

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra mikroelektroniky

## Přípravek pro mechanické testy flexibilních plošných spojů

**Martin Edl**

Vedoucí: Ing. Alexandr Lapos, Ph.D.  
Květen 2022



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Edl** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **492096**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Přípravek pro mechanické testy flexibilních plošných spojů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Flexible Printed Circuit Board Mechanical Test Fixture**

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši technického vybavení a norem pro mechanické testy flexibilních plošných spojů.
2. Navrhněte a vytvořte přípravek pro provádění statických a dynamických mechanických testů vzorků flexibilních plošných spojů.
3. Připravte sadu testovacích vzorků flexibilních plošných spojů (pro realizaci použijte standardní výrobní technologii a technologii inkjet dostupnou na katedře mikroelektroniky ČVUT FEL). Na připravených vzorcích proveďte opakované mechanické testy, výsledky analyzujte a zhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] M. Gunda, P. Kumar, and M. Katiyar, "Review of Mechanical Characterization Techniques for Thin Films Used in Flexible Electronics," Crit. Rev. Solid State Mater. Sci., vol. 42, no. 2, pp. 129–152, Mar. 2017, doi: 10.1080/10408436.2016.1186006.
- [2] P. Lall, J. Narangaparambil, B. Leever, and S. Miller, "Flexure and twist test reliability assurance of flexible electronics," J. Electron. Packag. Trans. ASME, vol. 142, no. 3, Sep. 2020, doi: 10.1115/1.4047844.
- [3] C. Kim and C. H. Kim, "Universal testing apparatus implementing various repetitive mechanical deformations to evaluate the reliability of flexible electronic devices," Micromachines, vol. 9, no. 10, p. 492, Sep. 2018, doi: 10.3390/mi9100492.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Alexandr Laposka, Ph.D. katedra mikroelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **01.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Alexandr Laposka, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Alexandru Laposovi, Ph.D. podporu, motivaci a pravidelné konzultace.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 20. května 2022

## Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí zařízení pro testování flexibilních plošných spojů. Účelem tohoto zařízení je charakterizovat flexibilní plošné spoje vytištěné stříbrným inkoustem na PET substrátu a srovnat je s klasickými flexibilními plošnými spoji. Přístroj byl navržen, aby byl schopen provádět ohybové zkoušky podle normy IPC-TM-650 2.4.3. Zařízení bylo navrženo pomocí opensource nástrojů FreeCAD a KiCAD.

**Klíčová slova:** Stříbrný inkjet, Inkjet, Cyklické testování, Ohybová výdrž

**Vedoucí:** Ing. Alexandr Laposa, Ph.D.

## Abstract

This work concerns itself with the design and development of an apparatus for flexible printed circuit board testing. The purpose of the device was to characterise flexible silver inkjet printed circuit boards based on PET substrate and to compare them with current mainstream flexible printed circuit boards. Open source design tools FreeCAD and KiCAD were used in the creation of the apparatus.

**Keywords:** Silver inkjet, Inkjet, Cycle testing, Flextural endurance

## Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Teoretický rozbor</b>	<b>3</b>
2.1 Flexibilní plošné spoje . . . . .	3
2.2 Typy flexibilních plošných spojů .	3
2.2.1 Technologie Inkjet tisku . . . . .	6
2.3 Testovací metody . . . . .	6
2.3.1 IPC-TM-650 2.4.3 . . . . .	7
2.3.2 IPC-TM-650 2.4.3.1 . . . . .	8
2.3.3 Ostatní . . . . .	8
2.4 Testování včetně součástek . . . . .	9
2.5 Výběr ohýbací metody . . . . .	10
2.5.1 Požadavky na metodu . . . . .	10
2.5.2 Popis vybrané konstrukce . . .	10
<b>3 Návrh a realizace přípravku</b>	<b>13</b>
3.1 Lineární aktuátor . . . . .	13
3.1.1 Výběr motoru . . . . .	14
3.1.2 Mechanická konstrukce aktuátoru . . . . .	15
3.2 Elektronika . . . . .	21
3.2.1 Napájení . . . . .	23
3.2.2 Řadič motoru . . . . .	23
3.2.3 Měření diskontinuity . . . . .	24
3.2.4 Měření odporu . . . . .	26
3.2.5 Displej . . . . .	27
3.2.6 Tlačítka a koncové spínače . .	27
3.2.7 Měření teploty a vlhkosti . . .	28
3.2.8 Bzučák . . . . .	29
3.2.9 Konektory . . . . .	29
3.3 Návrh desky plošných spojů . . .	29
3.4 Krabíčka . . . . .	30
3.5 Konstrukce a debug . . . . .	30
3.6 Návrh testovného vzorku . . . . .	31
3.7 Program . . . . .	32
3.7.1 Řazení motoru . . . . .	32
3.8 Návrhy na vylepšení . . . . .	33
<b>4 Závěr</b>	<b>37</b>
<b>Bibliografie</b>	<b>39</b>
<b>A Schéma kontrolní desky</b>	<b>43</b>
<b>B Deska plošných spojů</b>	<b>51</b>
<b>C 3D modely</b>	<b>57</b>
<b>D Testovací flexibilní plosný spoj</b>	<b>69</b>

## Obrázky

2.1 Ukázka různých druhů flexibilních plošných spojů .....	5
2.2 Testovací vzorek a apartura pro metodu 2.4.3 .....	7
2.3 Testovací vzorek a apartura pro metodu 2.4.3.1 .....	8
2.4 Manuální ohýbání kolem tyčky ..	9
2.5 Metoda push-to-flex .....	10
2.6 Univerzální ohýbací zařízení a způsoby ohýbání které je schopné vykonat .....	11
2.7 Zvolená metoda .....	12
3.1 Křivka točivého momentu motoru ST4118X1404-A .....	16
3.2 Uspořádání řemene .....	19
3.3 Upevnění kladky .....	19
3.4 Testovací svorky .....	20
3.5 Hotové svorky .....	20
3.6 Propojovací deska .....	20
3.7 Mezera mezi vozíkem a statickou deskou .....	21
3.8 Posun mezi vozíkem a statickou deskou .....	21
3.9 Testovací aktuátor .....	22
3.10 Blokové schéma řídicí desky ...	22
3.11 Vnitřní zapojení řadiče L298 ..	23
3.12 Zapojení řadiče krokového motoru .....	24
3.13 Zapojení řadiče krokového motoru .....	25
3.14 Zapojení měření diskontinuity .	25
3.15 Blok generátoru konstantního proudu .....	26
3.16 Měření úbytku napětí na vzorku	27
3.17 Vstupní obvod tlačítka .....	28
3.18 Měření teploty a vlhkosti vzduchu .....	28
3.19 Obvod bzučáku .....	29
3.20 Motivy mědi na desce plošných spojů .....	31
3.21 3D render desky plošných spojů	32
3.22 Krabice elektroniky .....	33
3.23 Fotografie osazeného plošného spoje s vývojovým kitem a displejem	34
3.24 Návrh vzorku podle IPC-TM-650 2.4.3 .....	34
3.25 Vzorek na polyimidovém základu podle IPC-TM-650 2.4.3 .....	35
B.1 Render řídicí desky .....	51
B.2 Motiv mědi na vrchní straně řídicí desce .....	52
B.3 Motiv mědi na spodní straně řídicí desce .....	52
B.4 Zhotovená řídicí deska bez vývojová desky NUCLEO a bez displeje .....	53
B.5 Zhotovená řídicí deska .....	53
B.6 Návrh desky pro kontakty na vzorek .....	54
B.7 Propojovací plošný spoj na svorce	55
C.1 Model celého zařízení .....	57
C.2 Příruba motoru .....	58
C.3 Nastavitelná kladka .....	58
C.4 Držák na koncový spínač .....	59
C.5 Podpěra profilu .....	60
C.6 Vozík .....	61
C.7 Pohybující se plocha .....	62
C.8 Nastavitelná statická plocha ...	63
C.9 Svorka na straně vozíku .....	64
C.10 Statická svorka .....	65
C.11 Podložka .....	65
C.12 Spodní část krabice pro elektroniku .....	66
C.13 Uchycení tlačítek na krabici .	66
C.14 Víko krabice elektroniky ....	67
D.1 Návrh vzorku podle IPC-TM-650 2.4.3 .....	69
D.2 Vzorek na polyimidovém základu podle IPC-TM-650 2.4.3 .....	69



## Tabulky

2.1 Doporučený minimální poloměr ohybu standardního flexibilního obvodu v závislosti na počtu vrstev	4
2.2 Vlastnosti běžných materiálů dielektrika .....	5
3.1 Parametry krokového motoru ST4118X1404-A .....	15
3.2 Srovnání vlastností vybraných konstrukcí .....	18



# Kapitola 1

## Úvod

Flexibilní plošné spoje lze dnes nalézt v převážné většině moderních zařízení. Jejich praktické vlastnosti nalézají využití v širokém pásmu aplikací, a tedy existuje i mnoho variací v použitých materiálech. Jedním z těchto materiálů je stříbrný inkoust natištěný na PET substrátu.

Cílem této práce je nejprve provést rešerši flexibilních plošných spojů a zjistit jaké materiály a technologie lze použít k jejich výrobě. Hlavně ale jde o to zjistit jaké normy se používají k testování jejich mechanických vlastností. Výsledky této rešerše by měly být použity pro návrh nějakého praktického testu, který by mohl být aplikován na flexibilní plošné spoje.

Dalším cílem je tento test realizovat. A to znamená navrhnout zařízení, které by bylo schopno takový test provést a poté ho zkonstruovat.

Naposled by měl být navrhnout vhodný testovací vzorek flexibilního plošného spoje, který bude na postaveném zařízení otestován.

Tato práce je rozdělena do dvou hlavních částí – na část teoretickou a část praktickou. V teoretické části se nejprve řeší problematika výroby a práce s flexibilními plošnými spoji. Řeší se jaké materiály se k výrobě těchto obvodů používají a jak se mezi sebou dají srovnat.

Praktická část se ze začátku zabývá konstrukcí lineárního aktuátoru. Zabývá se tím, jaké lineární aktuátory lze použít a jak je lze charakterizovat. Poté popisuje, jak byly navrženy díly aktuátoru. Další sekce je věnována elektronice. Jsou tam rozebrány funkční bloky obvodového schéma. Dále se věnuje návrhu plošného spoje a jeho osazování. Nakonec je poslední sekce věnována problémům, které se při ožívání elektroniky našly a jaké jsou jejich možná řešení.



## Kapitola 2

### Teoretický rozbor

#### 2.1 Flexibilní plošné spoje

Flexibilním plošným spojem se v nejširším pojetí rozumí vodivý spoj na tenkém ohebném substrátu. Takové obvody mohou být doplněny o další vodivé a ochranné vrstvy, konektory a dokonce i elektrické komponenty. Flexibilní plošné spoje tak nabízejí výjimečnou svobodu návrhu.[1]

Velmi důležitou aplikací této technologie je náhrada tradiční kabeláže. Flexibilní spoje jsou velmi malé, lehké a levné, ale stále zůstávají spolehlivé. Výbornou vlastností je také jednoduchost stavby a snadná automatizace výroby[1, 2, 3].

#### 2.2 Typy flexibilních plošných spojů

Flexibilní plošné spoje lze rozdělit do několika kategorií na základě jejich vlastností nebo způsobu výroby. Můžeme je například rozdělit obdobně jako pevné plošné spoje podle počtu vodivých vrstev: na jednostranné, oboustranné a vícevrstvé [1].

Jednostranné flexibilní obvody jsou nejběžnější zvláště kvůli jejich nízké ceně a jednoduchosti. Tyto obvody jsou nejohybnější a tudíž se používají v aplikacích, kde je spoj vystaven dynamickému ohýbání.

Oboustranné obvody umožňují navýšit hustotu datových cest a elektrických komponent. Tyto obvody jsou dražší než jednostranné a jsou méně ohebné. U tohoto typu je také často potřeba vytvořit prokovy umožňující signál přenést na opačnou stranu. Použití prokovů opět zvýší cenu obvodu [1, 3].

Pokud je požadována ještě větší hustota spojů, mohou být použity mnohavrstvé obvody. Ty bývají obvykle drahé a také nemohou dosáhnout takové pružnosti. U tohoto typu je potřeba dbát na to, aby vodivé cesty nebyly vrstveny přímo nad sebou, což způsobí takzvaný *I-beam effect*, který výrazně zhorší ohebnost [3]. Jednotlivé vrstvy obvodu mohou také mít odlišnou tepelnou roztažnost, což může vytvářet vnitřní pnutí, které může prokovy poškodit [1]. Doporučené minimální poloměry ohybu jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Dále je můžeme rozdělit podle použitých materiálů. Zejména důležitý je materiál substrátu, na který jsou hlavně kladeny požadavky na pružnost a



Property	Polyester	Polyimide	Fluorocarbon	Composite	Aramid
Tensile strength	E	E	F	G	H
Flexibility	E	E	E	G	F/G
Dimensional stability	F/G	G	F	G	E
Dielectric strength	G	G	E	VG	G
Solderability	P	E	F	E	E
Operating temperature	105–185°C	105°C	+220°C	150–180°C	220°C
Coeff. of thermal expansion	L	L	H	M	L
Chemical resistance	G	G	E	VG	F
Moisture absorption	VL	H	VL	VH	L
Cost	L	H	H	M	M

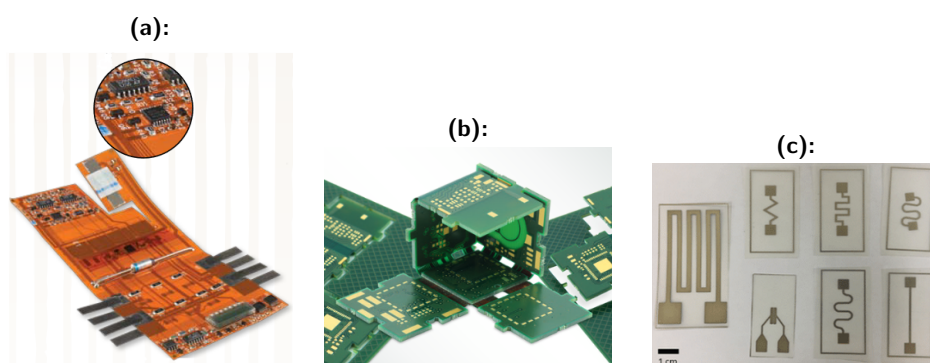
  

E=Excellent	VG=Very Good	G=Good
F=Fair	M=Moderate	
H=High	L=Low	VL=Very Low

**Tabulka 2.2:** Vlastnosti běžných materiálů dielektrika. Převzato z [1].

elektrolytickém růstu mědi se vytvářejí dlouhá vertikální zrna, která jsou náchylná na tvorbu trhlin, zatímco válcovaná žíhaná měď vytváří robustnější podélná zrna. Tuto strukturu a tedy i mechanické vlastnosti lze změnit zahřátím kovu. Elektrolyticky nanosená měď se tedy hodí pro aplikace, kde je obvod ohnut jen konstrukčně nebo při údržbě, zatímco válcovaná žíhaná měď je potřeba pro obvody vystavené dynamickému mechanickému namáhání [1, 2].

Existují také jiné metody pro tvorbu měděného vodiče pro flexibilní plošné spoje, jako je například nanášení přímo na dielektrikum nebo tvorba tenkých vrstev rozprašováním, ale tyto metody jsou vzácné a použité jen v specifických situacích [1].



**Obrázek 2.1:** Ukázka různých druhů flexibilních plošných spojů: (a) Standardní flexibilní plošný spoj s polyimidovým substrátem a měděnými vodiči doplněný o SMD i vývodové součástky (převzato z [3]); (b) plošné spoje typu flex-rigid (převzato z [4]); (c) plošné spoje vytvořené pomocí inkoustového tisku stříbrem (převzato z [5]).

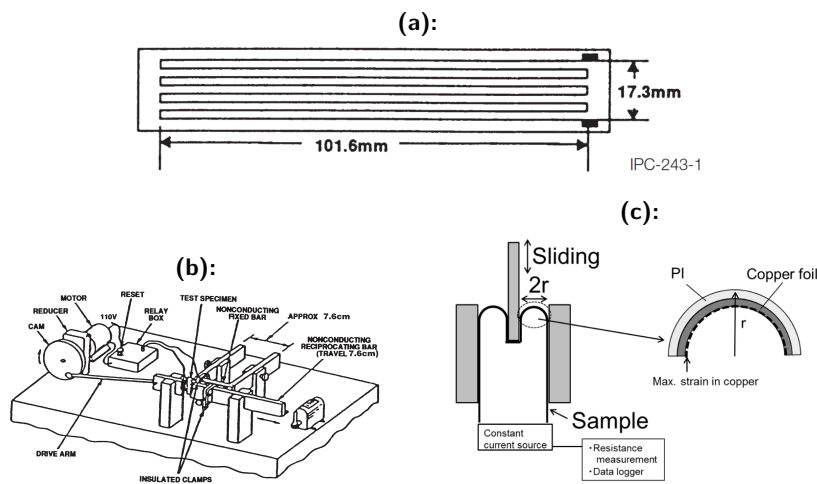




Ke každé metodě je přiřazeno číslo. Pro testování flexibilních plošných v ohybu jsou důležité metody 2.4.3 a 2.4.3.1 [6, 7].

### 2.3.1 IPC-TM-650 2.4.3

Pomocí metody 2.4.3 [6] se testuje výdrž flexibilních plošného spoje při opakovaném ohýbání. Je zde definován testovací vzorek ve formě jednostranného plošného spoje s jednoduchým meandrovým motivem. Testovací aparaturu představuje lineární posuv založený na rotačním motoru a vačce. Ilustrace vzorku a aparatury jsou vidět na obrázku 2.2. Zařízení v dokumentu není komerčně dostupné, ale jeho technické výkresy jsou dostupné na vyžádání od IPC.



**Obrázek 2.2:** Testovací vzorek (a) a aparatura (b) pro metodu 2.4.3. Oba tyto obrázky jsou převzaty z [6]. Uchycení vzorku v aparatuře (c) (převzato z [8]).

Z tohoto dokumentu není zcela zřejmé o jakou metodu ohybu se přesně jedná, ale je přesně definován poloměr ohybu  $6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  a rozsah vzdáleností, ve kterém se má posuv pohybovat  $25 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ . Zařízení by nemělo vykonat více než 10 cyklů za minutu.

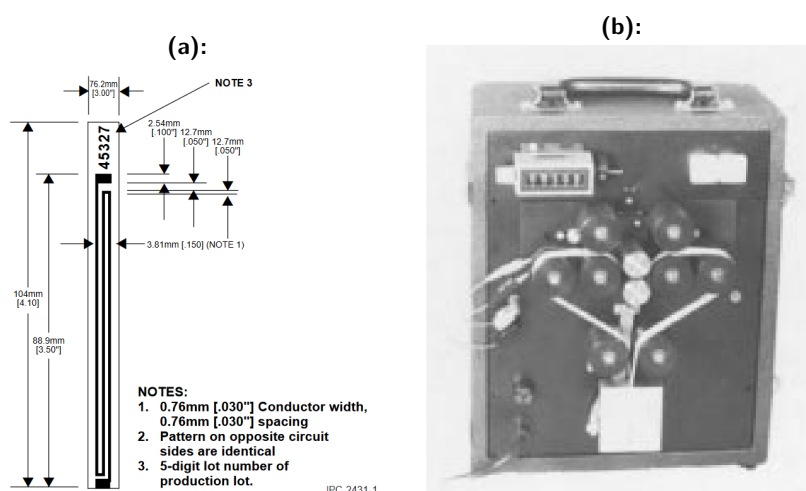
Před testem by měly být vzorky flexibilního plošného pozorně prohlédnuty. Vzorky, které obsahují trhliny nebo jiné výrobní nedostatky, by měly být vyřazeny a nahrazeny za nové. Během testování jsou na vzorky připojeny elektrody a jakmile se objeví diskontinuita, je test vzorku ukončen. Doba, po kterou má diskontinuita trvat, aby byla zaznamenána, není definována. Počet cyklů, který vzorek vydržel je zaznamenán. Výsledkem testu je průměr vypočtený ze tří vzorků.

Tato metoda je relativně benevolentní a konstrukce zařízení, které by bylo schopné vykonat tuto metodu není komplikované.

### 2.3.2 IPC-TM-650 2.4.3.1

Pro provedení zkoušky na únavu ohybem plošného spoje lze také použít alternativní metodu uvedenou v IPC-TM-650 2.4.3.1 [7]. Tato metoda je primárně určena pro stanovení tažnosti flexibilního plošného spoje, ale definuje také zkoušku na únavu ohybem.

