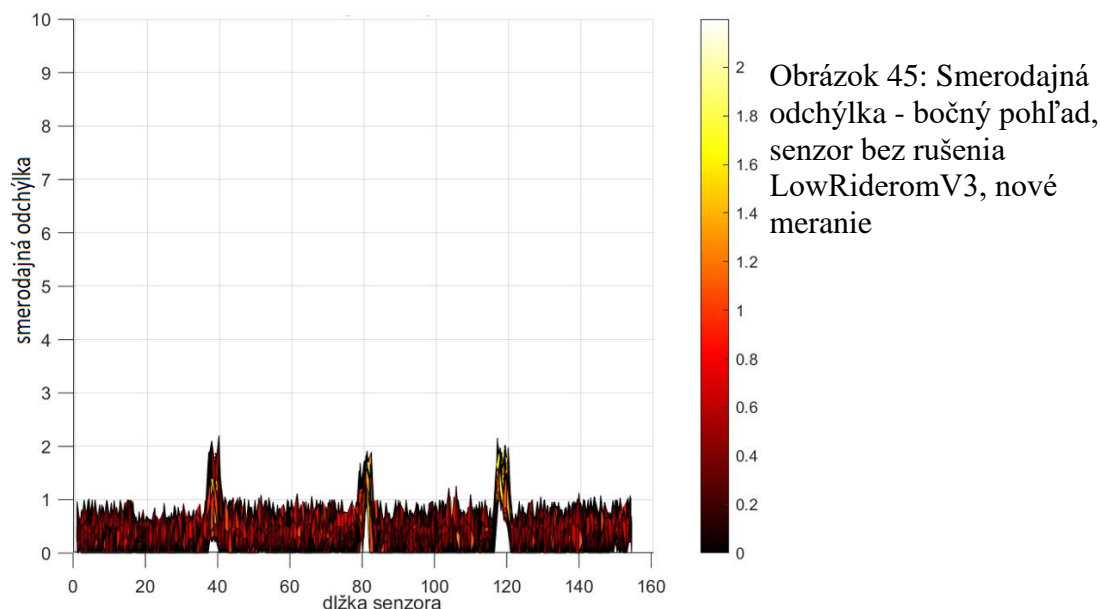
Táto snaha mala minimálny efekt. Viditeľné potlačenie rušenia je takmer zanedbateľné. LowRiderV3 bol na osi Y posunutý v tomto meraní (obr. č.44). Na obrázku č.43 je vidno, že na zariadení bol ponechaný iba jeden feritový krúžok. Ostatné išli preč, počas práce s káblami, keďže neboli užitočné.

Obrázok 43: Navlečenie pocínovaného medeného tienenia na káble



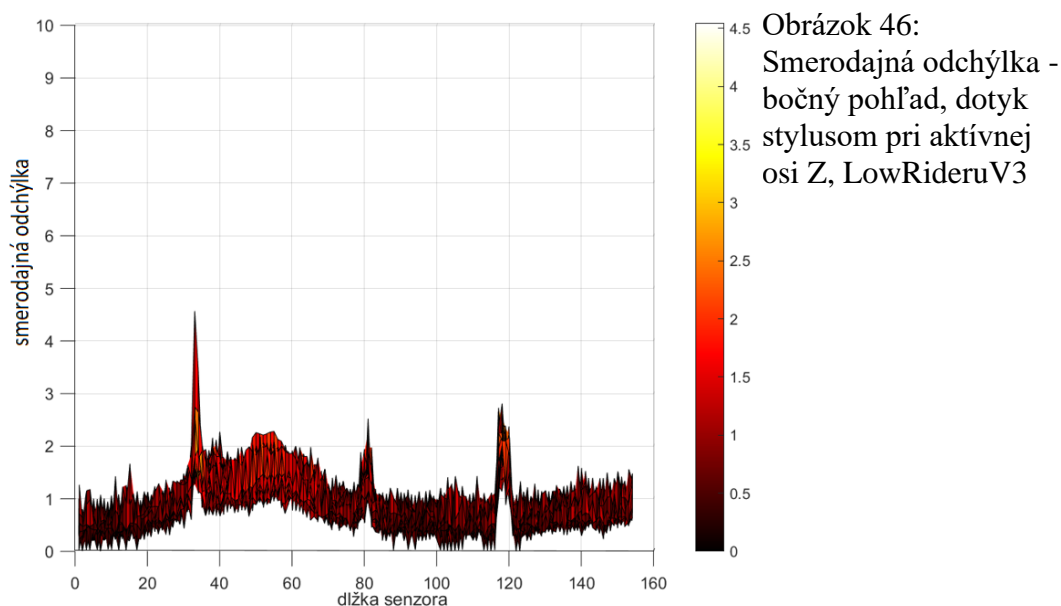
Obrázok 44: Smerodajná odchýlka - bočný pohľad, po aplikovaní tienenia

V tomto novom meraní boli pásy s vyššími hodnotami smerodajnej odchýlky, po celej šírke senzora, na inom mieste v porovnaní s obrázkom č.40. Je to vidno na obrázku č.44 aj napriek rušeniu. Pre lepšiu predstavu je doplnený obrázok č.45, na ktorom je zreteľne vidieť pásy na senzore, ktorý nie je rušený LowRiderom V3.



2.3.3.3 Softvérové vypnutie napájania motorov

Posledný pokus o odstránenie rušenia bolo vypnutie napájania do všetkých motorov, pokiaľ nie sú potrebné, a tak vykonať meranie. Os Z má na starosti zdvíhanie a klesanie celého LowRidera V3, tým pádom aj stylusu. Tá ako jediná musí byť aktívna stále. Keď sú motory, ovládajúce túto os, vypnuté, celá alebo polovica osi Z poklesne. Ak by vtedy zariadenie bolo ovládané automaticky, program by sa musel zrušiť a zariadenie vzhľadom na os Z znova nakalibrovať.