Je zde opět specifikován testovaný vzorek, ale může být použit i jiný libovolný kus flexibilního obvodu, pokud vyhovuje rozměrovým omezením a lze na něj připojit elektrody. Pro vykonání zkoušky je použito komerčně dostupné zařízení které ohýbá obvod na obě strany pomocí páru vertikálně pohybujících se válců mezi kladkami. Poloměr válců určuje ohýbací poloměr plošného spoje. Toto zařízení a testovací vzorek je vidět na obrázku 2.3.



**Obrázek 2.3:** Testovací vzorek (a) a aparatura (b) pro metodu 2.4.3.1. Oba obrázky jsou převzaty z [7]

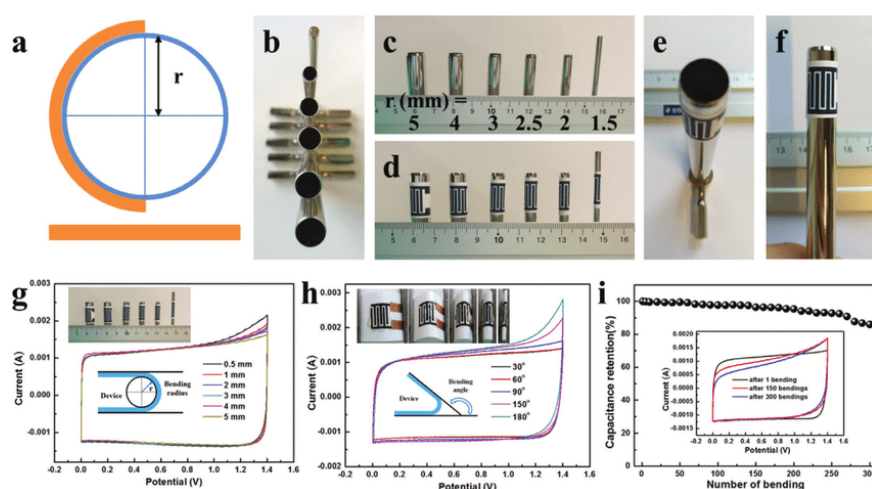
Rozpojení elektrického obvodu na plošném spoji opět indikuje konec životnosti obvodu.

### 2.3.3 Ostatní

Mimo tyto definované normy existují také jiné způsoby jak tyto plošné spoje v ohýbání testovat. Obvykle tyto metody nejsou nijak zvlášť normované, ale to není problém, protože neslouží k charakterizaci ohebných struktur, ale spíše slouží ke srovnání výkonu testovaných vzorků mezi sebou.

První jednoduchou metodou [9] může být prosté manuální ohýbání kolem tyče nebo překládání. V tomto článku autoři testují ohybné superkondenzátory a sledují jak jim s počtem ohybů klesá kapacita. Nevýhody jsou jasné – manuální ohýbání je pracné a tato metoda příliš nelze automatizovat. Tuto metodu můžeme vidět na obrázku 2.4.

Další velmi oblíbenou metodou je metododa *push-to-flex* jako je použita v [10], kde ji autoři použili ke sledování degradace plošného spoje realizovaného grafenem. Tato metoda spočívá v tom, že se vzorek připevní na lineární



Obrázek 2.4: Manuální ohýbání kolem tyčky. Obrázek převzat z [9].

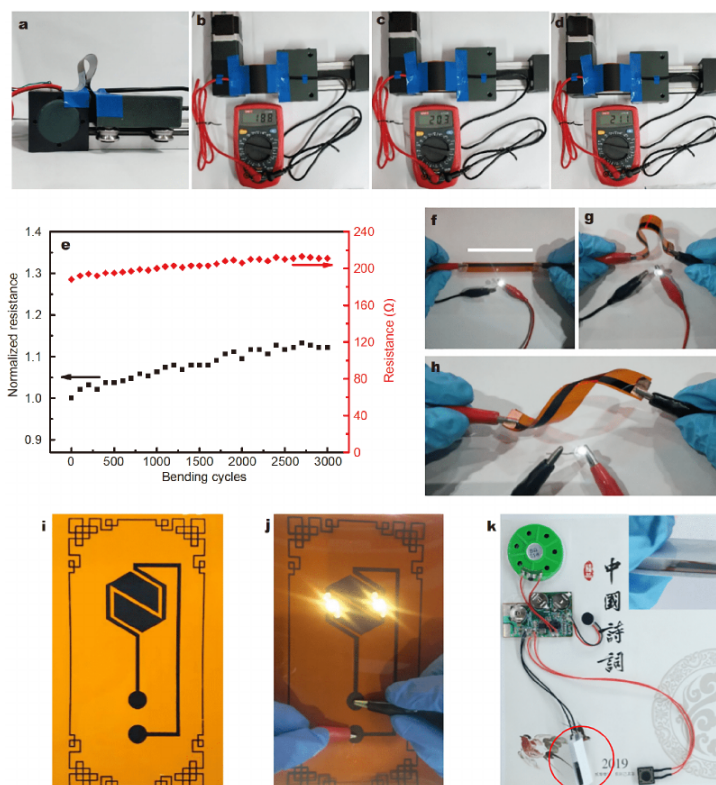
aktuátor a poté je opakovaně stlačován a natahován. Při každém stlačení se vzorek do jedné strany prohne. Tento ohyb není rovnoměrný, a tudíž nemusí být jasné jak velký poloměr ohybu se během cyklu vyskyt, ale za to je tato metoda velmi jednoduchá. Metodu an obrázku 2.5 provedli autoři tak, že páskou přilepili vzorek na lineární aktuátor a odpor vzorku sledovali multimetrem.

Jako příklad komplikovanější ohýbací metody může sloužit [11]. Toto zařízení je schopno vykonávat řadu různých ohýbacích módů a dovede je také kombinovat dohromady. Toto zařízení je také vybaveno senzorem síly a měřením odporu vzorku. Toto zařízení je zobrazeno na 2.6.

## 2.4 Testování včetně součástek

Tyto metody testují jenom vlastnosti substrátu a vodivé vrstvy, ale pro testování s připevněnými elektrickými komponentami nelze najít vhodné normované metody. Na běžné flexibilní plošné spoje tvořené PI substrátem a měděnou vodivou vrstvou jsou komponenty připevněny převážně pájením, které je pro většinu standardních součástek dostačující a nehrozí ztráta elektrického kontaktu nebo dokonce uvolnění součástky. Protože na flexibilní plošné spoje na PET substrátu se stříbrným inkoustem nelze pájet, je problematika uchycení komponenty složitější a spolehlivost tohoto kontaktu je proti pájenému spoji horší.

Pokud jsou na flexibilní plošné spoje osazeny komponenty, zpravidla nejsou navrženy pro dynamické ohýbání a takové obvody bývají namáhány hlavně při instalaci a údržbě. Přesto lze dynamickým ohýbáním otestovat různé způsoby přichycení součástek a navzájem je porovnat.



Obrázek 2.5: Metoda *push-to-flex*. Převzato z [10].

## 2.5 Výběr ohýbací metody

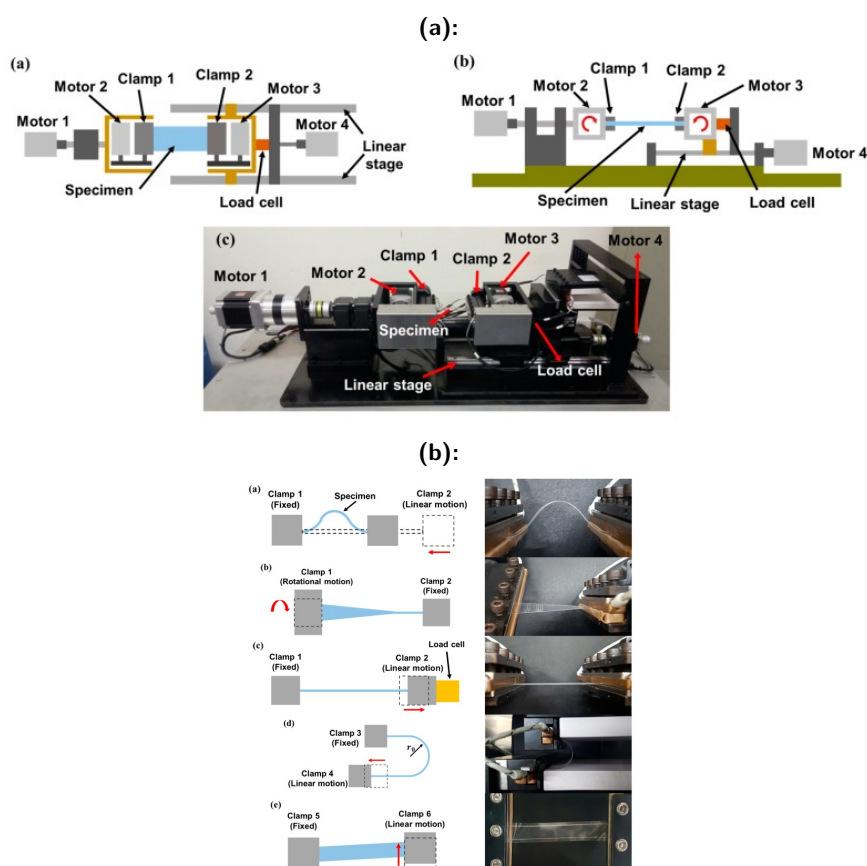
### 2.5.1 Požadavky na metodu

Při volbě vhodné ohýbací metody je kritické nejprve stanovit požadované výstupy z testu a také určit, jaké specifické vlastnosti obvodu se mají charakterizovat.

Byly tedy zvoleny dva hlavní cíle. Prvním cílem zařízení je stanovit výdrž plošného při opakovaném ohýbání metodou podle alespoň jedné běžně používané normy. Druhým cílem je navzájem porovnat způsoby připevnění součástek. Také by metoda měla umožnit měřit změnu odporu vodivé cesty během testu, protože zvyšující se odpor může vypovídat o permanentním poškození vodivého materiálu [5].

### 2.5.2 Popis vybrané konstrukce

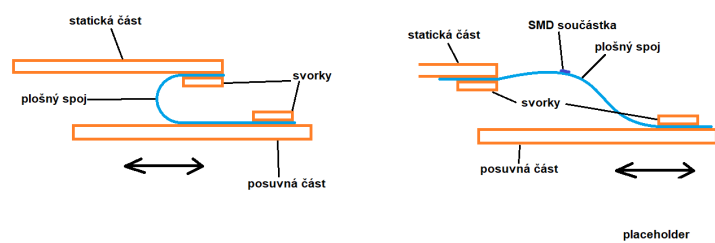
Vzhledem k těmto požadavkům byla vybrána konstrukce umožňující použít metodu IPC-TM-650 2.4.3 a *push-to-flex*. Metoda IPC-TM-650 2.4.3 byla vybrána, protože je jednodušší na implementaci než IPC-TM-650 2.4.3.1. Tato metoda se nehodí pro testování připevnění součástek, proto konstrukce také umožňuje použít metodu *push-to-flex*. Nevýhodou této metody je, že



**Obrázek 2.6:** Univerzální ohýbací zařízení (a) a způsoby ohýbání které je schopné vykonat (b). Oba obrázky byly převzaty z [11]

nelze jednoduše určit poloměr ohybu, ale to nemusí být problém v případě, že vzorky a rozsah posuvu budou pokaždé stejné, a že tato metoda nebude použita pro charakterizaci, ale jen srovnání různých způsobů uchycení.

Tato konstrukce je založená na jednom lineárním aktuátoru. Tento aktuátor posouvá jednu desku paralelně s druhou fixní plochou. Na obou plochách je svorka, do které lze vložit testovaný vzorek do obou směrů. Pokud je vzorek vložen do obou svorek stejným směrem je ohýbán podle metody IPC-TM-650 2.4.3. Vzdálenost ploch lze měnit, a tím měnit poloměr ohybu. Pokud je vzorek přichycen do svorek proti sobě lze testovat vzorek pomocí metody *push-to-flex*. Tato konstrukce je zobrazena na obrázku 2.7.



**Obrázek 2.7:** Zvolená metoda ohýbání plošného spoje připravená pro testování podle IPC-TM-650 2.4.3.1 (vlevo) a pro testování se součástkami (vpravo)

## Kapitola 3

### Návrh a realizace přípravku

#### 3.1 Lineární aktuátor

Základem zařízení je lineární aktuátor, tedy díl, který dovede vykonávat plynulý pohyb po přímce. Pro otestování vzorku bude muset tento aktuátor vykonat až několik tisíc cyklů, proto je výdrž dílu hlavní parametr návrhu. Dále je potřeba, aby byl schopen se pohybovat dostatečnou rychlostí. Čím vyšší rychlostí bude pracovat, tím rychleji může testy provádět. Dalším důležitým parametrem je pořizovací cena a jednoduchost. Naopak přesnost nemusí být tak vysoká, protože testovací norma je v tomto ohledu relativně benevolentní.

Příklad testovací aparatury v normě IPC-TM-650 2.4.3 používá rotační motor, který na přímý pohyb převádí vačka. Pokud ale chceme stejný aktuátor použít pro metodu *push-to-flex*, která vyžaduje větší rozsah pohybu, musíme zvolit flexibilnější metodu.

Podstatnou výhodou aktuátoru s vačkou je také plynulý harmonický pohyb, který testovaný vzorek příliš dynamicky nezatěžuje. Tuto vlastnost by měl složitější systém napodobit. Oproti jednoduchému pohybu, který se snaží udržovat konstantní rychlost, musí plynulý pohyb dosáhnout vyšší rychlosti, pokud chceme zachovat stejný počet testovacích cyklů za minutu. To zvýší požadavek na maximální rychlost aktuátoru. Pokud budeme uvažovat, že pohyb bude ideálně plynulý, můžeme popsat pozici aktuátoru  $x(t)$  v čase  $t$  touto rovnicí

$$x(t) = \frac{R}{2} \cdot (1 - \cos(2\pi Ct)) + x_0, \quad (3.1)$$

kde  $R$  je rozsah pohybu,  $C$  je počet vykonaných testovacích cyklů za jednotku času a  $x_0$  je počáteční pozice aktuátoru. Z této rovnice snadno získáme průběh rychlosti

$$v(t) = \frac{d}{dt}x(t) = \pi RC \sin(2\pi Ct). \quad (3.2)$$

Pojezd se bude pohybovat nejvyšší rychlostí uprostřed rozsahu rychlostí

$$v_{\max} = \max(v(t)) = \pi RC. \quad (3.3)$$

Další derivací  $v(t)$  podle  $t$  získáme průběh zrychlení posuvu

$$a(t) = \frac{d}{dt}v(t) = 2\pi^2 RC^2 \cos(2\pi Ct). \quad (3.4)$$

Opět nalezením maxima této funkce můžeme najít maximální zrychlení

$$a_{\max} = \max(a(t)) = 2\pi^2 RC^2 \quad (3.5)$$

Dosažením hodnot daných normou IPC-TM-650 2.4.3 do rovnice (3.3), tedy 25 mm za rozsah pohybu aktuátoru  $R$  a  $\frac{1}{6}$  testovacího cyklu  $C$  za sekundu (10 cyklů za minutu) dostáváme hodnotu maximální rychlosti  $13,1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  pro ohýbání podle IPC-TM-650 2.4.3. Pro ohýbání metodou *push-to-flex*, která není normovaná bude rozsah pohybu větší – až 100 mm a počet cyklů za sekundu může také být vyšší (ideálně až 1 cyklus za sekundu). Dosažením hodnot pro metodu *push-to-flex* dostáváme postatně větší hodnotu rychlosti  $314 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Tato hodnota odpovídá maximální hodnotě, kterou by byl systém ještě schopen využít.

Možnou alternativu konstrukce s vačkou představují komerčně dostupné lineární aktuátory kompletované jako jeden funkční celek. Tyto zařízení se používají v průmyslu pro řadu aplikací od základní automatizace po použití jako osy CNC obráběcích strojů. Vzhledem k jejich použití bývají obvykle velmi robustní a velmi přesné, ale drahé. Pro ohýbání plošných spojů jsou až zbytečně přesné vzhledem k tomu, že norma předepisuje možnou chybu  $\pm 5 \text{ mm}$ .

Jednoduše ale lze zkonstruovat aktuátor, který našim požadavkům postačí. Vzhledem k popularizaci open source 3D tiskáren jsou díly pro konstrukci jednoduchých lineárních aktuátorů běžně dostupné za nízkou cenu. Při použití v tiskárnách jsou také vystaveny opakovanému namáhání a relativně vysokým rychlostem, tedy podobným podmínkám jako jsou potřeba pro tuto aplikaci.

### 3.1.1 Výběr motoru

Jako motor byl vybrán běžný krokový motor ve formátu NEMA 17. Výhodou krokového motoru je snadné a přesné řízení polohy. Pokud budeme znát počáteční polohu motoru a řadič motoru bude počítat krokové signály posílané do motoru, můžeme jeho polohu sledovat a nastavovat i bez externích senzorů. Motory ve formátu NEMA 17 mají vždy stejnou přírubu, tedy lze v případě nedostatečného výkonu vyměnit za silnější. Významnou nevýhodou těchto motorů je nízká maximální rychlost.

Z katalogových parametrů motoru můžeme určit maximální rychlost motoru [12]. Pokud bude řadič přepínat napětí dostatečně rychle, může dojít k tomu, že díky indukčnosti vinutí nebude proud vinutím otočen na maximální hodnotu



a tedy bude s rostoucí rychlostí klesat i točivý moment. Pokud vinutí tohoto motoru budeme brát jen jako indukčnost můžeme vyjít z rovnice pro změnu proudu induktorem při přiložení napětí

$$U = L \frac{dI}{dt}, \quad (3.6)$$

Kde  $L$  je indukčnost vinutí a  $dI$  je změna proudu v induktoru za jednotku času  $dt$ . Během jednoho kroku se musí po přepólování napájecího napětí  $U_z$  proud změnit z hodnoty  $-I_{\max}$  na hodnotu  $+I_{\max}$  (nebo obráceně), tedy absolutně o  $2I_{\max}$ . Za předpokladu, že průběh proudu bude lineární můžeme tento vzorec tedy poupravit a získat vztah pro minimální délku jednoho kroku

$$\Delta t = \frac{2L_{\text{vinutí}} \cdot I_{\max}}{U_z}. \quad (3.7)$$

Maximální otáčky motoru budou nepřímo úměrné minimální délce jednoho kroku a také nepřímo úměrné počtu kroků na jednu otáčku. Úpravou dostáváme vztah pro maximální frekvenci otáček motoru

$$f_{\max} = \frac{1}{N \cdot \Delta t} = \frac{U_z}{2 \cdot N \cdot L_{\text{vinutí}} \cdot I_{\max}}, \quad (3.8)$$

kde  $f_{\max}$  je maximální frekvence otáček,  $\Delta t$  je minimální délka kroku,  $N$  je počet kroků na celou otáčku motoru,  $L_{\text{vinutí}}$  je indukčnost vinutí motoru a  $I_{\max}$  je maximální proud vinutím. Z tohoto vztahu je vidět, že s vyšší hodnotou napájecího napětí je možné dosáhnout vyšší rychlosti.

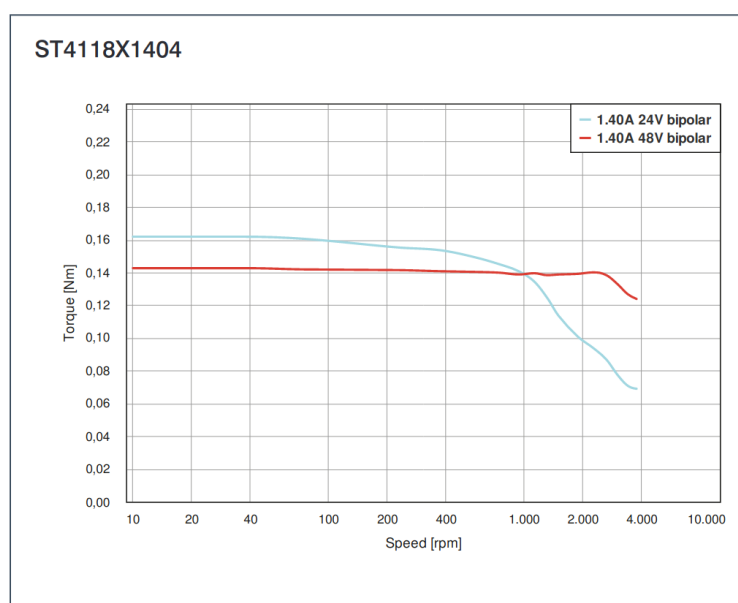
Specificky byl vybrán motor ST4118X1404-A [13] s parametry uvedenými v tabulce 3.1. Dosazením těchto hodnot a hodnoty napájecího napětí  $U_z = 12$  V, do rovnice dostáváme maximální frekvenci otáček zhruba 13,4 otáček za sekundu nebo zhruba 800 otáček za minutu. Na obrázku 3.1 jsou zobrazeny křivky točivého momentu tohoto motoru pro 24 V a 48 V. Je vidět, že vypočtená hodnota je zhruba čtvrtinová oproti hodnotě otáček zlomu v charakteristice pro 48V napájení. Při srovnání s 24V charakteristikou je toto méně zřejmé.