Preto softvérové vypínanie motorov sa nebude týkať ovládania po osi Z. Na obrázku č.46 je vidno, že sa tam šum stále nachádza, ale je približne polovičný. To znamená, že takéto riešenie malo aspoň čiastočný efekt.

Pre potreby tejto práce lepšie riešenie na potlačenie šumu zatiaľ nie je, takže v nasledujúcich meraniach bude takto nastavený LowRiderV3.

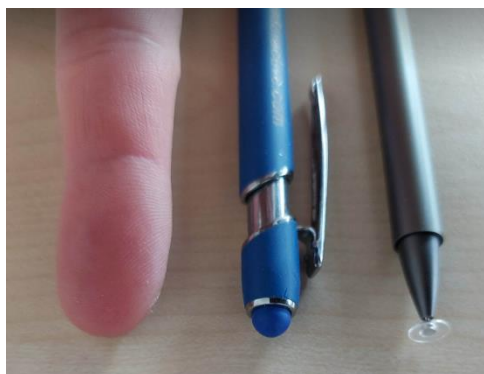
2.3.4 Merania

Pre lepšiu predstavu veľkosti senzora so sklom je pre referenciu pridaná fotka s používanými stylusami.



Obrázok 47: Ukážka veľkosti senzora

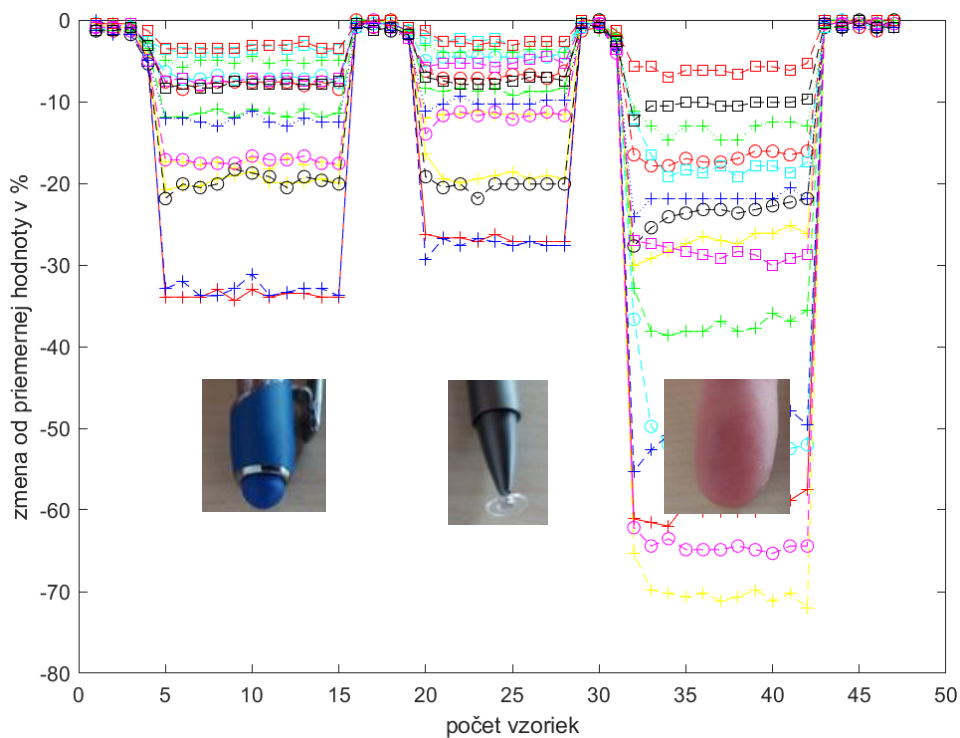
Všetky doterajšie merania, pri ktorých bol použitý stylus, bol práve použitý modrý stylus z FORTES interactive, s. r. o. s dotykovou plochou približne 10.5 mm. Hoci sa predpokladalo, že lepší efekt bude mať stylus s názvom Adonit Neo Lite. Ten je s aktívnym hrotom z hliníka, na ktorom je pripevnený kruhový plast o priemere 9 mm. [39]



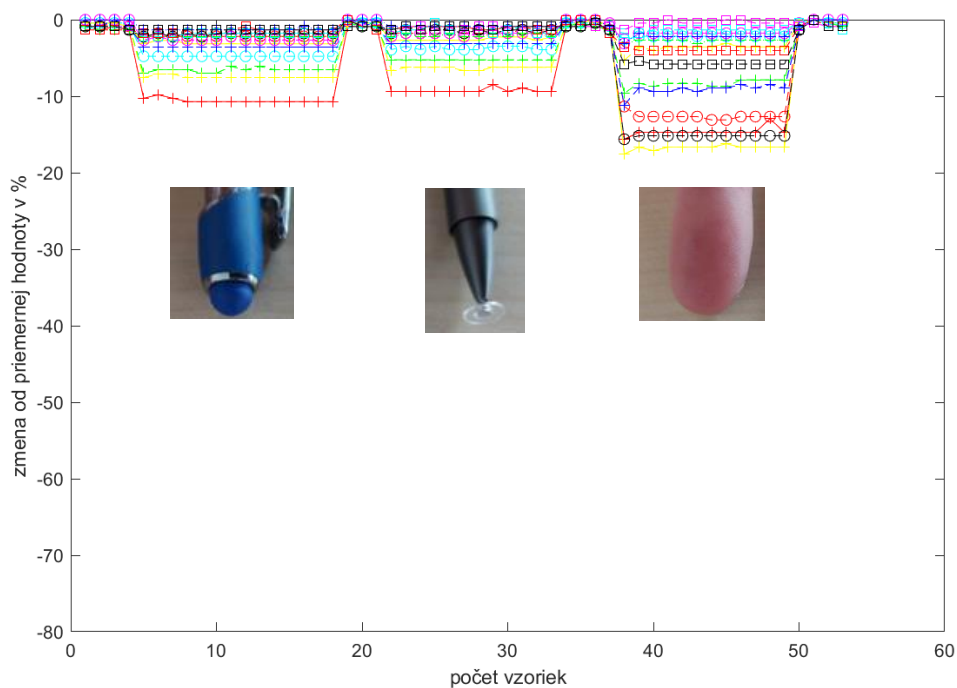
Obrázok 48: Použité "nástroje" na dotyk na senzorech

2.3.4.1 Manuálne merania

V nasledujúcich meraniach bol manuálne priložený na senzor modrý stylus, stylus Adonit a prst. Prvý graf zobrazuje dáta snímané senzorom z medených elektród a nasledovný je senzor zo strieborných nanovlákien. Vysvetlenie, čo znamenajú jednotlivé krivky, bude pri nasledovných grafoch na strane 50.



Obrázok 49: Manuálne meranie, senzor medené elektródy



Obrázok 50: Manuálne meranie, senzor zo strieborných nanovlákien

Z meraní je zjavné, že senzor z medených elektród oproti senzoru zo strieborných nanovlákien je 3-4 násobne citlivejší na dotyk. Keďže modrý stylus spôsobuje silnejšiu reakciu na senzorocho ako Adonit, bol použitý vo všetkých meraniach, kde bol stylus používaný.

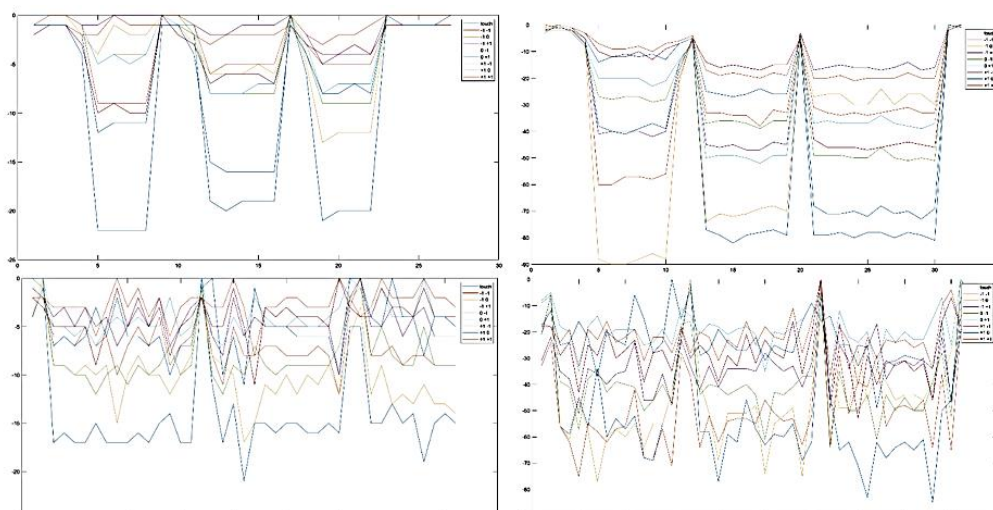
Tiež je dobré si všimnúť, že senzor z medených elektród pri dotyku zareaguje najvýraznejšie dvoma uzlami pri oboch stylusoch, na rozdiel od strieborných nanovlákien, kde najvýraznejšia reakcia bola jedným uzlom. Tento jav môže byť náhodný, záleží od nasledujúcich pokusov.

2.3.4.2 Automatické merania

V kapitole 1.6 bol ako prvý testovací parameter vybraný test presnosti senzoru. Ten by mal byť s maximálnou odchýlkou 2 mm po spracovaní softvérom. Keďže táto práca sa zaoberá rozborom “surových“ dát, získaných priamo zo senzoru, bude sa hodnotiť, ako je senzor schopný dotyk zachytiť a zaznamenať malý posun v koordináciách dotyku. Vzďialenosť medzi uzlami je približne 6 mm na dĺžku a 6.6 mm na šírku.

LowRiderV3 disponuje vysokou presnosťou. Metodika merania, pri ktorom by mohlo byť zachytená schopnosť senzora detekovať malé rozdiely umiestnenia je, aby zariadenie urobilo niekoľko dotykov s posunom medzi sebou o 1 mm. Pozorovanie uzlu, kde dotyk bol vykonaný, spolu s pozorovaním jeho okolia, by malo ukázať, ako sú jednotlivé senzory schopné reagovať a detekovať dotyky.

Na obrázku č.51 je vidno, prečo bola veľká snaha v rámci tejto práce obmedziť rušenie. Ľavý stĺpec grafov je zo senzoru zo strieborných nanovlákien a pravý stĺpec je zo senzoru z medených elektród. Prvý riadok sú grafy dotyku modrým stylusom manuálne a dolný automaticky pomocou LowRideraV3. Na všetkých obrázkoch je vykreslený uzol dotyku s okolitými uzlami, ktoré sú v kontakte s dotknutým uzlom. Na automatických meraniach, hlavne pri senzore z medených elektród je zjavné, že kvalita zašumených dát výrazne zhoršuje prácu s nimi.