Indukčnost vinutí	1,6 mH
Proud vinutím	1,4 A
Přídržný kroutící moment	9 N · cm
Úhel kroku	1,6°

**Tabulka 3.1:** Parametry krokového motoru ST4118X1404-A. Převzato z [13].

### 3.1.2 Mechanická konstrukce aktuátoru

Pro konstrukci můžeme využít dvě základní metody: tahat pojezd pomocí řemene, nebo s ním pohybovat pomocí matice na závitové tyči [14]. Výhodou



**Obrázek 3.1:** Křivka točivého momentu motoru ST4118X1404-A. Převzato z [13].

závitové tyče je zejména vyšší jemnost pohybu, možnost vyvíjet vyšší sílu a také bývají jednodušší na konstrukci. Zatímco aktuátory používající řemeny mohou dosáhnout vyšších rychlostí, ale jsou složitější a méně přesné.

### ■ Aktuátor se závitovou tyčí

Konstrukce se závitovou tyčí přímo připojí závitovou tyč na hřídel motoru. Na této tyči je nasazena matice. Pokud se závitovou tyčí otáčí a matice se urzuje v orientaci, tak se rotační pohyb převádí na lineární pohyb matice. Pro srovnání byly vybrány dvě závitové tyče: běžná metrická závitová tyč M8 se stoupáním 1,25 mm a závitová tyč Tr8×8 se stoupáním 8 mm. Závitová tyč M8 je levná a snadno dostupná, zatímco Tr8×8 má větší stoupání, ale je dražší.

Závitová tyč posune s každou celou otáčkou motoru pojezd o jednu vzdálenost stoupání závitu, tedy závit s větším stoupáním umožňuje dosáhnout vyšší maximální rychlosti za cenu sníženého rozlišení. Tedy maximální lineární rychlost

$$v_{\max, \text{závit}} = f_{\max} p, \quad (3.9)$$

kde  $f_{\max}$  je maximální frekvence otáček krokového motoru a  $p$  stoupání závitu. Po dosazení dostáváme pro řešení se závitovou tyčí M6 maximální rychlost  $16,8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  a pro řešení s tyčí Tr8×8 rychlost  $107 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Protože na posunutí o délku jednoho stoupání závitu musí motor vykonat jednu otáčku a na jednu otáčku musí motor vykonat určitý počet kroků, je tedy rozlišení posuvu

$$\Delta x_{\text{závit}} = \frac{s}{N}, \quad (3.10)$$

kde  $s$  je stoupání závitů a  $N$  je počet kroků na celou otáčku motoru. Použitím této rovnice vychází pro tyč M6 teoretické rozlišení  $6,25 \mu\text{m}$  a  $40 \mu\text{m}$  pro závitovou tyč Tr8×8.

### ■ Aktuátor s řemenem

Při použití řemene je řemen napnut mezi osou motoru s řemenicí a druhým pevným bodem s kladkou. Pro toto využití je vhodný ozubený řemen, protože skluz řemenu hrozí až v extrémních případech. V případě skluzu bychom ztratili povědomí o pozici pojezdu. Každá otáčka motoru otočí také řemenici o celou jednu otáčku a tedy posune řemen o tolik zubů kolik má řemenice. Výsledná maximální rychlost tohoto aktuátoru lze tedy spočítat rovnicí

$$v_{\text{max,řemen}} = f_{\text{max}} p M, \quad (3.11)$$

kde  $f_{\text{max}}$  je maximální frekvence otáček krokového motoru,  $p$  je rozteč zubů řemene a  $M$  je počet zubů na řemenici. Pro srovnání byl vybrán řemen GT2, primárně kvůli jeho snadné dostupnosti a dostupnosti řemenic. Tento řemen má rozteč zubů  $2 \text{ mm}$ . Dále byla zvolena řemenice s 20 zuby. Pro toto uspořádání je tedy maximální lineární rychlost  $536 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Rozlišení lze také jednoduše určit analogicky jako u aktuátoru se závitovou tyčí – vykonání jedné otáčky musí motor vykonat určitý počet kroků a každá tato otáčka posune řemen o počet zubů na řemenici. Rozlišení lze tedy spočítat tímto vztahem

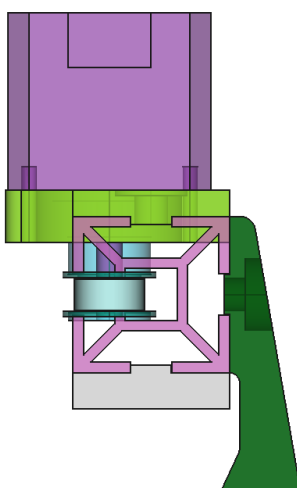
$$\Delta x_{\text{řemen}} = \frac{Mp}{N}, \quad (3.12)$$

kde  $M$  je opět počet zubů na řemenici,  $p$  rozteč zubů na řemenu a  $N$  je počet kroků motoru na celou otáčku. Pro předem zmíněnou konfiguraci vychází rozlišení  $200 \mu\text{m}$

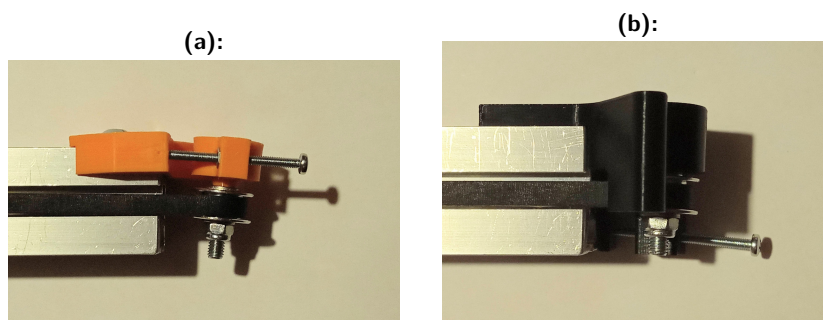
### ■ Srovnání konstrukcí

Na srovnání tedy máme různé konstrukce. Vypočtené vlastnosti těchto konstrukcí jsou uvedeny v tabulce 3.2. Finančně vycházejí všechny konstrukce zhruba stejně, protože nejdražší položku tvoří motor, který je u všech těchto konstrukcí stejný. Z této tabulky vidíme, že konstrukce s řemenem může dosáhnout výrazně vyšší rychlosti než posuvy se závitovými tyčemi. Proto tedy byla vybrána konstrukce s řemenem. Oproti i našim optimistickým požadavkům vyplývajícím z testovacích metod má rozumnou rezervu rychlosti.





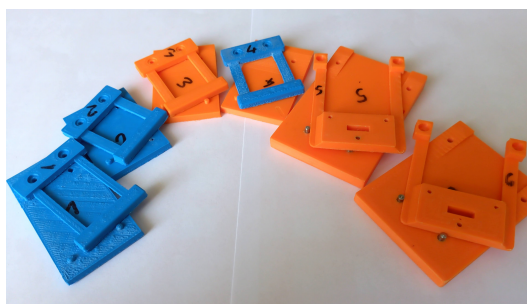
**Obrázek 3.2:** Uspořádání řemene.



**Obrázek 3.3:** Upevnění kladky na profilu. První verze s ohnutou kladkou (a) a druhá verze, kde tento problém byl opraven (b).

uchycení by měl být šetrný ke vzorku, mít co nejmenší vůli a měl by umožnit elektrický kontakt se vzorkem. Také by bylo dobré, kdyby nebyly potřeba žádné nástroje pro vložení a vyjmutí vzorku. K tomuto účelu byla otestována řada návrhů tištěných svorek. Tyto svorky využívají dva kolíčky, které se zarovnají s dírami na testovaném vzorku. Kolíčky brání vzorku v pohybu a rotaci a plastová svorka zabraňuje vzorku z kolíčků vypadnout. Tyto kolíčky byly nejprve tištěné, ale poté co se začly vytrhávat, byly nahrazeny kátkými úseky ocelové tyčky. Na svorce která bude při testování statická je přimontován plošný spoj s pružnými kontakty. Tyto kontakty dosednou na testovací plošky připravené na vzorku. Do těchto svorek navíc lze vzorek připevnit obráceně, a tedy testovat jinou metodou. Testovací svorky jsou vidět na obrázku 3.4, finální svorky jsou vidět na obrázku 3.5.

Na jedné straně testovaného vzorku musí být vzorek připojen na měřící obvody. Protože svorka na statické nastavitelné části se nebude tolik hýbat, tak by se mělo elektrické připojení vzorku řešit právě tady. Toho by šlo docílit nalisováním konektoru na vzorek nebo připojením vodivým lepidlem a nebo případně pájením, pokud to substrát vydrží. Poté je ještě možnost vodivý



**Obrázek 3.4:** Testovací svorky. Na vzorku 2 a 4 jsou utržené tištěné kolíky.



**Obrázek 3.5:** Hotové svorky.

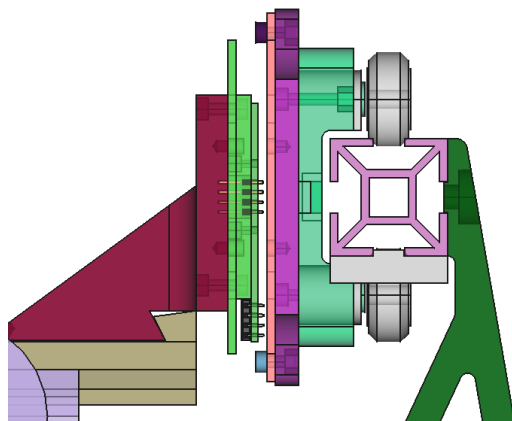
kontakt vytvořit jen dotykem. Dá se najít celá řada pružných kontaktů, které jsou používané například pro automatizované testování desek plošných spojů. Dostupné jsou také v řadě jako takzvané *pogo piny* s roztečí 2,54 mm jako standardní pinový header. Tento kontakt můžeme vložit do svorky tak, aby při se při sevření vytvořil dobrý vodivý spoj. Pro tento účel byl navržen malý plošný spoj (viz obrázek 3.6)



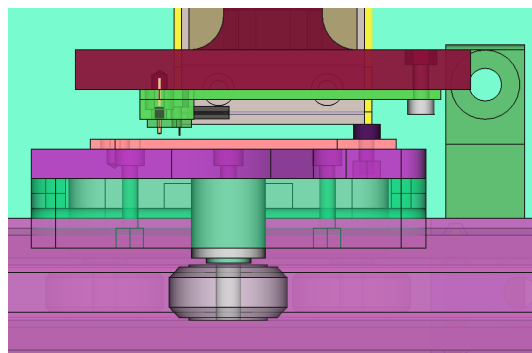
**Obrázek 3.6:** Propojovací deska. Nahoře je konektor pro kabel do řídicí desky, uprostřed jsou připájeny kontaktní piny.

Z hlediska návrhu těchto svorek byl největší problém s výškou kontaktovací svorky. Dle normy IPC-TM-650 2.4.3 musí vzdálenost ploch, mezi kterými se obvod valí, být  $12 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ . Díky tomu, že jsou propojovací kontakty

posveny vertikálně, je propojovací svorka celkem vysoká a mezera mezi vozíkem a statickou svorkou velmi malá. Tato mezera je vidět na obrázku 3.7. V modelu je mezi kontaktovacím plošným spojem a svorkou vozíku jen 2,4 mm, a to bez hlavy M2 šroubu. Také se kvůli pružině v kontaktu celá svorka mírně povysune. Proto byl statický spoj mírně posunut podél profilu, aby se nemohly svorky střetnout, i kdyby se mírně překrývaly.



**Obrázek 3.7:** Mezera mezi vozíkem (vlevo) a statickou deskou (vpravo).



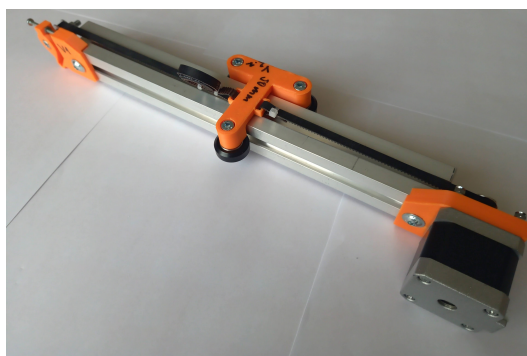
**Obrázek 3.8:** posun mezi vozíkem (dole) a statickou deskou (nahore). Pokud se začne vozík pohybovat, nemůže o statickou svorku zavádít (vozík je v domovské pozici a může se pohybovat jen doleva).

Statická svorka aktuátoru byla připevněna na mikroskopový posun, který se ovládá manuálně. Tak je možné ovládat a přesně nastavit poloměr ohybu.

Z testovacích dílů byl postaven jednoduchý testovací aktuátor pro pokusy s motorem a ověření mechanického návrhu. Tento aktuátor je vidět na obrázku 3.9.

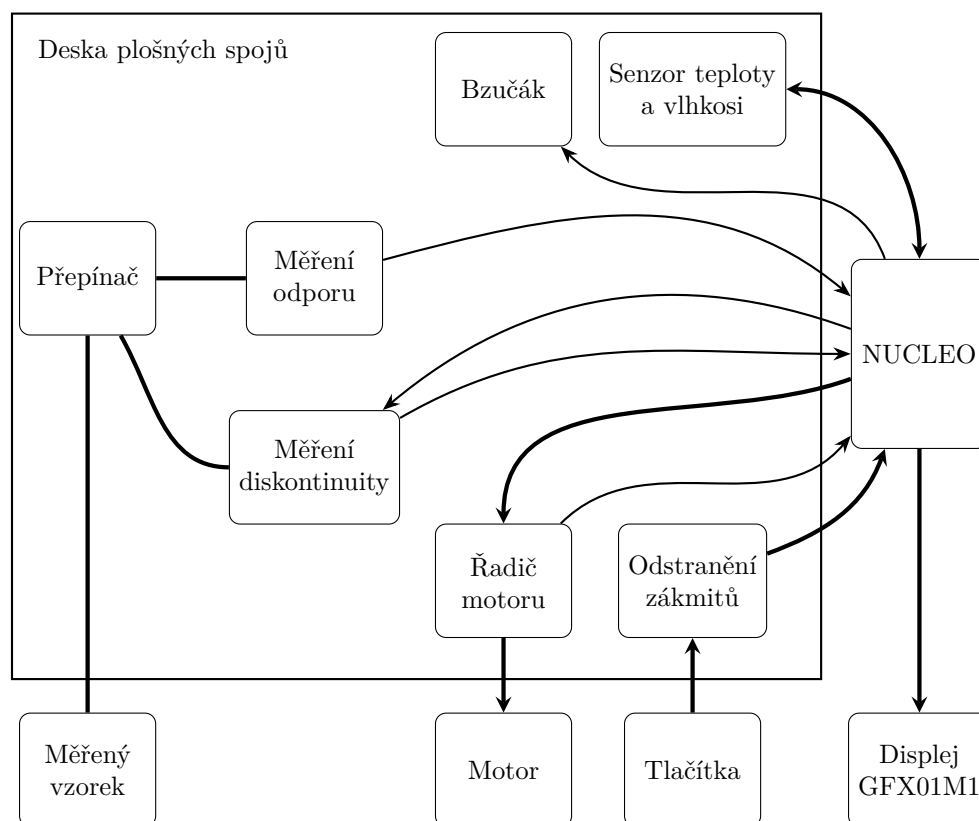
## ■ 3.2 Elektronika

Pro ovládání a monitorování zařízení je potřeba vytvořit kontrolní obvod. Tento obvod musí být v prvé řadě schopen ovládat krokový motor, počítat



**Obrázek 3.9:** Testovací aktuátor.

vykonané cykly a monitorovat kontinuitu vzorku. Bylo by také vhodné informace o stavu zařízení zobrazovat na nějakém displeji. Blokové schéma řídicí desky je zobrazeno na obrázku 3.10



**Obrázek 3.10:** Blokové schéma řídicí desky

Návrh obvodového schéma a desky plošných spojů byl proveden v open-source programu KiCAD. Jako základ tohoto kontrolního obvodu byla využita vývojová deska NUCLEO-F411RE. Tato deska zprostředkovává 32bit mikroovladač STM32F411RE a umožňuje ho snadno programovat přes USB rozhraní. Vývody tohoto mikroovladače jsou připojeny na dvě matice pinů.



### 3.2.1 Napájení

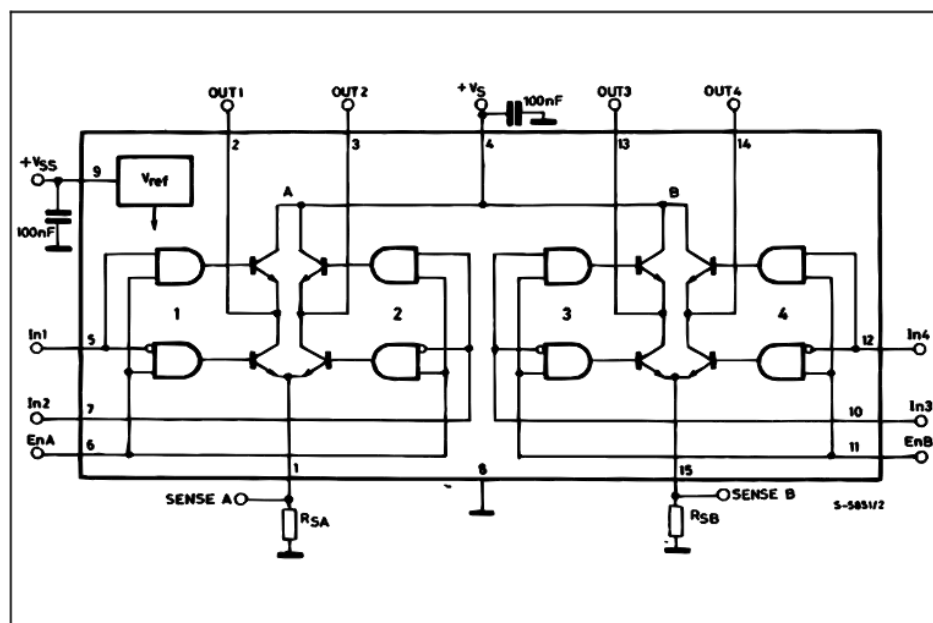
Pro napájení tohoto obvodu byl vybrán průmyslový napájecí zdroj na 12 V. Toto napětí bylo vybráno kvůli tomu, že je velmi často používáno a tedy lze snadno sehnat součástky pracující s tímto napětím. Vyšší napětí by bylo výhodné, protože by umožnilo vyšší rychlosti motoru, ale ovládací deska NUCLEO může být externě napájena jen ze zdroje s maximálním napětím 12 V, tedy by byl potřeba DC/DC měnič zdroj pro snížení napětí na hodnotu tolerovatelnou touto deskou. Deska NUCLEO obsahuje pár snižujících DC/DC měničů na napětí 5 V a 3,3 V. Tyto napěťové sběrnice mohou být rozvedeny i mimo tuto desku a můžeme si tak ušetřit práci s návrhem napájecí sítě.

Navíc byla na desce přidána 3A PolyFuse pojistka a dioda jako ochrana proti přepólování.

### 3.2.2 Řadič motoru

Pro ovládání motoru byl využit integrovaný obvod L298 [15]. Tento čip je relativně známý a snadno dostupný. Jde o dvojitý H-můstek, který dovede pracovat při proudech až 2 A na vinutí. Existuje v SMD variantě i ve tradiční montáži. Vybrána byla varianta v tradiční montáži kvůli možnosti přimontovat chladič. Na obrázku 3.11 je zobrazeno vnitřní uspořádání uvnitř tohoto řadiče.