Obrázok 51: Ilustratívny obrázok ukazujúci vplyv rušenia na kvalitu získaných dát

V nasledujúcich dvoch grafoch na strane 50, je zobrazené meranie s 15 dotykmi, každý posunutý o 1 mm po osi X zariadenia LowRiderV3 (na šírku senzora). Dotyky boli vykonávané tak, že znížením zariadenia na osi Z, pripevnený modrý stylus urobil dotyk na senzore. Následne po uplynutí 15 s, sa os Z zdvihla, urobil sa posun na osi X o 1 mm a znova sa os Z znížila. Toto pokračovalo, dokým nebolo vykonaných 15 dotykov. Vždy po pohnutí na osi X zariadenia, motor bol odpojený od napájania, aby sa obmedzilo rušenie. Jediné motory, ktoré boli aktívne počas celého merania, boli na osi Z, aby bola zachovaná potrebná poloha a prístroj sa nezosunul. Dôvod, prečo bolo nastavených 15 s na dotyk bol, aby sa nazbieralo dostatočné množstvo dát na ďalšie spracovanie.

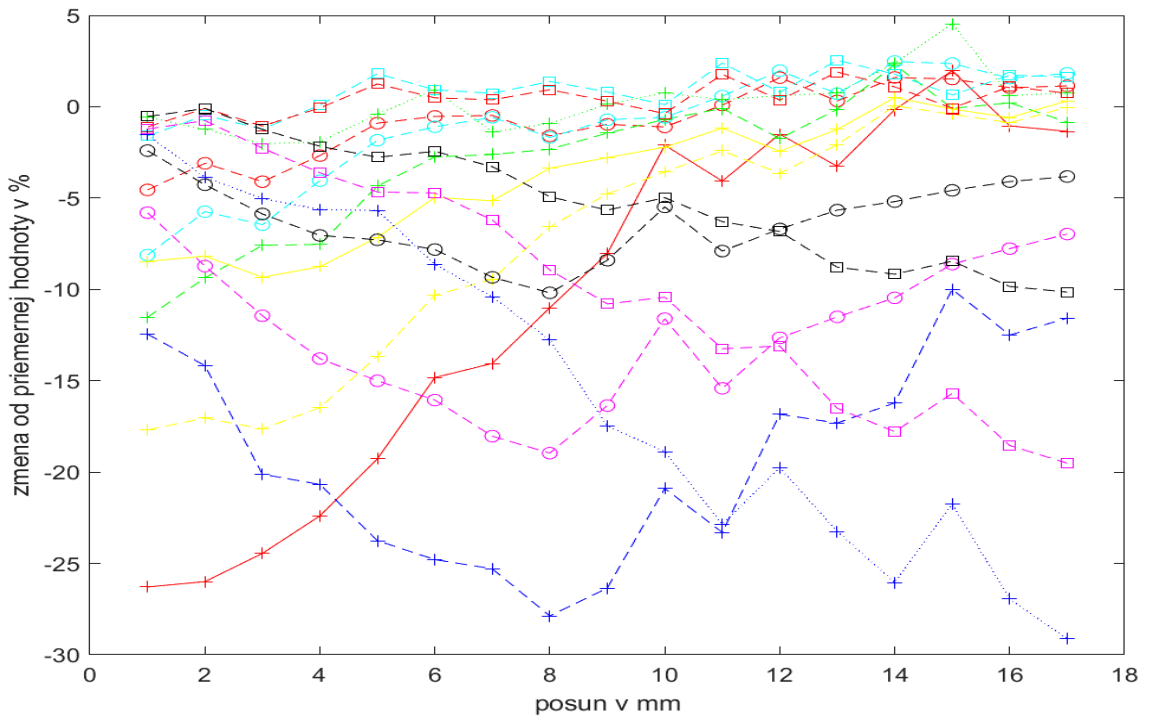
Keďže dáta s posúvanými dotykmi sú zašumené, bolo potrebné z každého dotyku vybrať strednú hodnotu, ktorá by najlepšie reprezentovala zmenu na danom uzle. Preto bol pre túto prácu vytvorený v programe MATLAB algoritmus, ktorý detekoval zo zmeny hodnôt v dátach, že sa jednalo o dotyk. Následne tieto dáta spracoval. Každý dotyk bol zložený z určitého počtu vzoriek. Pre každý posun dotyku o 1 mm, urobil priemernú hodnotu dotyku prednastaveného uzlu na senzore. Takto pre 15 posunutých dotykov spracoval hodnoty z 15 uzlov.

Na začiatku merania bolo zaznamenaných približne 20 vzoriek dát bez dotykov, aby bolo dostatok hodnôt na vypočítanie priemernej ustálenej hodnoty pre uzol. Z tejto hodnoty sa pri každom z 15 dotykov počítal percentuálny pokles, pre každý uzol v okolí dotyku, o koľko percent sa odlišuje od ustáleného stavu.

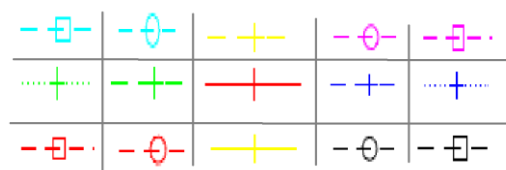
K týmto grafom, na strane 50, je aj vizuálna pomôcka na obrázku č.53, aby bolo jasnejšie, o aké údaje ide. V grafoch je zachytený uzol, pri ktorom bol najbližšie stylus, tým pádom má najväčšiu reakciu. To sa prejavuje v najväčšom poklese od ustálenej hodnoty, daného uzlu. Spolu s týmto uzlom sú na grafe zobrazené aj okolité uzly, aby bolo vidno ako postupným posunom dotykov o 1 mm, sa z predchádzajúceho uzlu, pri ktorom bol najbližšie stylus, presúva stylus k inému uzlu. Tým pádom sa reakcia jednotlivých uzlov mení. Ten, pri ktorom bol stylus, už reaguje menej vzhľadom na svoju ustálenú hodnotu a ten, pri ktorom je stylus bližšie, reaguje viac.

Pri manuálnom meraní senzor s medenými elektródami pri dotyku stylusom, vykazoval zvýšenú aktivitu na dvoch uzloch. V tomto meraní, pri ktorom sa robilo viac dotykov, ktoré boli posunuté vždy o 1 mm, je možné pozorovať, oproti senzoru so striebornými nanovláknami, že reakcia je väčšia nie iba u jedného uzlu, ale pri viacerých.

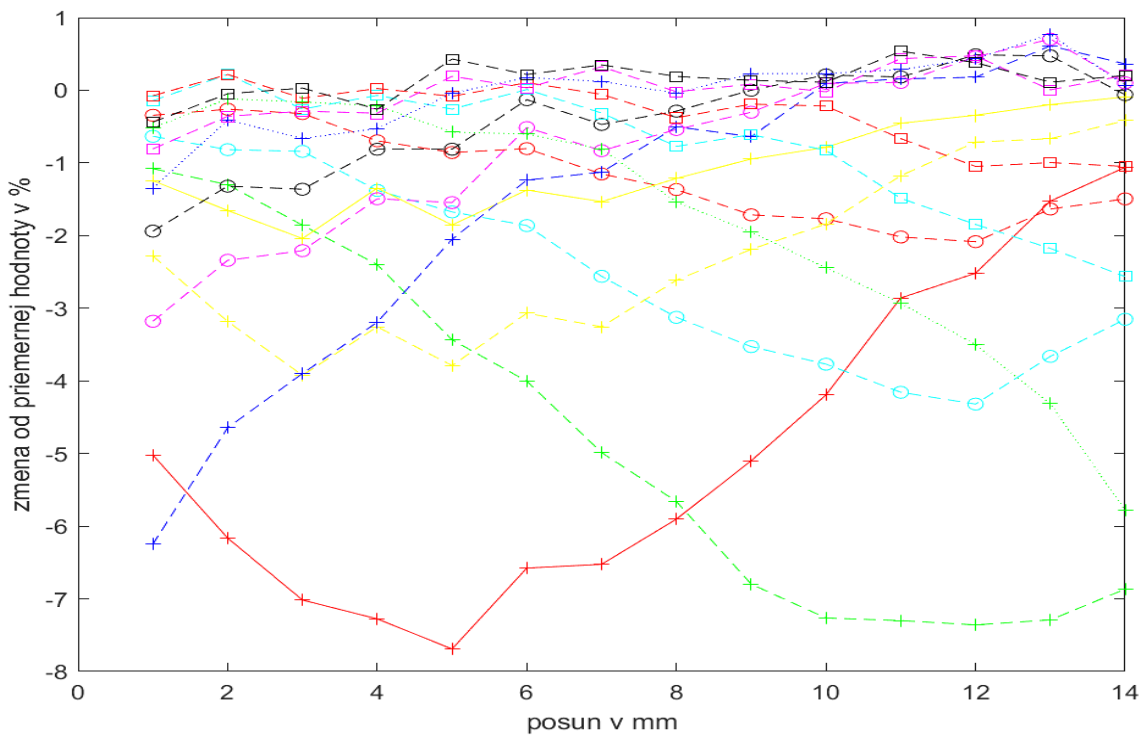
V grafoch, na osi Y, nebolo nastavené fixné rozpätie, aby bolo možné vidieť, ako jednotlivé uzly reagujú na posun dotykov. Z predošlého manuálneho merania je zrejmé, že senzor s medenými elektródami, má omnoho silnejšiu reakciu na dotyk ako senzor zo strieborných nanovláknien. Os X oboch grafov sa mierne líši od celkového posunu o 15 mm, ktorý tam mal byť zaznamenaný. To je spôsobené chybnou detekciou algoritmu, ale pozorovanie trendu na uzloch, to ovplyvní minimálne.