BLOCK DIAGRAM



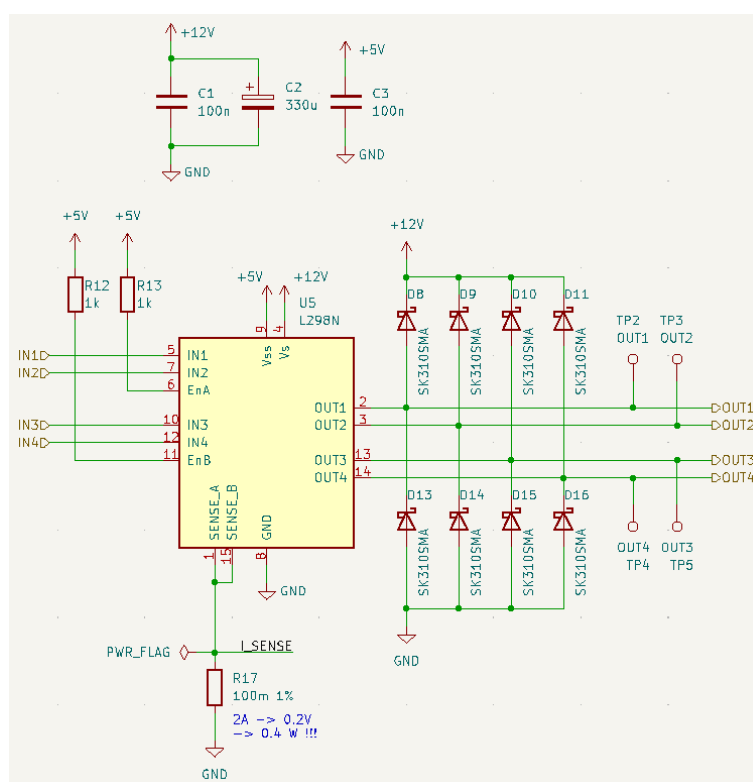
Obrázek 3.11: Vnitřní zapojení řadiče L298. Převzato z [15].

Tento čip také obsahuje řadičí logiku vstupu, tedy nemusíme řešit vkládání mrtvého času a také se nemusíme zabývat problematikou řazení výkonových tranzistorů H-můstku. Také obsahuje vstupy, které umožňují odpojit tranzistory kompletně. Tento řadič používá specificky bipolární tranzistory, tak

můžeme očekávat určitý úbytek napětí. Katalogový list tohoto řadiče [15] uvádí maximální totální úbytek napětí  $V_{CEsat}$  až zhruba 3 V pro 1 A proudu a až 5 V pro 2 A. Snížená efektivita tolik nevádí, protože je systém napájen ze sítě, ale toto ztrátové teplo by mohlo přehřát součástku. V případě, že by se řadič přehříval, můžeme pulzně modulovat proud vinutí a tak snížit průměrný proud.

Tento čip má oddělené napájení pro logiku a pro napájení H-můstku. Pro napájení logiky bylo použito minimální napětí 5 V. Logiku lze stále ovládat 3V3 signály bez použití obvodů pro změnu úrovně.

Zapojení bylo doplněno o ochranné diody a a na povolovacích vstupech byla nastavena log. 1, takže můstek je vždy aktivní. Realizované schéma je vidět na obrázku 3.12.

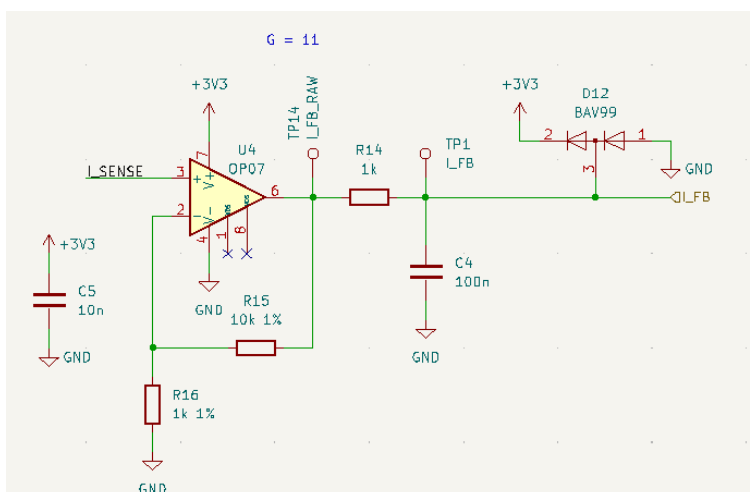


Obrázek 3.12: Zapojení řadiče krokového motoru.

V případě, že bychom chtěli monitorovat proud tekoucí můstkem, byl mezi výkonovou zem řadiče motoru a zem desky vložen rezistor s nízkou hodnotou 100 mΩ. Procházející proud na tomto rezistoru vytvoří napětí. Pro zesílení tohoto napětí byl použit operační zesilovač OP07 [16] v neinvertujícím zapojení. Tento obvod je zobrazen na obrázku 3.13.

### 3.2.3 Měření diskontinuity

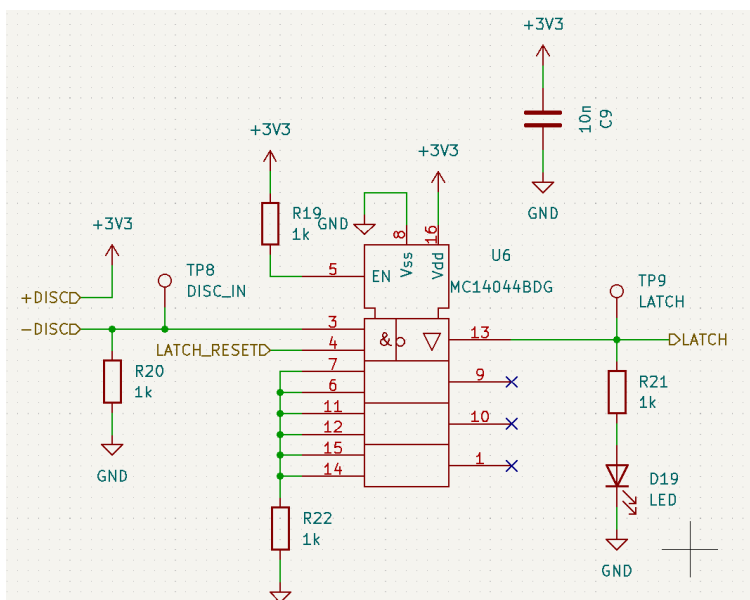
Pro detekci diskontinuity byl použit bistabilní klopný obvod. Konkrétně byl vybrán obvod MC14044BDG [17], což je čtyřkanálový klopný obvod. Nám



Obrázek 3.13: Zapojení řadiče krokového motoru.

stačí jen jeden, tedy ostatní nejsou využity. Jde o bistabilní klopný obvod vytvořený z NAND hradel, vstupy tudíž jsou invertované.

Vstup nS klopného obvodu je připojen přes vodivou cestu vzorku na napájení (Log. 1). Pokud se tato cesta přeruší, stáhne rezistor tento vstup na zem, tudíž se do bistabilního klopného obvodu zapíše. Pokud by se kontinuita vrátila, v klopném obvodu zůstane zapsaná hodnota, a tedy víme, že alespoň krátká diskontinuita nastala. Tuto hodnotu lze vrátit do původního stavu použitím resetovacího nR pinu. Zapojení je vidět na obrázku 3.14.



Obrázek 3.14: Zapojení měření diskontinuity.

### 3.2.4 Měření odporu

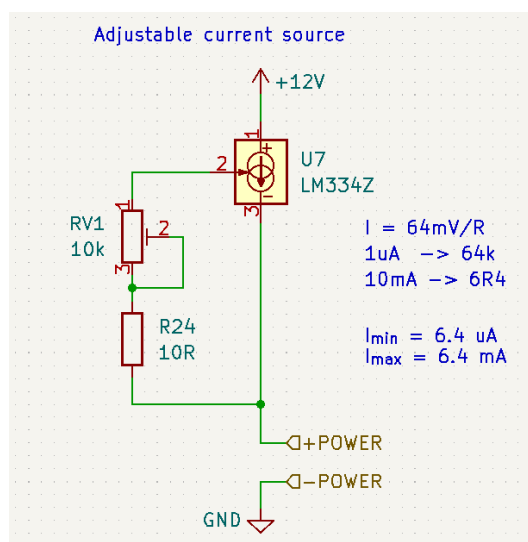
Řídící deska je také opatřena obvodem pro měření nízkého odporu. Měřením odporu testovaného vzorku lze detekovat degradaci vzorku, protože zvyšující se odpor svědčí o tvorbě trhlin [5].

Měření je prováděno čtyřvodičově, aby se eliminoval vliv přechodových odporů, odporů vodičů a konektorů v cestě. Tato metoda spočívá v tom, že se měřený vzorek zapojí nejprve mezi dvě svorky, které přes vzorek pustí definovaný proud a poté se přes další dvě svorky vzorku připojí měření napětí. Úbytek napětí na vodičích měřící napětí je minimální, díky nižšímu tekoucímu proudu. Tento blok má tedy dvě části – generátor proudu a blok pro měření napětí.

Generátor proudu je založený na integrovaném obvodu LM334 [18]. Tato nastavitelná proudová reference je schopná generovat proudy od  $1 \mu\text{A}$  do  $10 \text{ mA}$ . velikost tohoto proudu se nastavuje variací velikosti odporu vloženého mezi nastavovací ADJ pin a výstup regulátoru. Nastavený proud se vypočte vztahem 3 z [18]

$$I_{\text{SET}} = \frac{227 \mu\text{V/K}}{R_{\text{SET}}}, \quad (3.13)$$

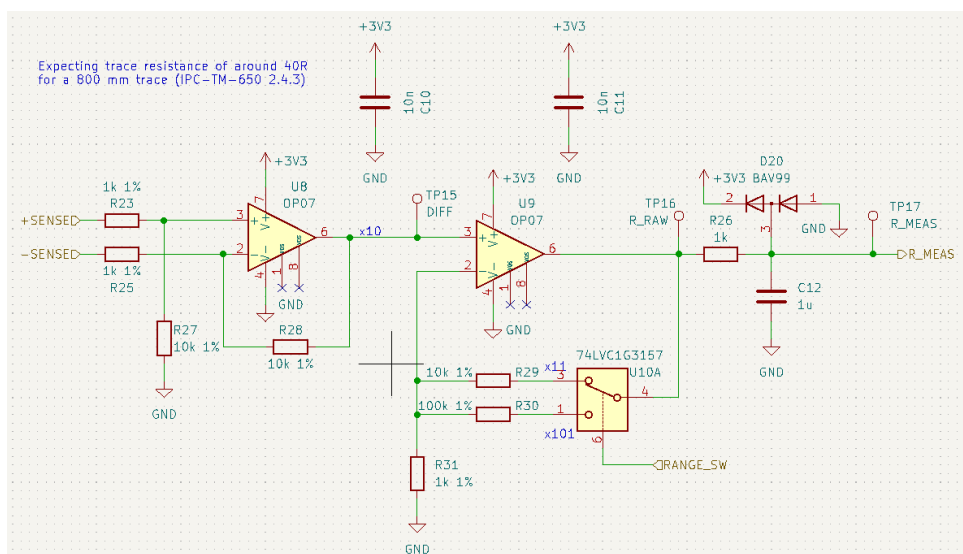
kde  $I_{\text{SET}}$  je nastavený proud a  $R_{\text{SET}}$  je nastavovací odpor mezi ADJ pinem a výstupem. Vybrán byl  $10\text{k}\Omega$  odporový trimr zapojený jako reostat a  $10\Omega$  odpor. Zapojení je vidět na obrázku 3.15.



Obrázek 3.15: Blok generátoru konstantního proudu.

Druhá část je zesilovač úbytku napětí na vzorku, který je sestavený ze dvou zesilovačů v kaskádě. První zesilovač je rozdílový se zesílením 10. Druhý zesilovač je zapojen jako neinvertující. Pomocí analogového přepínače lze měnit jeho zesílení. Na konci kaskády je připojena dolní propust a signál přiveden na analogový vstup mikroovladače. Jako oba operační zesilovače

byla vybrána součástka OP07, kvůli nízké vstupní napětové nesymetrii. Toto zapojení je vidět na obrázku 3.16.



Obrázek 3.16: Měření úbytku napětí na vzorku

### 3.2.5 Displej

Aby mohl uživatel zařízení efektivně využít, musí přístroj zobrazovat svůj stav. Nejdůležitější je samozřejmě vyčíst provedený počet cyklů, ale zobrazení i jiných hodnot by bylo vhodné. Zejména by se hodilo zobrazovat momentální nastavení rozsahu a rychlosti. Také by mohl být tento displej použit ke konfiguraci jiných parametrů systému.

Jednoduché sedmissegmentové a alfanumerické displeje by stačily pro zobrazení počtu cyklů a mohly by nabídnout určité pohodlí konfigurace, ale jejich malé rozlišení neumožňuje zobrazovat velké množství informací. Grafické displeje typu LCD nabízejí vysokou flexibilitu, ale jsou výrazně náročnější na řazení.

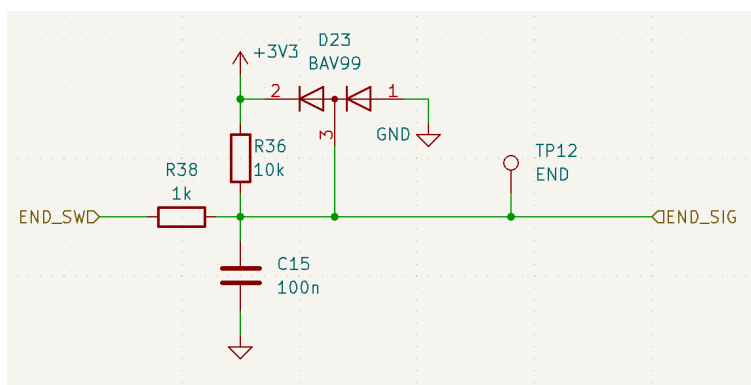
Nakonec byl vybrán grafický displej X-NUCLEO-GFX01M1, který je přizpůsoben k použití s použitou vývojovou deskou NUCLEO-F411RE jako rozšiřující modul. Kromě displeje má tento modul také obsahuje nevolatilní paměť, navigační tlačítka a řadič displeje. Displej má vysoké rozlišení 240×320 RGB bodů. Toto rozlišení bude bohatě stačit pro naše účely. Použitý řadič displeje ILI9341 [19] umožňuje řadu různých způsobů komunikace, ale hardware modulu podporuje jen komunikaci přes SPI. Navigační tlačítka mohou být užitečná pro navigování uživatelského rozhraní a konfiguraci.

### 3.2.6 Tlačítka a koncové spínače

Pro bezpečné řízení motoru je aktuátor vybaven koncovými spínači, aby se předešlo možnému nárazu pojezdu do krajů. Také bylo přidáno červené tlačítko

pro rychlé zastavení přístroje a zelené tlačítko pro potvrzení a zahájení testu. Koncové spínače jsou připojeny tak, aby v klidovém stavu obvod uzavíraly a v případě stisknutí obvod otevřeli. Takto může řídicí obvod detekovat odpojený koncový spínač.

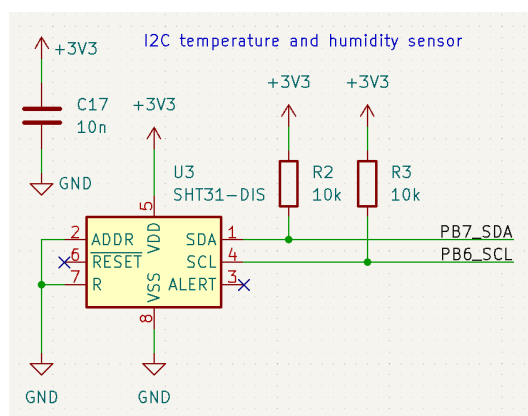
Ke každému tlačítku bylo přidáno pár součástek. Nejprve filtr pro odstranění zámkitů tlačítka, dále také rezistor na definování logické úrovně při vypnutém tlačítku. Také byl ke každému vstupu přidán ochranný pár diod. Jeden tento kanál je vidět na obrázku 3.17.



**Obrázek 3.17:** Vstupní obvod tlačítka, tady konkrétně jde o obvod pro koncový spínač.

### 3.2.7 Měření teploty a vlhkosti

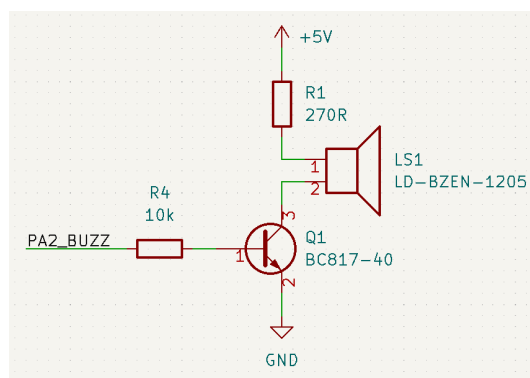
Při charakterizaci flexibilních plošných spojů by mohlo být zajímavé si při zkoušce poznamenat teplotu a vlhkost okolního prostředí, vzhledem k tomu, že materiály jako polyimid vlhkost dobře absorbují. Pro tento účel byl zvolen integrovaný obvod SHT31-DIS [20], který měří obě tyto hodnoty. Komunikovat s tímto senzorem lze po sběrnici I2C. Zapojení je zobrazeno na obrázku 3.18.



**Obrázek 3.18:** Měření teploty a vlhkosti vzduchu

### 3.2.8 Bzučák

Obvod byl také doplněn o bzučák. Tento bzučák slouží k informování uživatele o dokončeném testu nebo chybě. Tento jednoduchý funkční blok je tvořen spínacím tranzistorem, a dvěma rezistory omezující proud do báze tranzistoru a proud bzučákem. Schéma tohoto bloku je vidět na obrázku 3.19.



Obrázek 3.19: Obvod bzučáku.

### 3.2.9 Konektory

Zařízení, která nejsou na desce je potřeba nějakým způsobem k desce připojit. Pro připojení testovaného vzorku byla vybrána rozpojitelná svorkovnice se čtyřmi kontakty. Výhodou tohoto konektoru je, že k přípravě kabelu nejsou potřeba speciální nástroje, jen plochý šroubovák. Laněné vodiče se hodí před vložením do svorkovnice opatřit dutinkou, ale to není absolutně nutné. Stejná svorkovnice byla vybrána pro napájení desky, jen s dvěma kontakty. To umožňuje napájení z různých typů zdrojů při testování.

Motor je do desky připojen konektory Molex Micro-Fit 3.0. Tyto konektory mají zámek a také spolehlivě zvládají proud tekoucí do vinutí motoru. Tlačítka a koncové spínače jsou připojeny stejným druhem konektoru, jen se dvěma kontakty. Každé tlačítko má vlastní konektor.

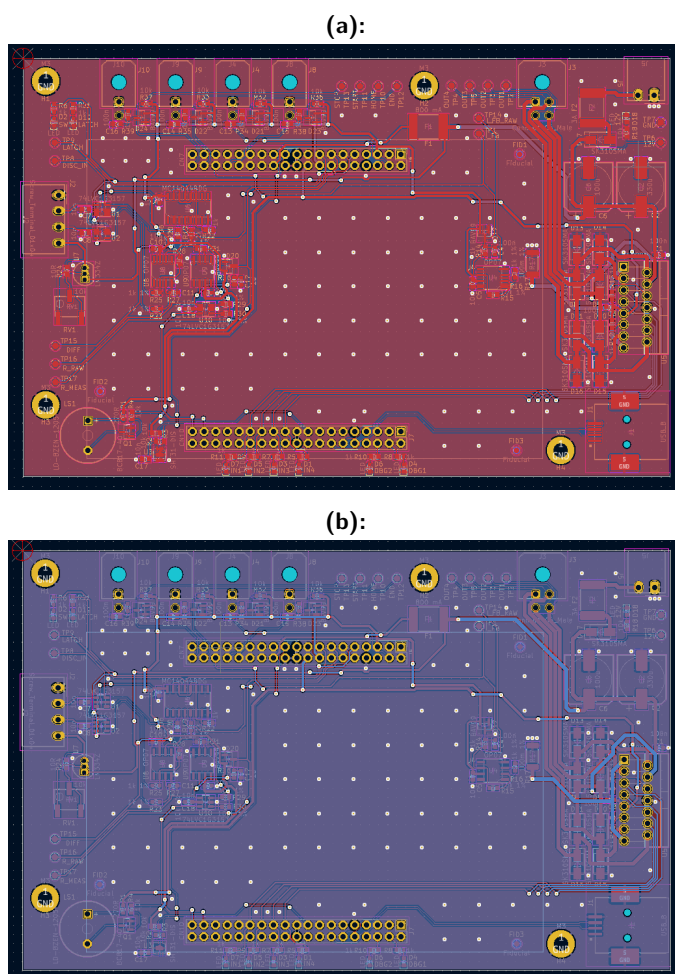
Deska je také vybavena USB-B konektorem pro případný sběr dat a ovládání pomocí PC. Tento konektor je připojen přímo do mikroovladače a má odpojený pin pro 5V, tedy desku nemůže napájet, je jen k přenosu dat.