Obrázok 52: Medené elektródy, meranie LowRideromV3, 15 dotykov

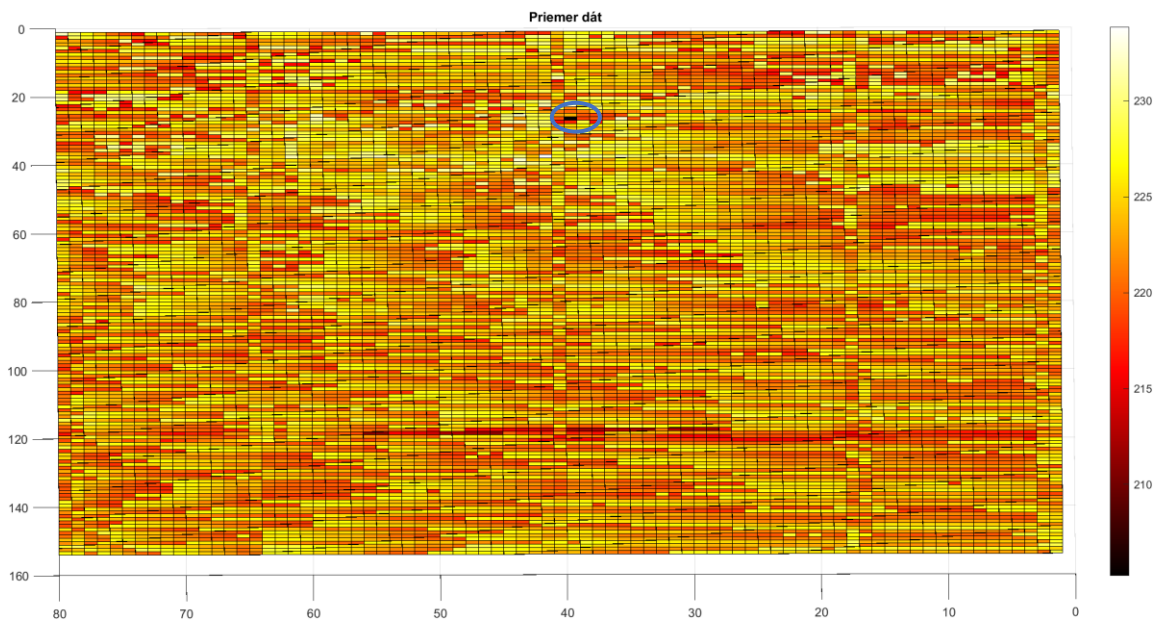


Obrázok 53:
Legenda ku grafom
na určenie
umiestnenia krivky v
matici uzlov

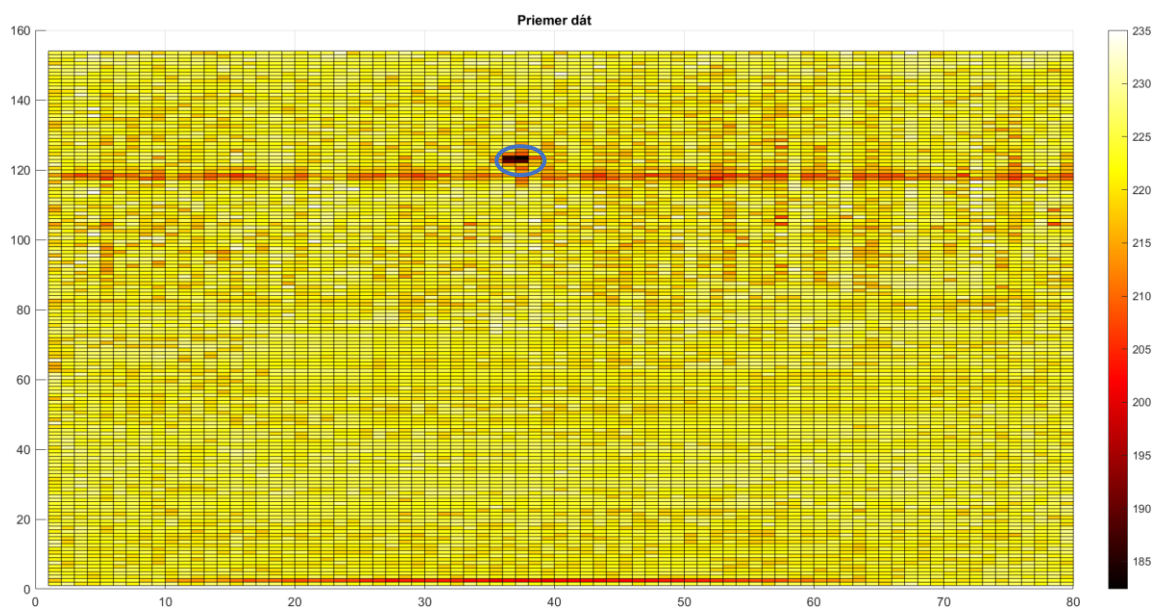


Obrázok 54: Strieborné nanovlákná, meranie LowRideromV3, 15 dotykov

Ako bolo spomenuté pri predošlých grafoch, senzor s medenými elektródami reaguje na dotyk silnejšie pri viacerých uzloch, na rozdiel od senzoru so striebornými nanovláknami. To je možné vidieť na vizualizácii priemeru dát zo všetkých uzlov senzora. Oblasť dotykov na oboch grafoch je zvýraznená modrým kruhom.



Obrázok 55: Senzor zo strieborných nanovlákien, priemer hodnôt dotyku stylusom pomocou zariadenia LowRiderV3



Obrázok 56: Senzor medených elektród, priemer hodnôt dotyku stylusom pomocou zariadenia LowRiderV3

ZÁVER

V teoretickej časti tejto práce boli popísané základné javy, vlastnosti, materiály a vzory kapacitných dotykových senzorov. Po výbere parametrov na testovanie boli zanalyzované alternatívy na zariadenie, ktoré by malo vykonávať automatické testovanie senzorov. Ako víťazný testovací koncept vyšiel LowRider CNC V3.

Konštrukčný čas zariadenia bol niečo vyše 2 mesiacov. Keď sa začala konštrukcia, väčšina potrebných komponentov bola vytlačená na 3D tlačiarňi. Popri zhotovovaní zariadenia sa ešte vyrezávali bočné strany z preglejky a tiež 3-dielná sololitová výplň pre os X.

Až keď bolo zariadenie plne funkčné a testy na presnosť vykonané, bolo zistené, pri testoch s kapacitným senzorom, že zariadenie má značný rušivý vplyv. Tým pádom, namiesto merania senzorov, bola snaha na potlačenie rušenia. Bolo veľmi prekvapivé, že feritové krúžky a ani medené pocínované uzemnené tienenie, nepomohlo k potlačeniu šumu. Ďalšie experimenty vykonané neboli, keďže snaha o potlačenie šumu zabrala niekoľko týždňov a bolo treba vykonávať merania. Ako provizórne riešenie bolo zvolené vypnutie motorov, pokiaľ neboli nevyhnutne potrebné k testovaniu. Takže zostali aktívne iba motory pohybujúce zariadenie po osi Z, na vykonávanie dotykov stylusom. To malo za následok zníženie šumu o približne polovicu, ale stále malo šumenie značný vplyv na namerané dáta pri použití zariadenia. V kapitole 2.1 boli analyzované alternatívy na testovacie zariadenie. Pri konštrukciách ostatných zariadení je dosť možné, že by spôsobovali výraznejšie rušenie na senzoroach, ako LowRiderV3. Hliník alebo oceľ, pod dreveným podkladom, na ktorom by sa senzor nachádzal, by skôr zvýšil úroveň rušenia ako potlačil. Pokiaľ by v budúcnosti tohto testovacieho zariadenia nebola nájdená alternatíva k potlačeniu rušenia, muselo by sa ako riešenie využiť zafixovanie polohy na osi Z. Vďaka tomu, by sa mohli vypnúť úplne všetky motory, počas doby trvania dotyku.