## 3.3 Návrh desky plošných spojů

Po zpracování schémata bylo potřeba navrhnout desku plošných spojů. Vzhledem k tomu, že největším dílem je právě vývojová deska NUCLEO, musí být deska plošných spojů relativně velká. Proto byla deska založená na základním dvojrstevném plošném spoji a komponenty montovány jen z jedné strany. Tím si zjednodušíme osazování a debug desky. Také by z důvodu jednoduššího testování neměly být komponenty přímo pod vývojovou deskou, protože by pak nešly měřit součátky za chodu zařízení.







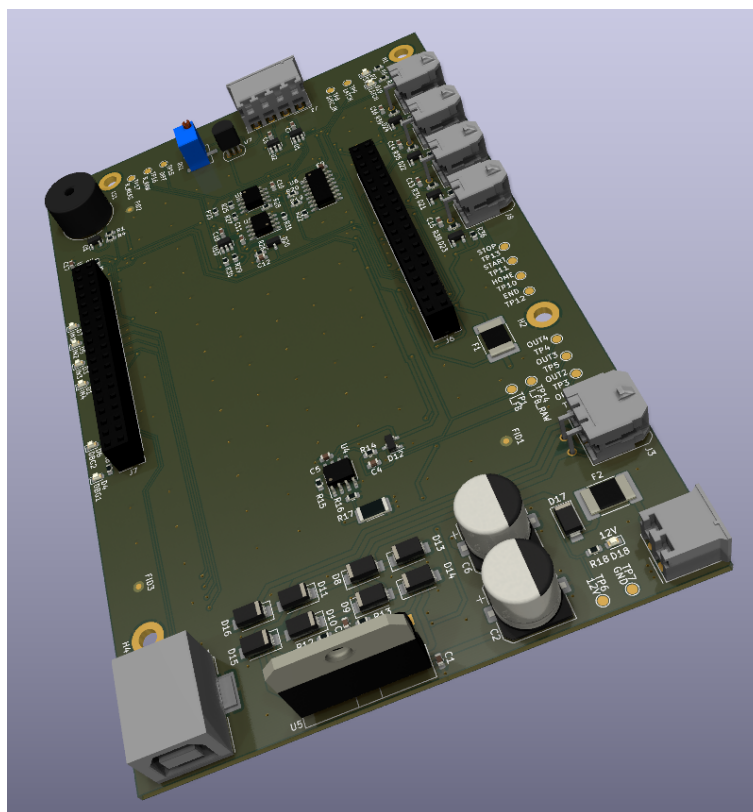
**Obrázek 3.20:** Motivy mědi na desce plošných spojů nejprve vrchní vrstva (a), poté spodní vrstva (b).

Po umytí byly napěťové sběrnice proměřeny multimetrem na kontinuitu vůči zemi. Pokud by některá napájecí větev byla zkratovaná pájkou k zemi, projevilo by se to jako kontinuita na zem. A před tím, než byl obvod připojen na tvrdý 12V zdroj, byl otestován na měkčích 9 V z baterie. Těmito zkouškami obvod prošel a napájení fungovalo bezproblému. Na obrázku 3.23 je hotový plošný spoj.

### 3.6 Návrh testovného vzorku

I pro testovaný vzorek bylo nutno připravit výrobní podklady. Motiv na vzorku je relativně jednoduchý – jde o meandr o definované délce, šířce, rozestupu a tloušťce cesty.

K přípravě podkladů byl opět použit open source program KiCAD. Z důvodu uchycení vzorku ve svorkách byly přidány 3mm díry na obou koncích. Na straně kontaktů jsou díry na jedné přímce spolu s elektrickými kontakty, aby



Obrázek 3.21: 3D render desky plošných spojů.

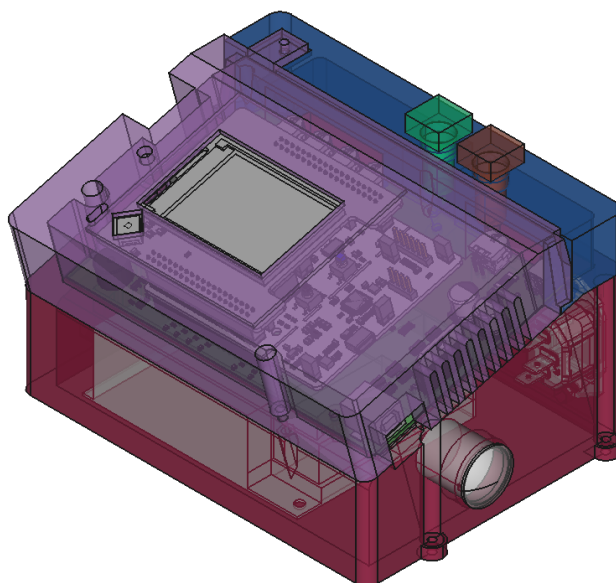
pružné kontakty dosedly na správné místo i v případě, že bude vzorek vložen do svorky obráceně. Výrobní podklady pro vzorek jsou vidět na obrázku 3.24 a vzorek vyrobený na PI substrátu je zobrazen na obrázku 3.25

## 3.7 Program

Potom co je ověřena funkčnost napájení, můžeme začít mikrovladač programovat. Software byl programován ve vývojovém prostředí STM32CubeIDE, které distribuuje přímo výrobce použitého mikrovladače. Jako programovací jazyk bylo zvolen jazyk C.

### 3.7.1 Řazení motoru

Pro ovládání motoru pomocí L298 byl napsán řadičí program. Do motoru jsou posílány signály odpovídající nějakému požadovanému stavu cívek. Motor je řízen *full step* stylem, což znamená, že oběma cívkami vždy teče proud a pozici motoru ovládáme jen tím že s každým krokem komutujeme proud jedním z vinutí. Pokud bychom chtěli použít takzvaný *half step* režim, vložili bychom mezi každý krok *full step* režimu jeden krok kdy je jednou z cívek neprochází žádný proud, ale zvýšenou přesností řízení s polovičním krokem nepotřebujeme, tak je použito *full step* řízení.



**Obrázek 3.22:** Krabíčka elektroniky.

Přes cívky motoru nemůže být jen tak připojeno napájecí napětí, protože má motor příliš nízký odpor vinutí. Motory, které mají dostatečný odpor vinutí takto řadit lze, ale mají výrazně horší vlastnosti, a to hlavně při vysokých rychlostech, můžeme ale využít toho, že vinutí má indukčnost a velmi rychle pulzně modulovat proud do cívky.

## ■ 3.8 Návrhy na vylepšení

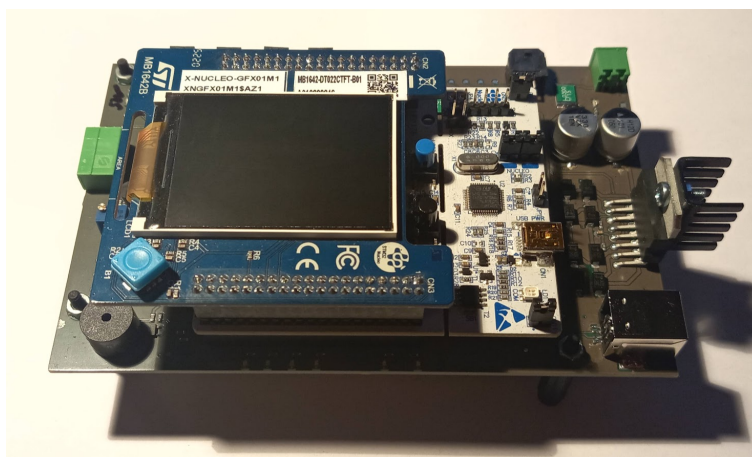
Po otestování tohoto plošného spoje se objevila řada chyb v návrhu, které bylo potřeba opravit.

První z nich byly prohozené piny mikrořadiče. Některé piny na NUCLEO desce bylo potřeba přesunout, protože na nich byly kontakty programátoru. Tedy dokud byl kit do desky zapojen nebylo možné ho programovat.

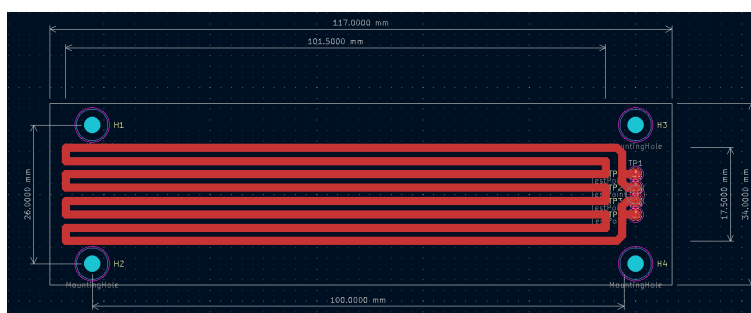
S analogovými obvody byly problematické operační zesilovače. Původně byly operační zesilovače OP07 zvoleny z důvodu nízké vstupní napěťové nesymetrie a možnosti použít jen jeden napájecí zdroj 3V3 (*single supply*), ale tyto operační zesilovače nedovedou pracovat v celém rozsahu napájení lineárně (nejsou *rail-to-rail*). Ve skutečnosti tyto operační zesilovače měly jen velmi malý použitelný rozsah. Toto lze vyřešit buď výměnou za *rail to rail* operační zesilovač nebo rozšířením napájení a přidáním napájení se záporným napětím.

Dále se vyskytl problém s přepínáním měření odporu a diskontinuity, protože křemíkové přepínače nepřepínaly také proudový zdroj, takže při připojení vzorku zdroj proudu znemožnil měření diskontinuity pokud se neodpojil kontakt manuálně.

### 3. Návrh a realizace přípravku

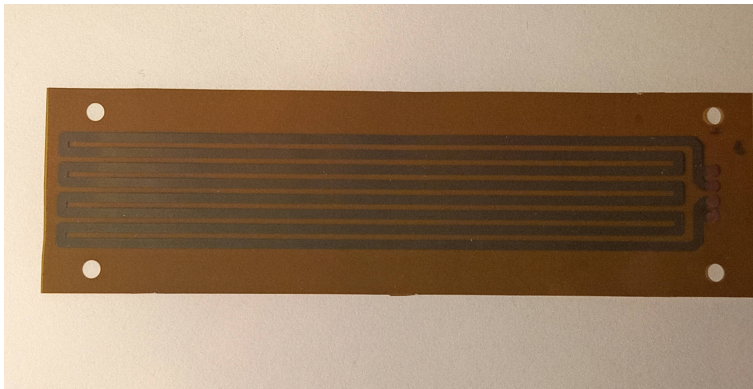


**Obrázek 3.23:** Fotografie osazeného plošného spoje s vývojovým kitem a displejem.



**Obrázek 3.24:** Návrh vzorku podle IPC-TM-650 2.4.3.

Pokud by se přešlo z vývojového kitu přímo na samotný čip, mohla by být deska mnohem menší.



**Obrázek 3.25:** Vzorek na polyimidovém základu podle IPC-TM-650 2.4.3.





## Kapitola 4

### Závěr

Byla provedena rešerše se zaměřením na ohýbací metody flexibilních plošných spojů. Tato rešerše byla využita k návrhu ohýbacího přístroje, který dovede provádět ohýbání podle normy IPC-TM-650 2.4.3 a podle metody *push-to-flex*.

Zařízení bylo navrženo pomocí open source nástrojů. Program FreeCAD byl použit pro návrh mechanických komponent, zatímco program KiCAD byl použit pro návrh elektrického schémata a desky plošných spojů. Zařízení se nepodařilo do termínu odevzdání bakalářské zkompletovat, nicméně by mělo být dokončeno k obhajobě bakalářské práce.

Byly navrženy testovací vzorky tak, aby splňovaly požadavky testovací metody IPC-TM-650 2.4.3. Vzhledem ke stavu testovacího zařízení nemohly být ještě vzorky otestovány. Ty by také měly být k obhajobě práce změřeny.

Výrobní podklady a ostatní materiály jsou dostupné v repozitáři služby gitlab [21].







## Bibliografie

1. MACLEOD, Peter. *A review of flexible circuit technology and its applications*. PRIME Faraday Partnership Leicester, 2002. ISBN 1-84402-023-1. Dostupné také z: [https://www.lboro.ac.uk/microsites/mechman/research/ipm-ktn/pdf/Technology\\_review/flexible-circuit-technology-and-its-applications.pdf](https://www.lboro.ac.uk/microsites/mechman/research/ipm-ktn/pdf/Technology_review/flexible-circuit-technology-and-its-applications.pdf).
2. STREJC, Matyáš. *Výroba a testování flexibilních plošných spojů*. 2019. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/11025/37528>.
3. *Flexible Circuit and Heater DESIGN GUIDE*. Flexible Circuit Technologies, 2015. Dostupné také z: [https://www.flexiblecircuit.com/wp-content/uploads/2015/08/FCT\\_Design\\_Guide1.pdf](https://www.flexiblecircuit.com/wp-content/uploads/2015/08/FCT_Design_Guide1.pdf).
4. *Flex-Rigid Design Guide*. Würth Elektronik GmbH, 2018. Dostupné také z: [https://www.we-online.com/web/en/index.php/show/media/04\\_leiterplatte/2012\\_2/3d\\_2/design\\_rules\\_neu\\_/110502\\_DesignGuide\\_Flex-rigid.pdf](https://www.we-online.com/web/en/index.php/show/media/04_leiterplatte/2012_2/3d_2/design_rules_neu_/110502_DesignGuide_Flex-rigid.pdf).
5. MOHD, Asri; MOHD, Afiq; RAMLI, Amalina; NORDIN, Anis. Electrical performance and reliability assessment of silver inkjet printed circuits on flexible substrates. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2021, roč. 32, s. 1–14. Dostupné z DOI: 10.1007/s10854-021-06152-6.
6. 2.4.3E, IPC-TM-650. *Flexural Endurance, Flexible Printed Wiring Materials*. 2011. Standard. The Institute for Interconnecting a Packaging Electronic Circuits. Dostupné také z: [https://www.ipc.org/sites/default/files/test\\_methods\\_docs/2.4.3e.pdf](https://www.ipc.org/sites/default/files/test_methods_docs/2.4.3e.pdf).
7. 2.4.3.1C, IPC-TM-650. *Flexural Fatigue and Ductility, Flexible Printed Wiring*. 1991. Standard. The Institute for Interconnecting a Packaging Electronic Circuits. Dostupné také z: [https://www.ipc.org/sites/default/files/test\\_methods\\_docs/2.4.3.1c.pdf](https://www.ipc.org/sites/default/files/test_methods_docs/2.4.3.1c.pdf).
8. KAMMURI, Kazuki; MIKI, Atsushi; TAKEUCHI, Hiroki. Reliable Young's Modulus Value of High Flexible, Treated Rolled Copper Foils Measured by Resonance Method. *Journal of microelectronics and electronic packaging*. 2017, roč. 14, s. 70–76.

9. LI, Fei; QU, Jiang; LI, Yang; WANG, Jinhui; ZHU, Minshen; LIU, Lixiang; GE, Jin; DUAN, Shengkai; LI, Tianming; BANDARI, Vineeth; HUANG, Ming; ZHU, Feng; SCHMIDT, Oliver. Stamping Fabrication of Flexible Planar Micro-Supercapacitors Using Porous Graphene Inks. *Advanced Science*. 2020, roč. 7. Dostupné z DOI: 10.1002/advs.202001561.
10. YANG, Xiao; LI, Xiaoming; KONG, Qing-Qiang; LIU, Zhuo; CHEN, Jing-Peng; JIA, Hui; LIU, Yanzhen; XIE, Li-Jing; CHEN, Cheng-Meng. One-pot ball-milling preparation of graphene/carbon black aqueous inks for highly conductive and flexible printed electronics. *Science China Materials*. 2019, roč. 63. Dostupné z DOI: 10.1007/s40843-019-1210-3.
11. KIM, Cheol; KIM, Chung Hwan. Universal Testing Apparatus Implementing Various Repetitive Mechanical Deformations to Evaluate the Reliability of Flexible Electronic Devices. *Micromachines (Basel)*. 2018, roč. 9. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.3390/mi9100492>.
12. *AN235 Stepper motor driving*. STMicroelectronics, 2012. Dostupné také z: [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an235-stepper-motor-driving-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an235-stepper-motor-driving-stmicroelectronics.pdf).
13. *ST4118: Stepper Motor - NEMA 17*. Nanotec Electronic, 2018. Č. ST4118X1404-A. Dostupné také z: [https://en.nanotec.com/fileadmin/files/Baureihenuuebersichten/Schrittmotoren/Product\\_Overview\\_ST4118.pdf](https://en.nanotec.com/fileadmin/files/Baureihenuuebersichten/Schrittmotoren/Product_Overview_ST4118.pdf).
14. LEMIRE, Mark; BONI, Lido; FURNISH, Ben. The straight story on linear actuators. 2007. Dostupné také z: <https://www.santecindia.com/pdfs/white-papers3.pdf>.
15. *L298: DUAL FULL-BRIDGE DRIVER*. STMicroelectronics, 2000. Č. L298. Dostupné také z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf>.
16. *OP07x Precision Operational Amplifiers*. Texas Instruments, 2014. Č. OP07. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/op07c.pdf>. Revision G.
17. *Quad R-S Latches: MC14043B, MC14044B*. ON Semiconductor, 2022. Č. MC14044B. Dostupné také z: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mc14043b-d.pdf>. Rev. 11.
18. *LM134/LM234/LM334 3-Terminal Adjustable Current Sources*. Texas Instruments, 2013. Č. LM334. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm334.pdf>. Revision D.
19. *a-Si TFT LCD Single Chip Driver 240RGBx320 Resolution and 262K color*. ILI Technology, 2010. Č. ILI9341. Dostupné také z: [http://academy.cba.mit.edu/classes/output\\_devices/TFT/ILI9341.pdf](http://academy.cba.mit.edu/classes/output_devices/TFT/ILI9341.pdf). V1.02.

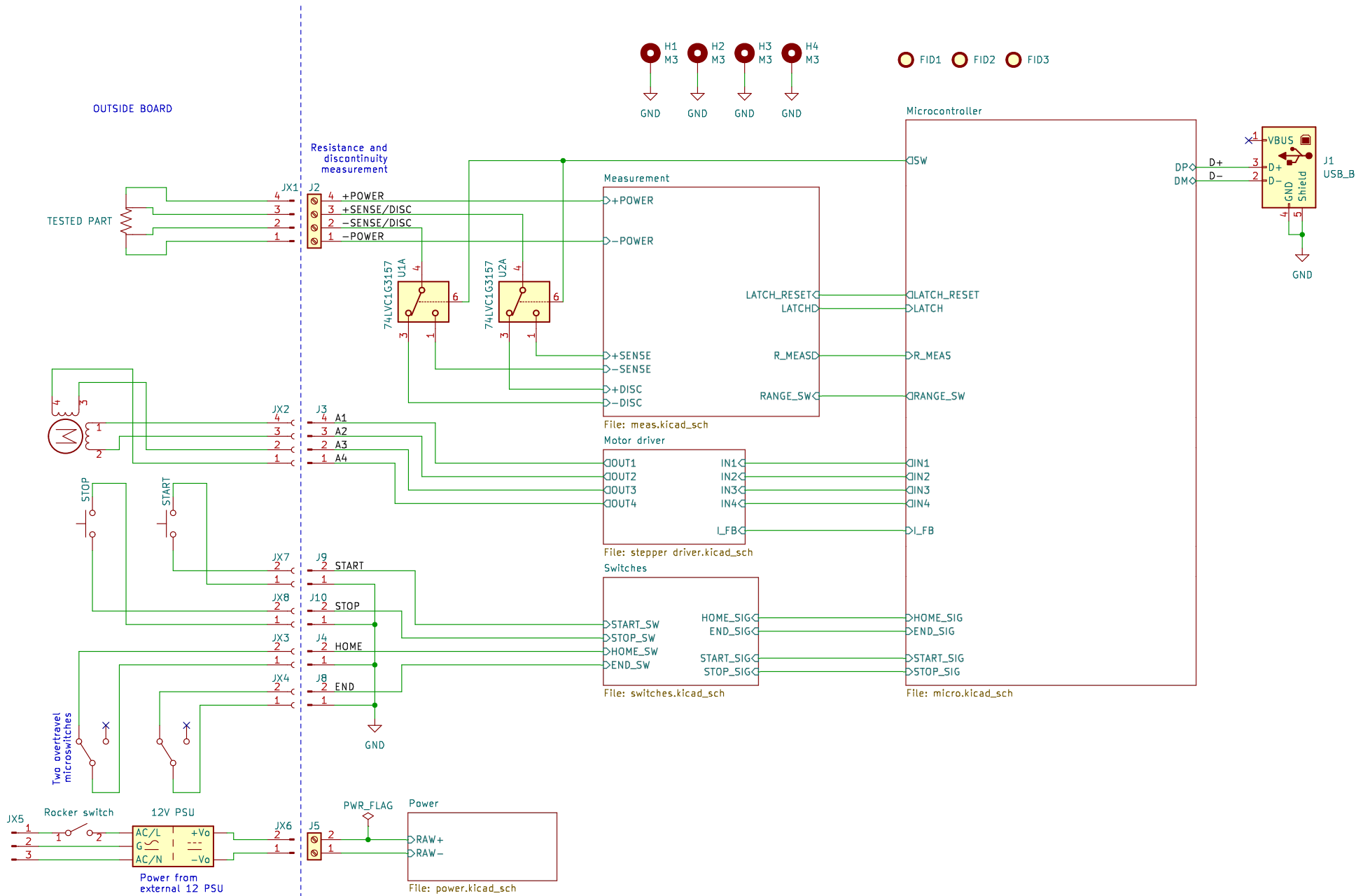
20. *Datasheet SHT3x-DIS: Humidity and Temperature Sensor*. Sensirion, 2019. Č. SHT31-DIS. Dostupné také z: [https://sensirion.com/media/documents/213E6A3B/61641DC3/Sensirion\\_Humidity\\_Sensors\\_SHT3x\\_Datasheet\\_digital.pdf](https://sensirion.com/media/documents/213E6A3B/61641DC3/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT3x_Datasheet_digital.pdf). Version 6.
21. EDL, Martin. *Přípravek pro mechanické testy flexibilních plošných spojů* [<https://gitlab.fel.cvut.cz/edlmarti/pripravek-pro-mechanicke-testy-flexibilnich-plosnych-spoju>]. GitLab, 2022.

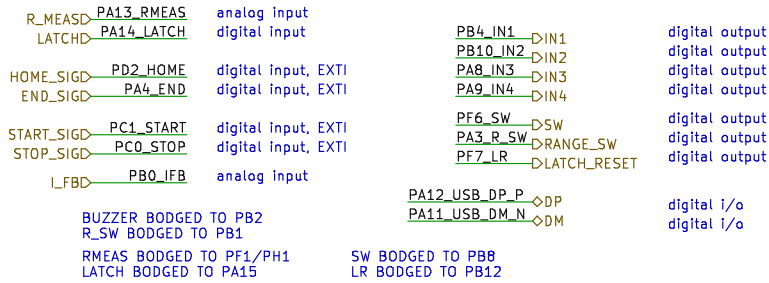
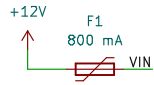




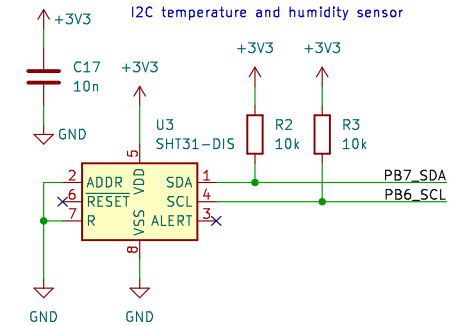
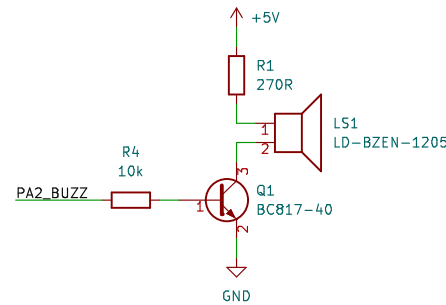
## **Příloha A**

### **Schéma kontrolní desky**

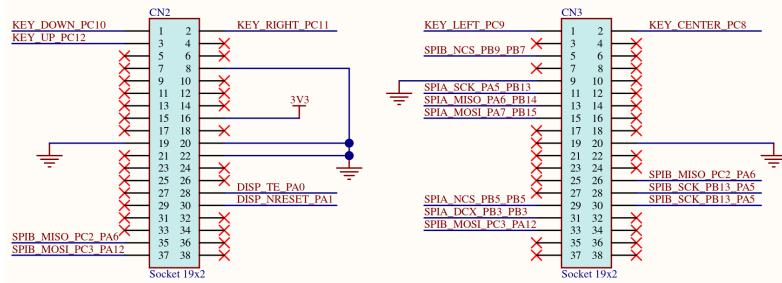




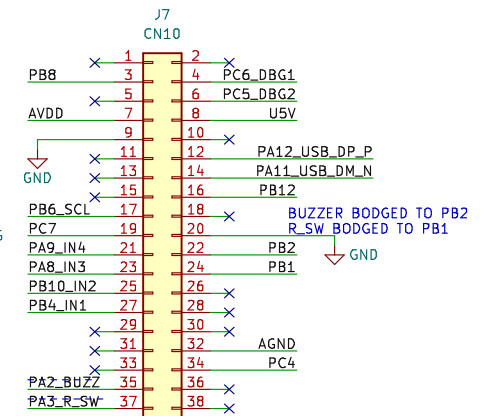
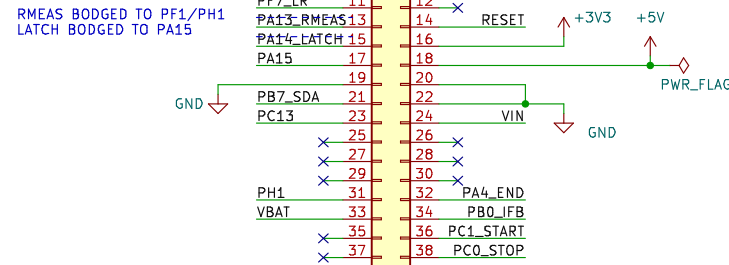
Buzzer  
Collector resistor can be changed to adjust loudness



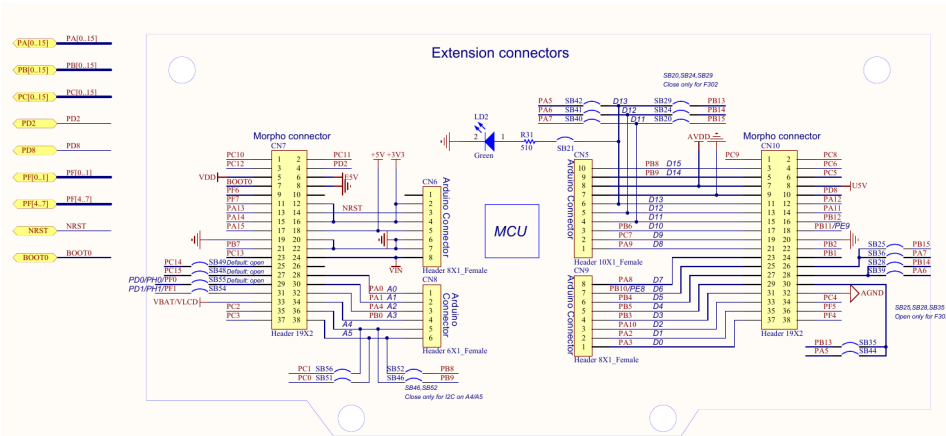
LCD expansion board connector pinout  
From <https://www.st.com/en/evaluation-tools/x-nucleo-gfx01m1.htm#cad-resources>

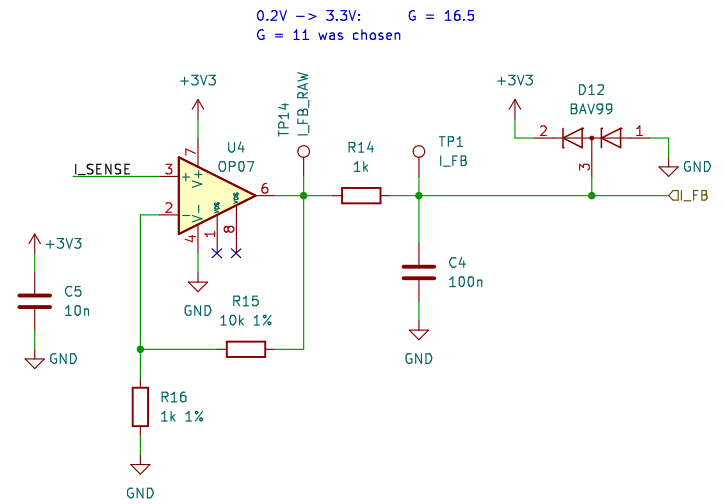
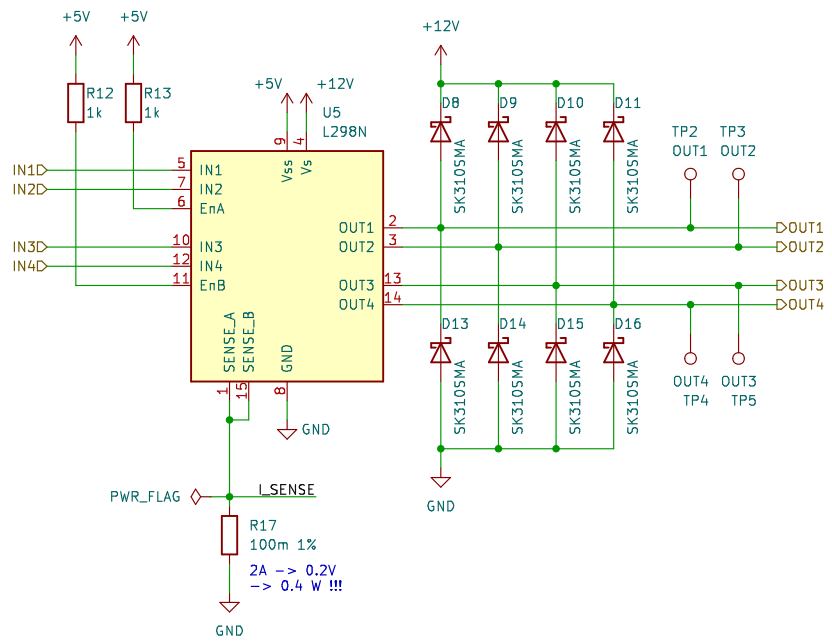
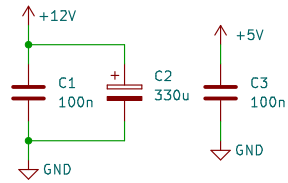


RMEAS BODGED TO PF1/PH1  
LATCH BODGED TO PA15

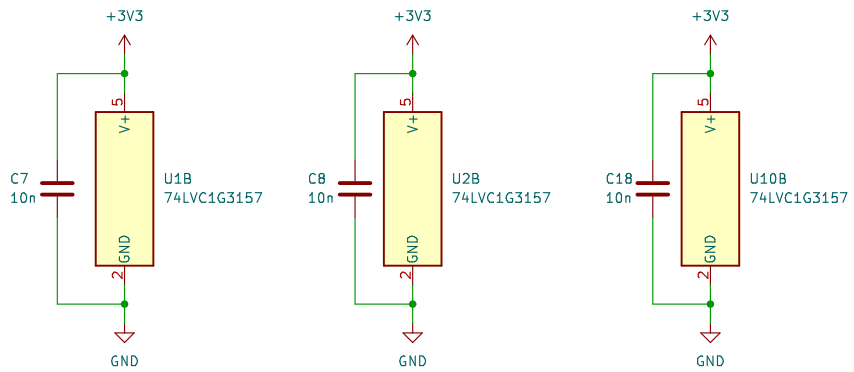
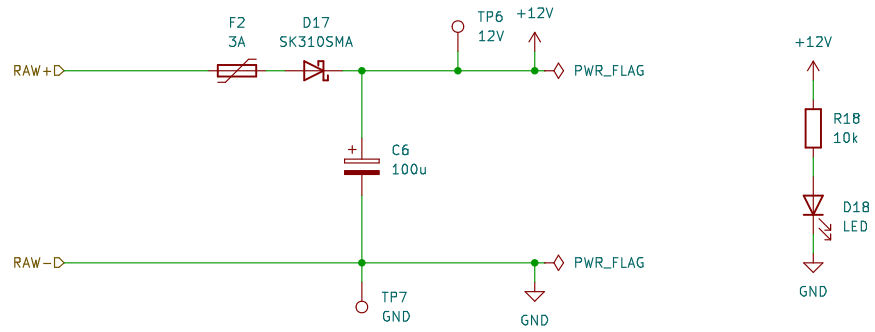


Nucleo connector pinout  
From <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f411re.htm#cad-resources>

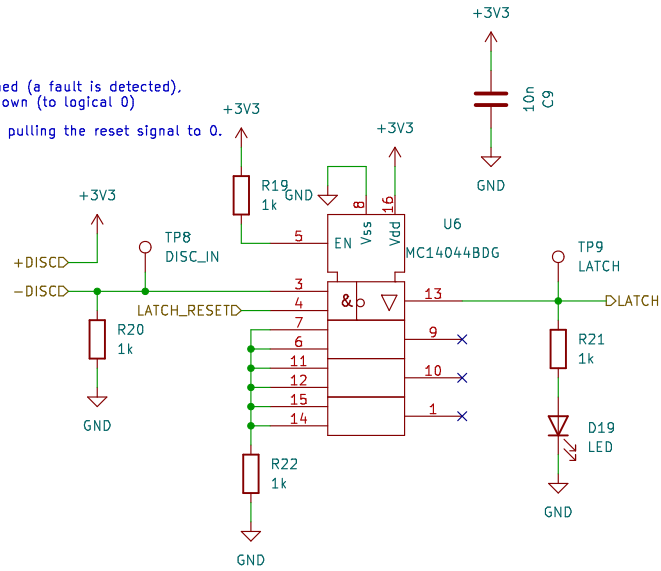




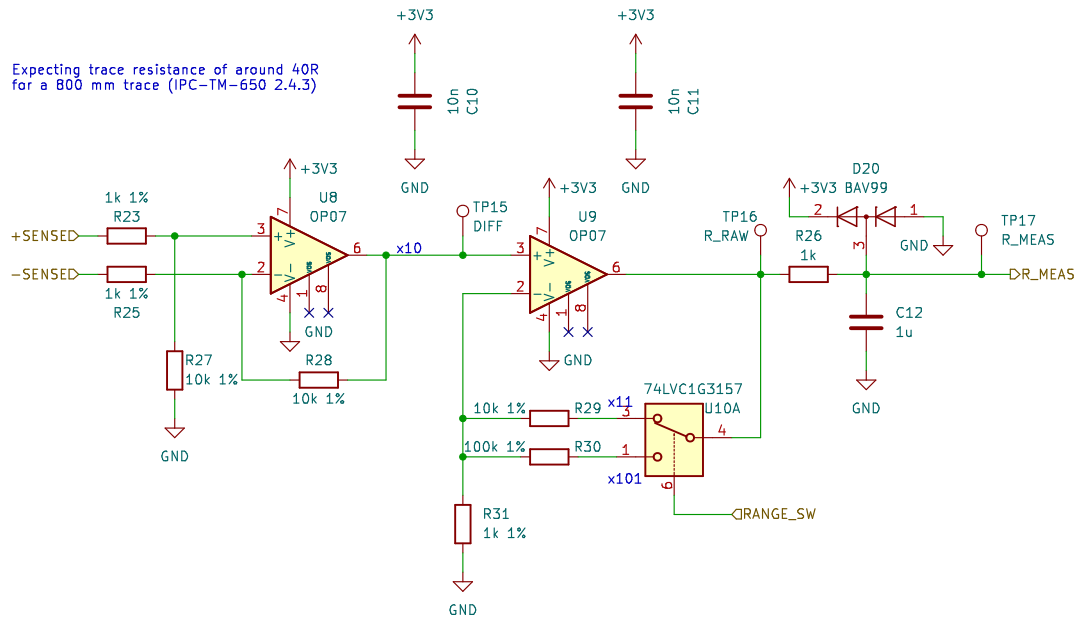




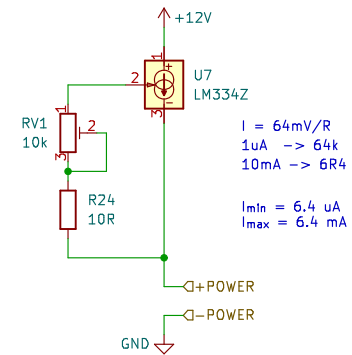
If the circuit is opened (a fault is detected),  
the input is pulled down (to logical 0)  
the latch is reset by pulling the reset signal to 0.



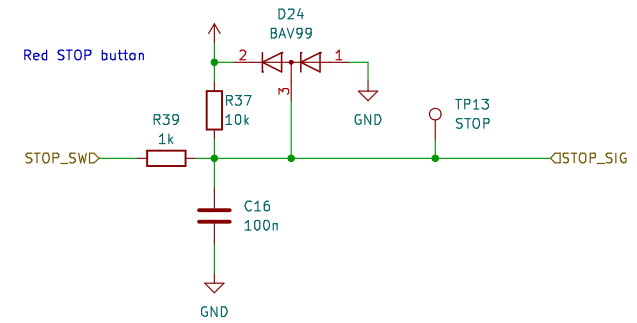
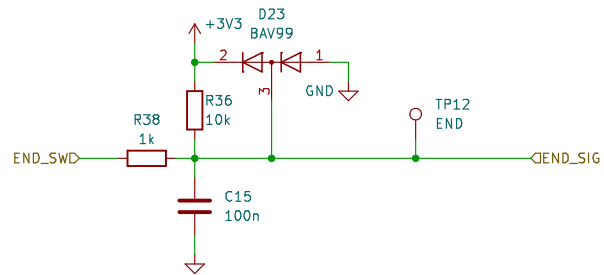
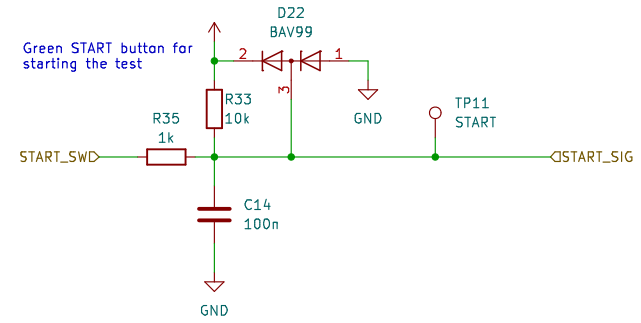
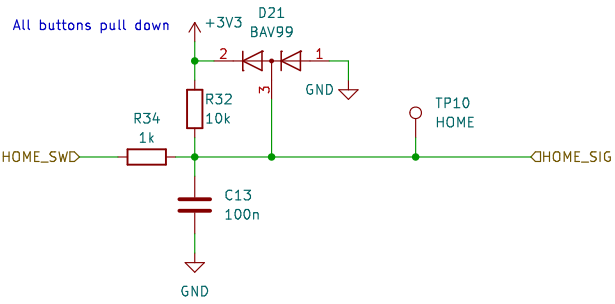
Expecting trace resistance of around 40R  
for a 800 mm trace (IPC-TM-650 2.4.3)



Adjustable current source



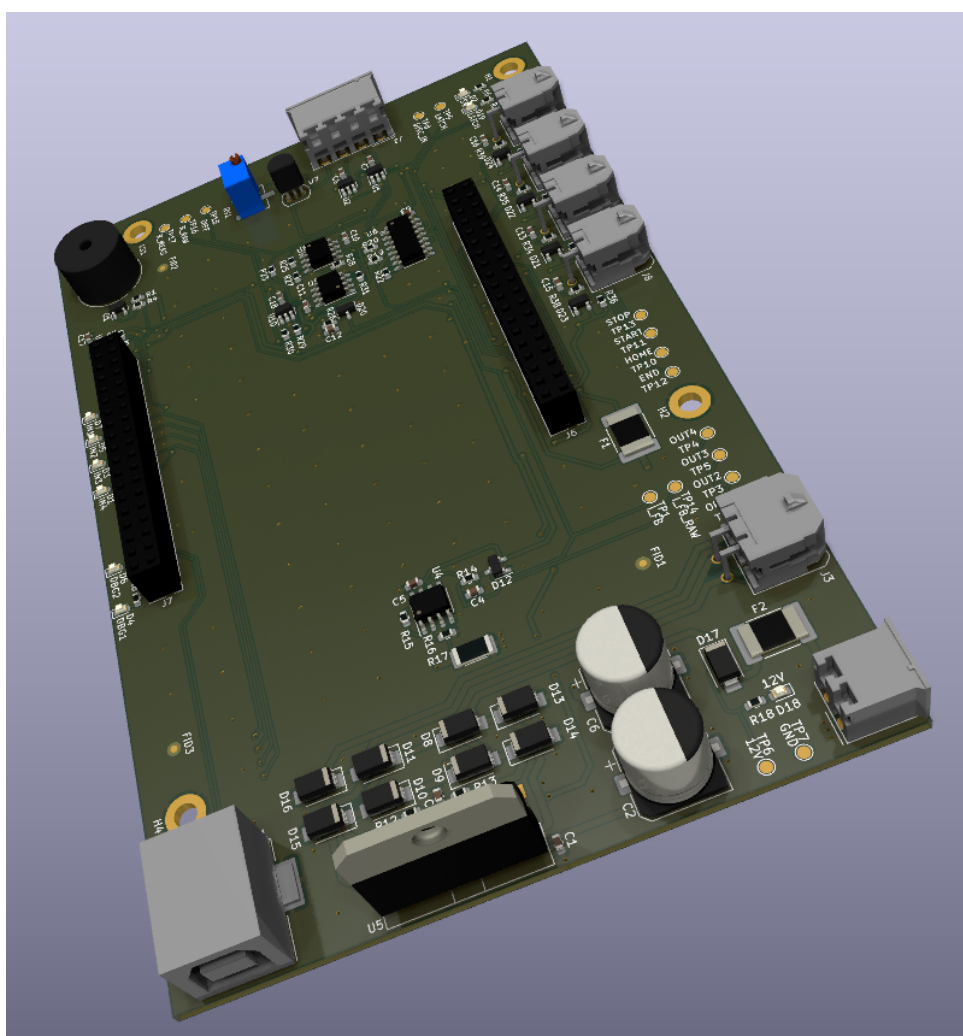
Two microswitches mounted to the linear travel to prevent overtravel