Pri manuálnych meraniach bolo zistené na senzore z medených elektród a aj senzore zo strieborných nanovlákién, že senzory lepšie reagujú na obyčajný modrý stylus z firmy FORTES interactive s.r.o., na rozdiel od zakúpeného Adonit. Senzor z medených elektród sa ukázal značne citlivejší na dotyky ako aj rušenie, oproti senzoru zo strieborných nanovlákién. Pri dotyku mal výrazne silnejšiu reakciu na stylus ale aj prst. Pri senzore z medených elektród, dokonca medzi meraniami pri napájaných motoroch ovládajúcich os Z zariadenia, keď zariadenie bolo nehybné, na notebooku napojenom na senzor, vznikali falošné dotyky spôsobené rušením.

Dáta, získané z meraní oboch senzorov, boli v maticiach, kde každý dátový údaj reprezentoval uzol (horizontálne a vertikálne prekríženie elektród) na senzore. Na senzore z medených elektród aj senzore zo strieborných nanovlákién, bol vykonaný test s 15 dotykmi pomocou LowRiderV3. Každý dotyk bol s posunom o 1 mm. Na grafoch bolo možné pozorovať väčšiu reakciu okolitých uzlov na dotyk pri senzore s medenými

elektrodami, na rozdiel od senzoru zo strieborných nanovlákién. To bolo overené aj pri ďalšom meraní, v ktorom všetky dáta boli spriemerované. Takáto vlastnosť senzora môže byť využitá v prípade, že je záujem o presnejšiu detekciu dotyku, pomocou zložitejšieho spracovania týchto dát. Jednoduchšiu prácu s dátami skôr zaistí senzor zo striebornými nanovláknami. Dôvodom je, že mal väčšinou aktívny jeden uzol pri dotyku a menej aktívnych okolitých uzlov. Nevýhodou môže byť, že jednoduchšie spracovanie bude na úkor presnosti lokalizácie dotyku.

Na záver môže byť zhodnotené, že napriek rušeniu senzorov, bolo zariadenie LowRiderV3 schopné vykonať presné dotyky na senzoroach, na základe ktorých boli vygenerované dáta. To znamená, že zariadenie je obstojný testovací nástroj.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] NATHAN, Chandler, Fenlon WESLEY a Johnson BERNADETTE. How the iPhone Works. *Howstuffworks* [online]. 2007, 20 June 2007 [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: <https://electronics.howstuffworks.com/iphone14.htm>
- [2] MAXWELL, Ian. An Overview of Optical-Touch Technologies [online]. 2007, December 2007, 6 [cit. 2022-11-30]. ISSN 0362-0972/12/2007-026\$1.00 + .00. Dostupné z https://www.researchgate.net/publication/292648083_Camera-Based_Optical_Touch_Technology
- [3] USA. Apple Inc. In: . UNITED STATES SECURITIES AND EXCHANGE COMMISSION Washington, D.C. 20549, 2021, FORM 10-K. Dostupné také z: <https://www.sec.gov/ix?doc=/Archives/edgar/data/320193/000032019321000105/aapl-20210925.htm>
- [4] Capacitor-round-plate potential.svg. In: Wikimedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFPT_capacitor-round-plate_potential.svg
- [5] ZAGKANAS, Vasilis a Giorgos PAPAZOGLU. A complete guide to capacitive touch sensors. Dostupné také z: <https://fieldscale.com/learn-capacitive-sensing/intro-to-capacitive-sensors-electrostatics/>
- [6] Projected Capacitive Touch. Canvys [online]. 2011 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.canvys.com/custom-touch-screen-monitors/touch-screen-pcap-touch/>
- [7] GAO, Shuo, Shuo YAN, Hang ZHAO a Arokia NATHAN. Touch-Based Human-Machine Interaction: Principles and Applications. Switzerland: Springer, 2021. ISBN 978-3-030-68947-6.
- [8] BARRETT, Gary a Ryomei OMOTE. Projected-Capacitive Touch Technology [online]. 2010 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph250/lee2/docs/art6.pdf>
- [9] TERZOPOULOS, Nikolaos. Capacitive touchpad solutions: Capacitive touch solutions for wearable applications [online]. 2022 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.renesas.com/tw/en/document/whp/white-papercapacitive-touch-solutions-wearable-applications>

[10] In: Multimedia 3M [online]. 3M Touch Systems Subsidiary of 3M Company 501 Griffin Brook Park Drive Methuen, MA 01844 U.S.A.: 3M, 2013 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://multimedia.3m.com/mws/media/788463O/tech-brief-projected-capacitive-technology.pdf>

[11] GRAY, Tony. Projected Capacitive Touch: A Practical Guide for Engineers [online]. Switzerland: Springer, 2019 [cit. 2022-12-05]. ISBN 978-3-319-98392-9. Dostupné z: https://www.nejlevnejsi-knihy.cz/kniha/projected-capacitive-touch.html?utm_source=google&utm_medium=surfaces&utm_campaign=shopping%20feed&utm_content=free%20google%20shopping%20clicks%20600-900k&gclid=CjwKCAiAp7GcBhA0EiwA9U0mtsaa1guigOb8X2aWcA4y5jT2NOvRqqfevQk6lWThQpI-yv5tcepFKBoCMuYQAvD_BwE