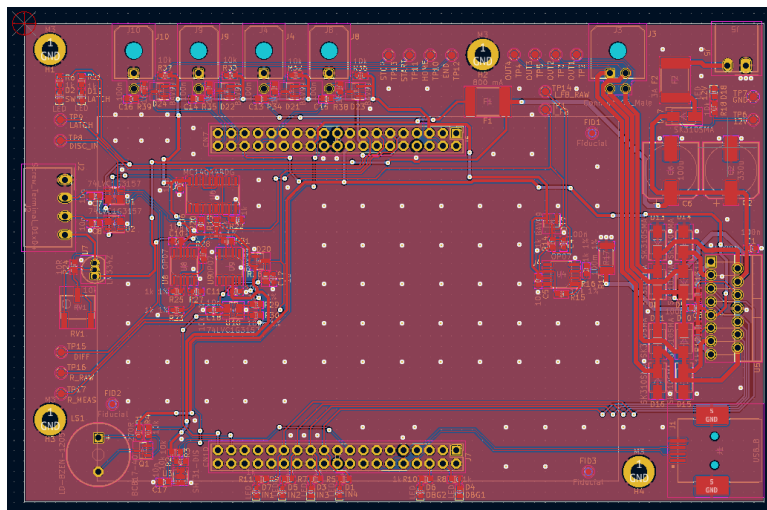


## Příloha B

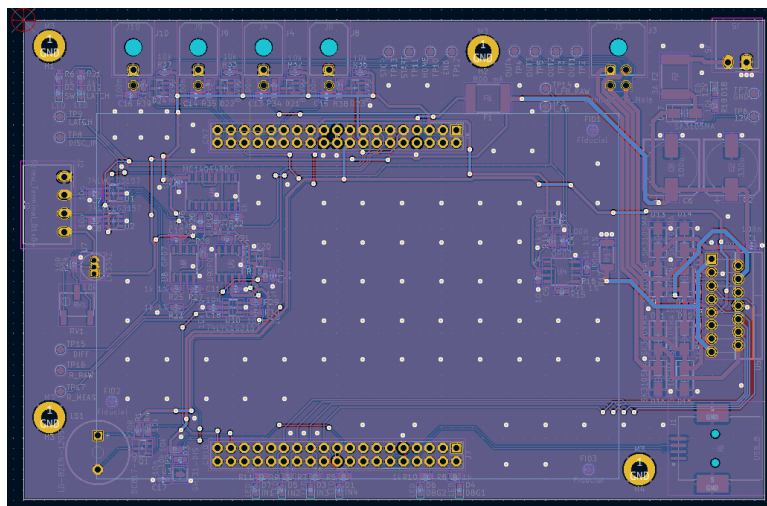
### Deska plošných spojů



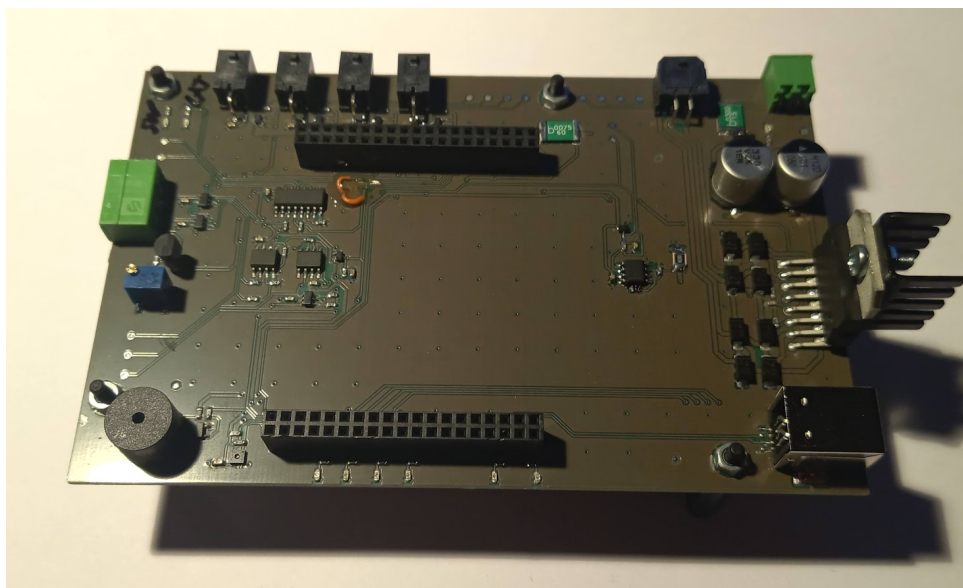
Obrázek B.1: Render řídicí desky.



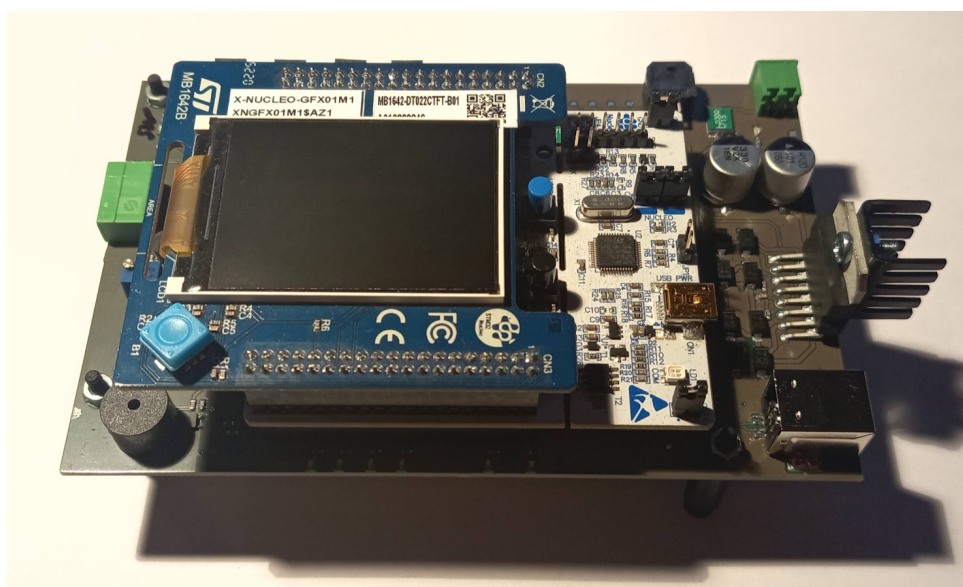
Obrázek B.2: Motiv mědi na vrchní straně řídicí desce.



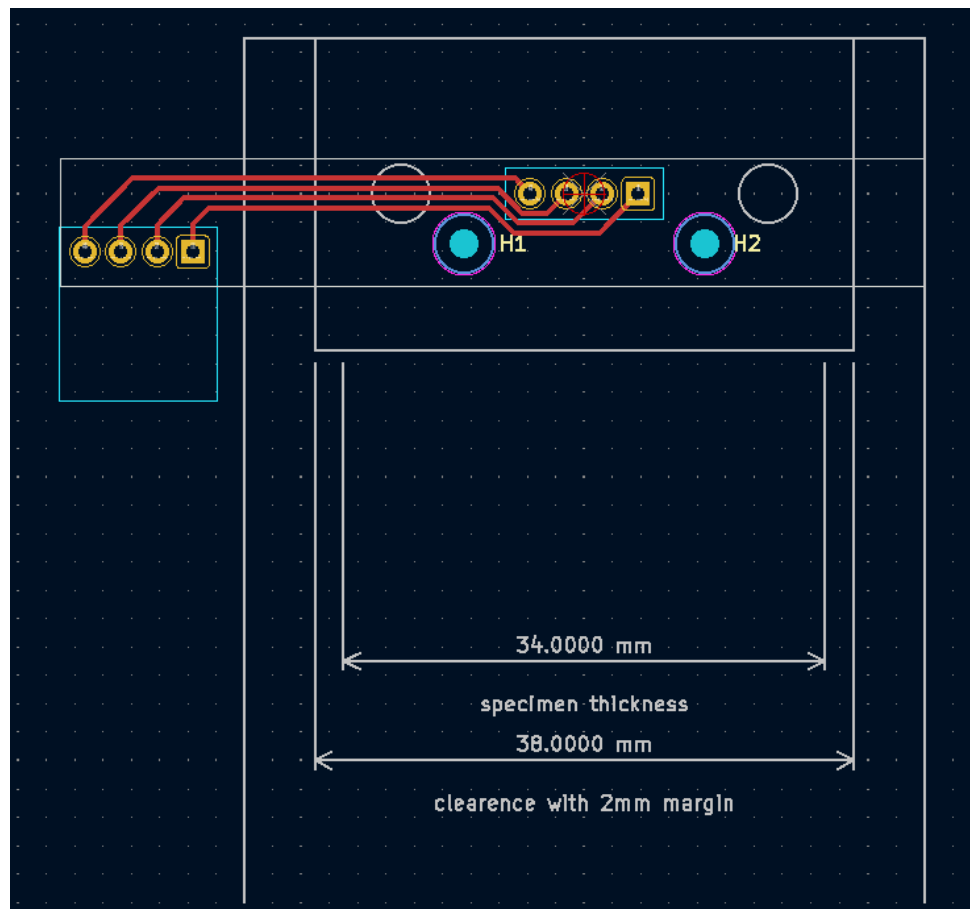
Obrázek B.3: Motiv mědi na vrchní straně řídicí desce.



Obrázek B.4: Zhotovená řídicí deska bez vývojové desky NUCLEO a bez displeje.

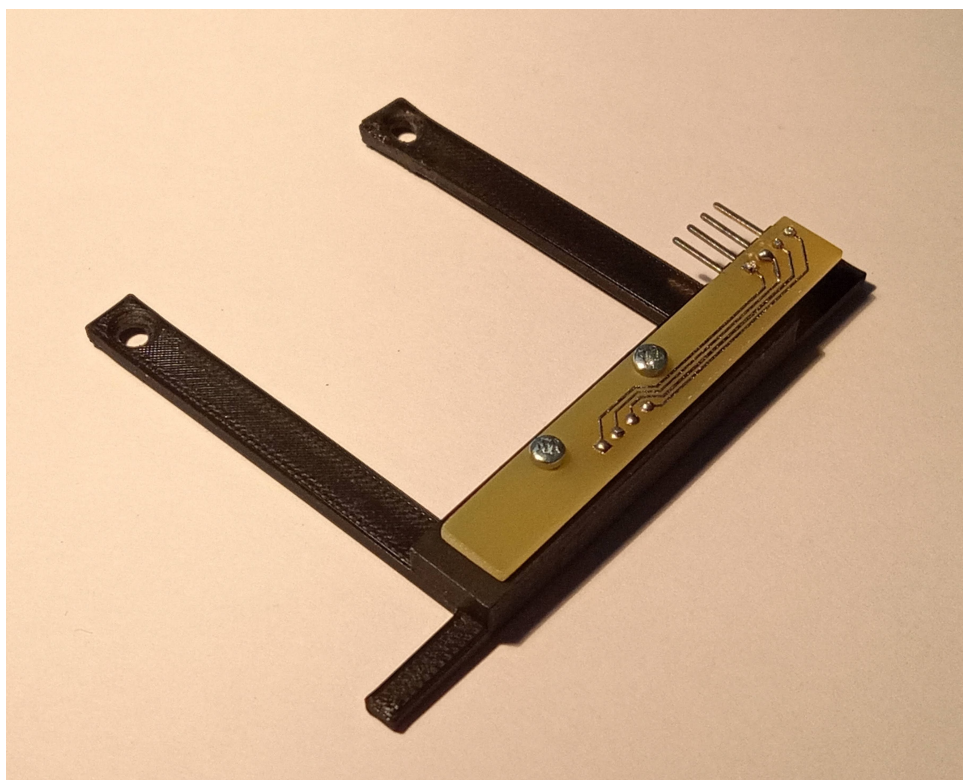


Obrázek B.5: Zhotovená řídicí deska.



Obrázek B.6: Návrh desky pro kontakty na vzorek.



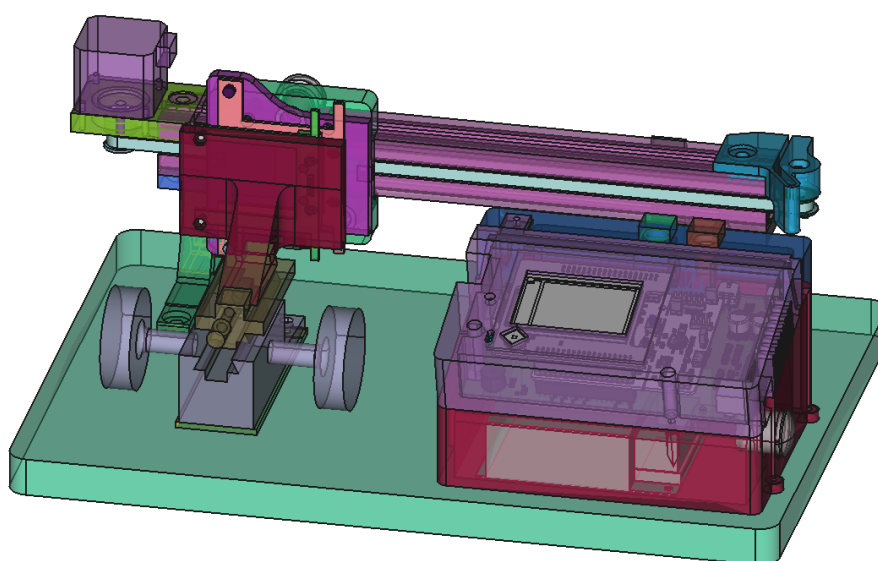


**Obrázek B.7:** Propojovací plošný spoj na svorce.

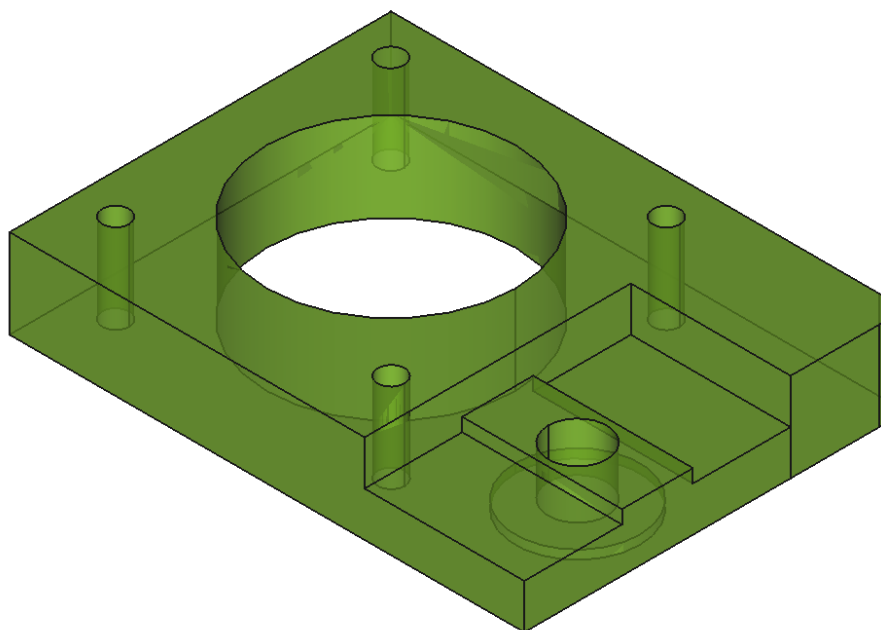


## Příloha C

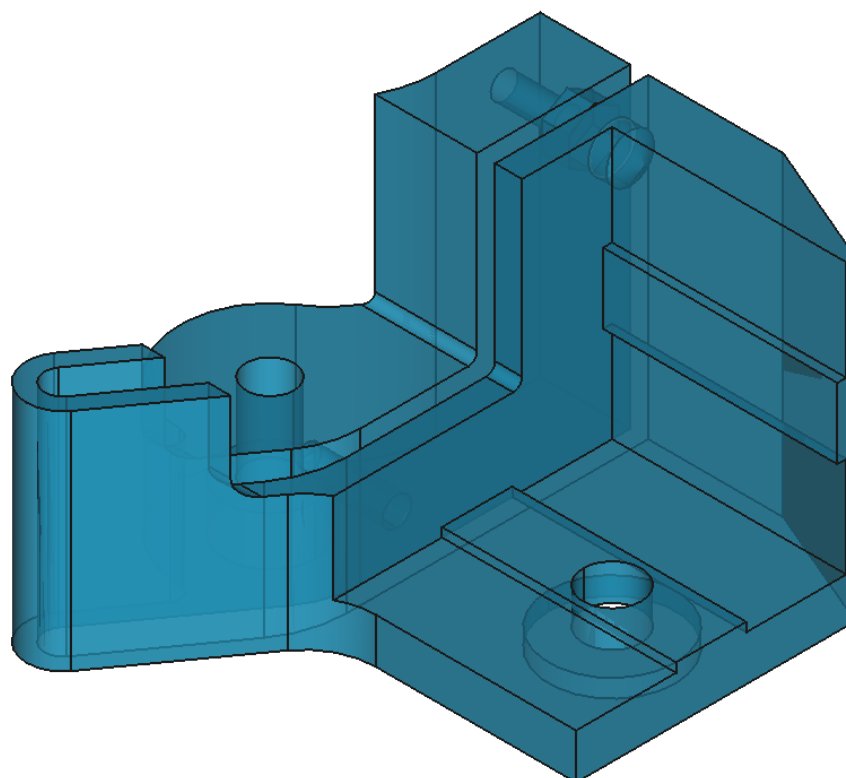
### 3D modely



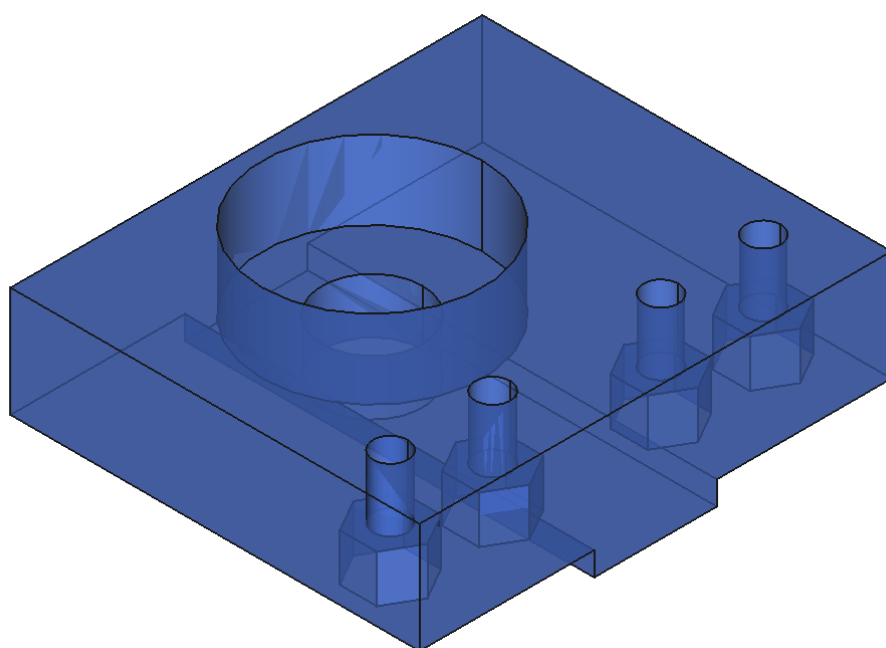
**Obrázek C.1:** Model celého zařízení.