[12] SILVERPRICE [online]. [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://silverprice.org>

[13] ITO alternatives: Medené elektródy vs. ITO (infographic) [online]. Fieldscale, 2018 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://fieldscale.com/blog/metal-mesh-vs-ito-infographic/>

[14] Products - Silver Nanowires A100UL. In: Novarials [online]. Novarials Corporation [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <http://www.novarials.com/ProductsAgNWsA100UL.html>

[15] Custom Touch Sensors. In: Bifa-tech [online]. BIFA [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: http://www.bifa-tech.com/Custom_Touch_sensor.htm

[16] Moiré pattern. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Moiré_pattern

[17] Remove Moire Lines of LED Screen. In: DREAMWAY [online]. Shenzhen, China: Shenzhen Dreamway Technology Co., Limited [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://www.dreamwaytech.com/remove-moire-lines-of-led-screen/>

[18] WANG, Jianwei, Zhihong ZHANG, Shujie WANG, et al. Superstable copper nanowire network electrodes by single-crystal graphene covering and their applications in flexible nanogenerator and light-emitting diode [online]. China, 2020 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285520301956>. University of Henan Province.

- [19] *ZYTRONIC DATA SHEET* [online]. Zytronic, Company No: 379908 [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://zytronic-inc.com/wp-content/uploads/sites/2/2016/06/Zytronic-Data-Zytouch.pdf>
- [20] MORRISON, Andrew. New Technologies Widen Touchscreen Opportunities [online]. [cit. 2022-12-05]. Dostupné z: <https://www.zytronic.co.uk/news/new-technologies-widen-touchscreen-opportunities/>
- [21] MILGROM, LIONEL. Nanotubes sprout fullerene buds. In: : Hybrid molecules show promise for microelectronics [online]. Royal Society of Chemistry, 2007, 26 FEBRUARY 2007 [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: <https://www.chemistryworld.com/news/nanotubes-sprout-fullerene-buds/3002755.article>
- [22] SUN, Jing a Ranran WANG. Carbon Nanotube Transparent Electrode. : Chapter 14 [online]. China: Chinese Academy of Sciences, 24 [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/1aa7/8e6e8cddb6f3be4bdae0233ef73901e1457e.pdf>
- [23] AKHTAR, Humza a Ramakrishna KAKARALA. A Methodology for Evaluating Accuracy of Capacitive Touch Sensing Grid Patterns. *Journal of Display Technology* [online]. 2014, (VOL. 10, NUM. 8) [cit. 2022-12-07].
- [24] LEE, Jeffrey, Matthew COLE, Jackson LAI a Arokia NATHAN. An Analysis of Electrode Patterns in Capacitive Touch Screen Panels. *JOURNAL OF DISPLAY TECHNOLOGY* [online]. 2014(VOL. 10, 5,) [cit. 2022-12-07].
- [25] Robotic Touch Panel Tester – TakTouch 1000 [online]. In: . [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://tactileautomation.com/shop/touch-panel-test-systems/robotic-touch-panel-tester-taktouch-1000/>
- [26] PrintNC V3.0. In: PrintNC Wiki [online]. [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://wiki.printnc.info/en/home>
- [27] CNC Frézka: 2. CNC FRÉZKA – NÁVRH. In: Kolem domečku [online]. [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://kolem-domecku.cz/2-cnc-frezka-navrh/>
- [28] V1 Engineering Documentation: Low Rider CNC 3. In: V1engineering [online]. [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://docs.v1engineering.com/lowrider/#hardware>
- [29] Forum [online]. [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://forum.v1engineering.com>

- [30] Lowrider cnc accuracy. V1engineering [online]. 2019, Sep, 2019 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://forum.v1engineering.com/t/lowrider-cnc-accuracy/11539>
- [31] Pinball cabinet and others with Lowrider 0.05-0.1 accuracy. V1engineering [online]. 2020, Oct, 2020 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://forum.v1engineering.com/t/pinball-cabinet-and-others-with-lowrider-0-05-0-1-accuracy/21445>
- [32] LowRider 3 BETA, 12v Speed tests: 12v rapid and accelerations speed test. This is 600mm/s X, doesn't really have much time to be at that speed. 300mm/s Y, 65mm/s Z....and whatever that is combined at the end. In: YouTube [online]. [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=4a3HebrFaWk>
- [33] ZHOU, Degen, Sameer SHARMA, Andrea LÜTTGEN a Costas SARRIS. Systematic Design Optimization of Capacitive Touch Sensor Electrode Patterns. IEEE SENSORS JOURNAL [online]. Feb 20, 2020, 9 [cit. 2022-12-28].
- [34] Relative Permittivity - the Dielectric Constant: Common materials and their relative permittivity. [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/relative-permittivity-d_1660.html
- [35] What is a Dielectric Constant of Plastic Materials ? [online]. 17.1.2023 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://passive-components.eu/what-is-dielectric-constant-of-plastic-materials/>
- [36] VIENGINEERING [online]. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.v1e.com>
- [37] *LowRider v3 Size Calculator* [online]. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://docs.v1e.com/lowrider/calculator/>
- [38] *V1 Engineering Forum* [online]. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://forum.v1e.com>
- [39] Alza.cz: Adonit Neo Lite [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/adonit-neo-lite-silver-d6969185.htm>

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

AgNWs	strieborné nanovlákná (silver nanowires)
CZK	české koruny
CNC	počítačové číselné riadenie (computer numeric controll)
ITO	cínom dopovaný oxid inditý (indium tin oxide)
PCAP	projektovaná kapacitancia (projected capacitance)
RX	prímať signál (receive signal)
TX	vysielat' signál (transmit signal)