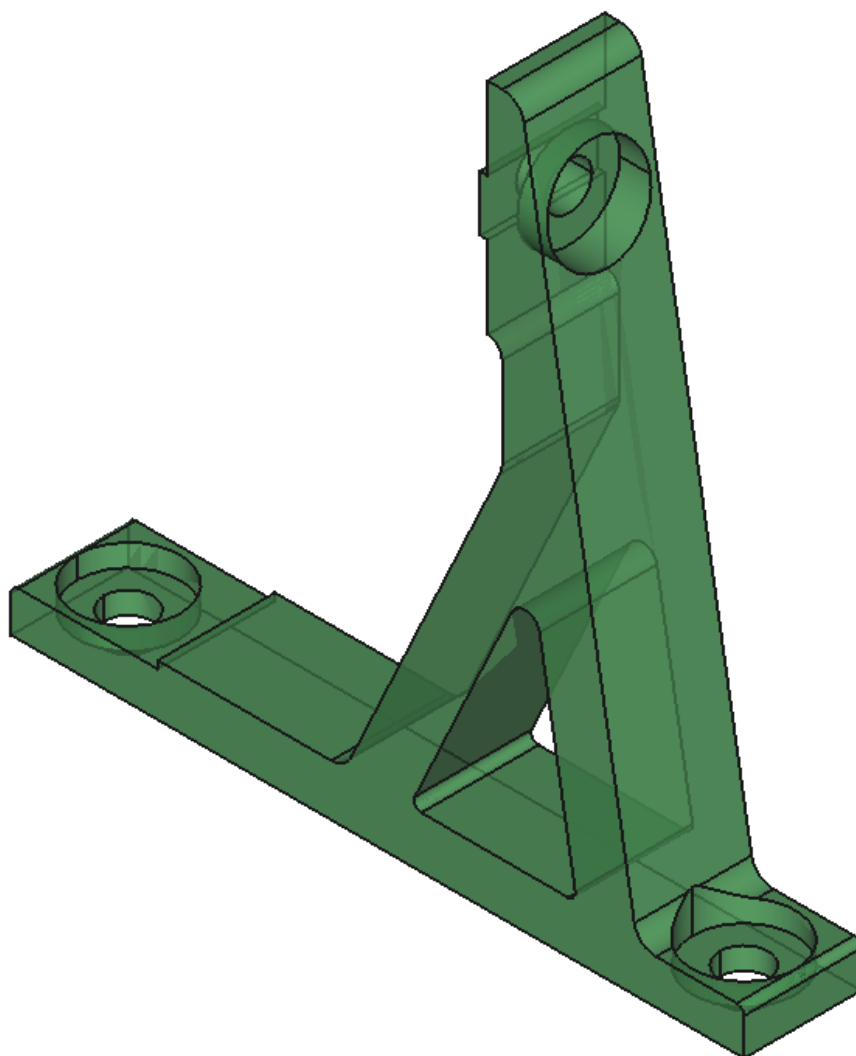
**Obrázek C.2:** Příruba motoru.



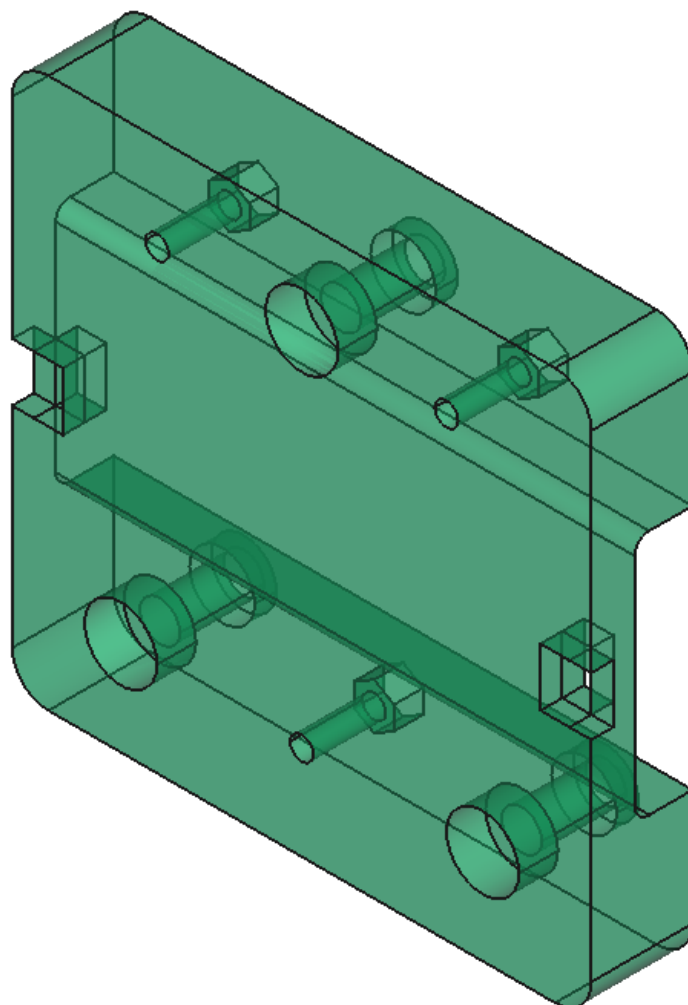
**Obrázek C.3:** Nastavitelná kladka.



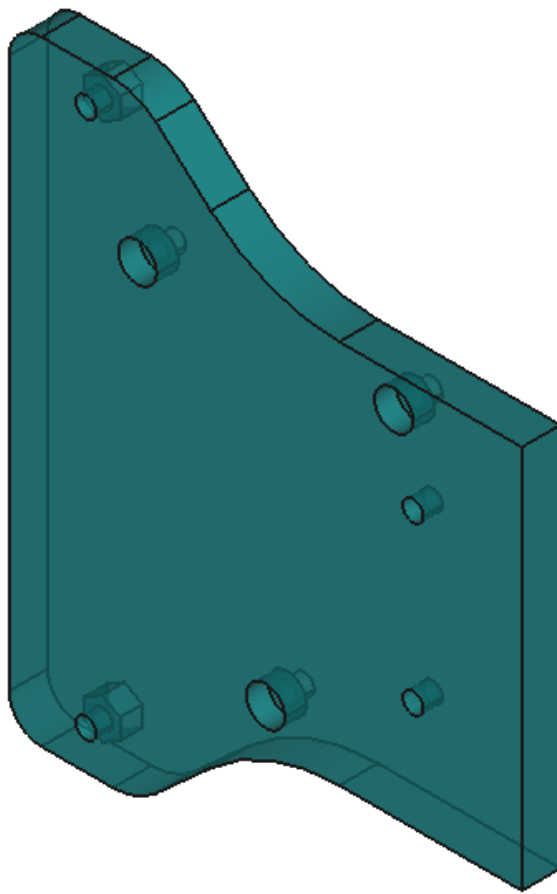
**Obrázek C.4:** Držák na koncový spínač.



**Obrázek C.5:** Podpěra profilu.

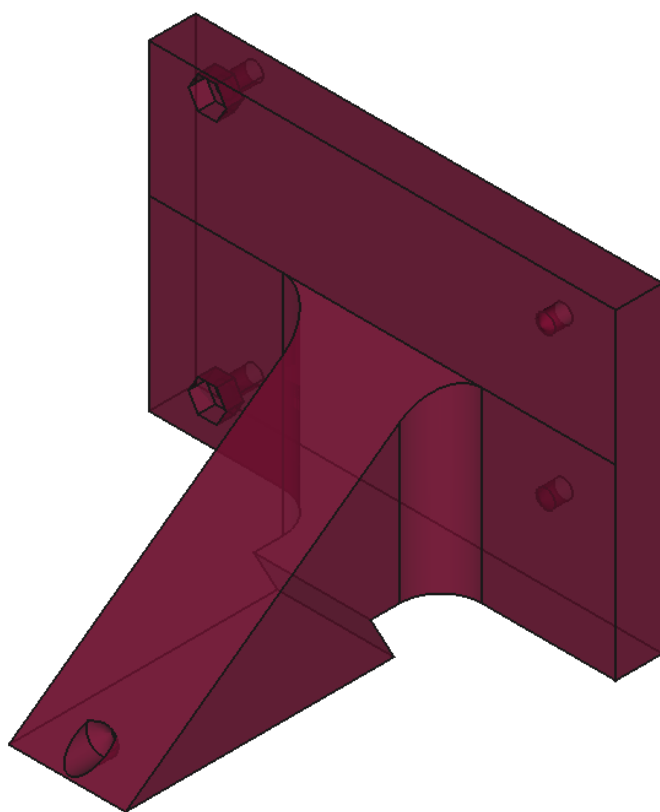


Obrázek C.6: Vozík.

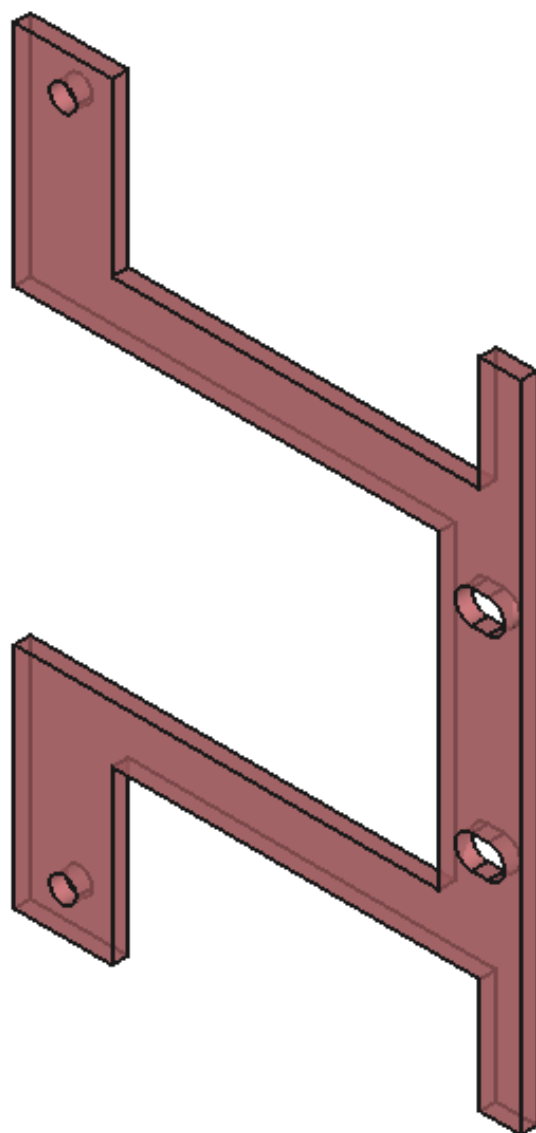


**Obrázek C.7:** Pohybující se plocha.

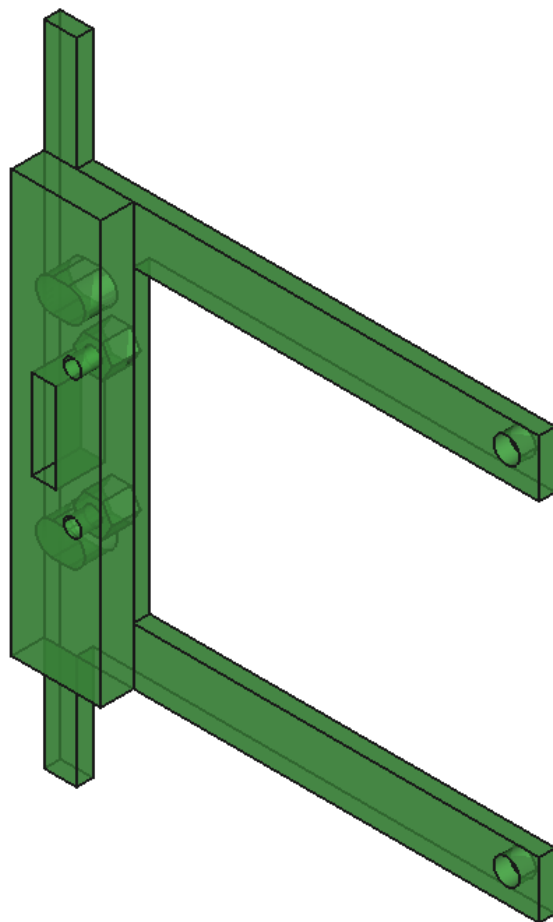




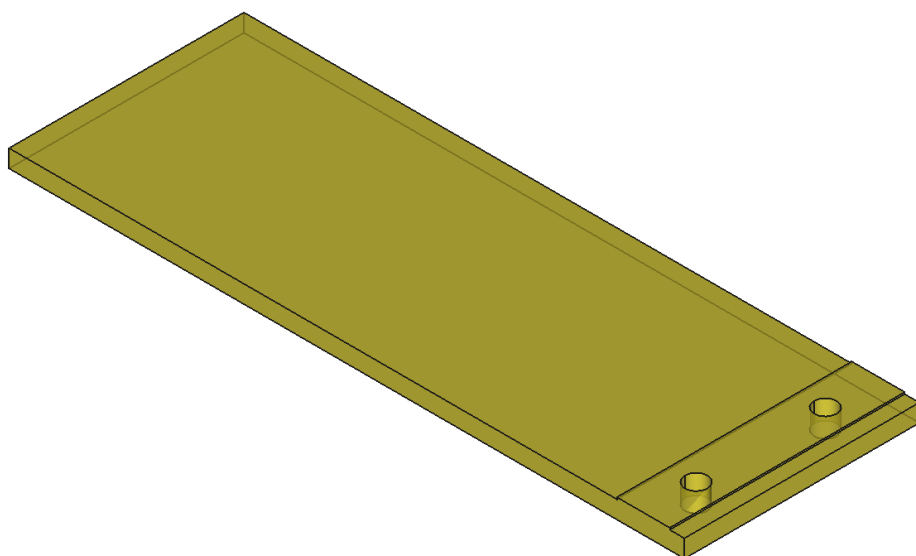
**Obrázek C.8:** Nastavitelná statická plocha.



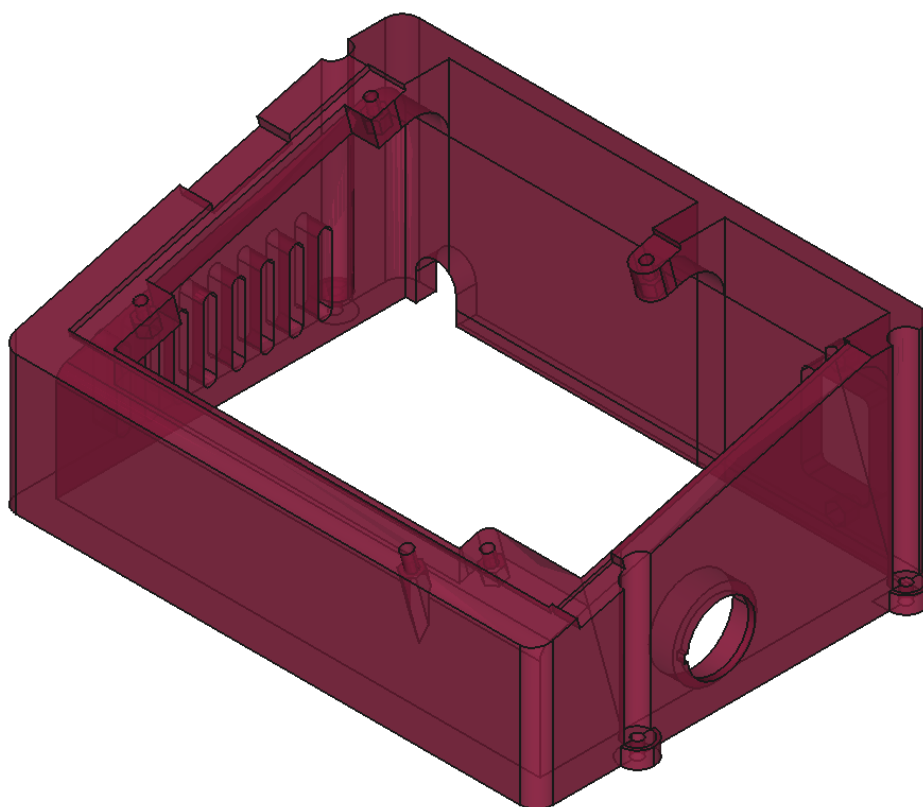
**Obrázek C.9:** Svorka na straně vozíku.



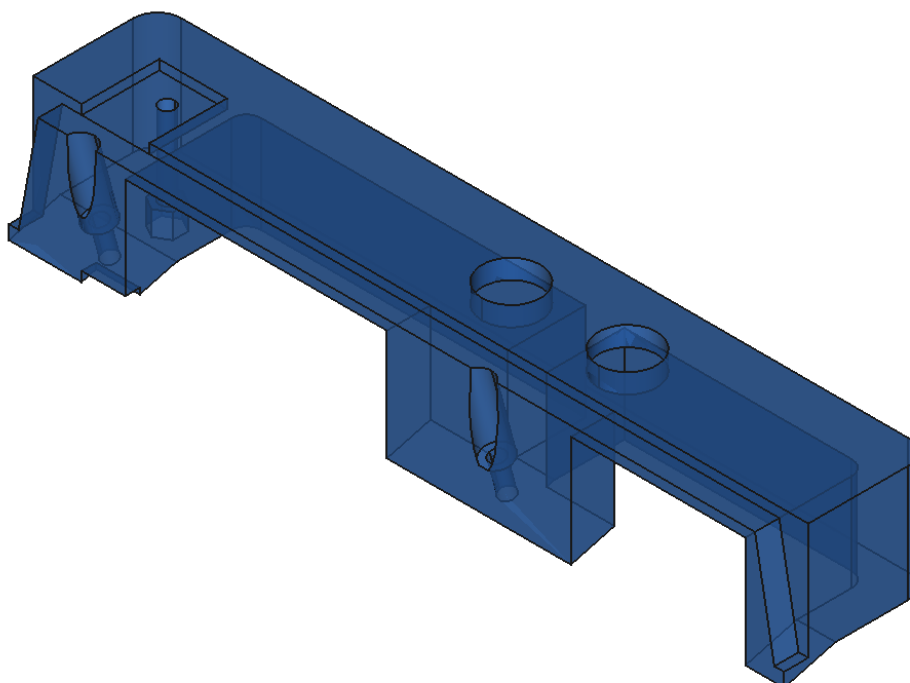
**Obrázek C.10:** Statická svorka.



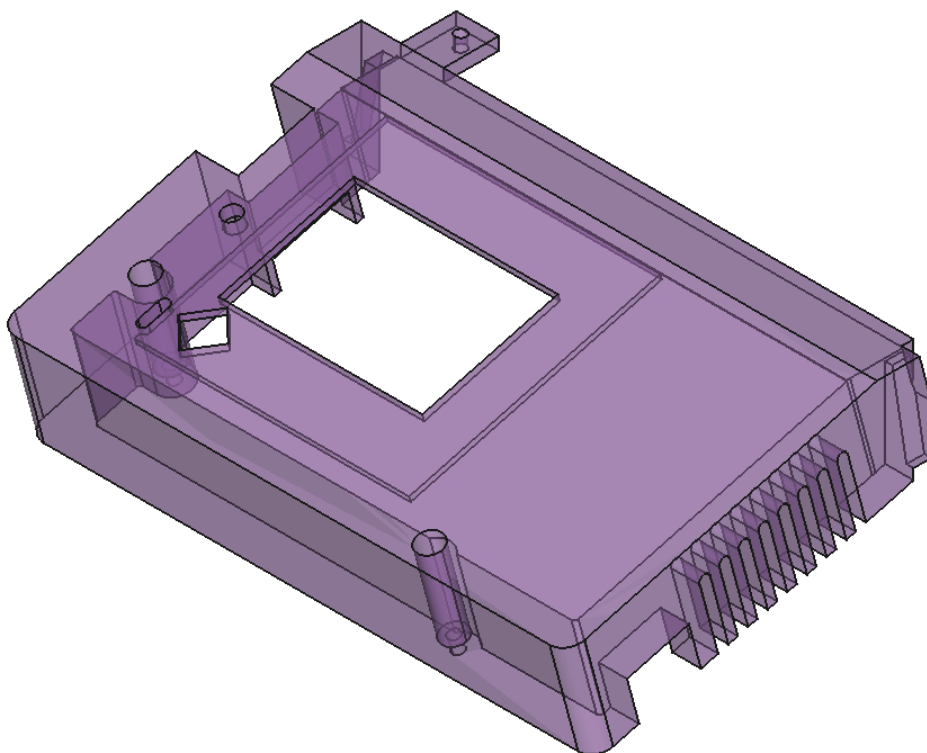
**Obrázek C.11:** Podložka



**Obrázek C.12:** Spodní část krabičky pro elektroniku



**Obrázek C.13:** Uchycení tlačítek na krabičce.

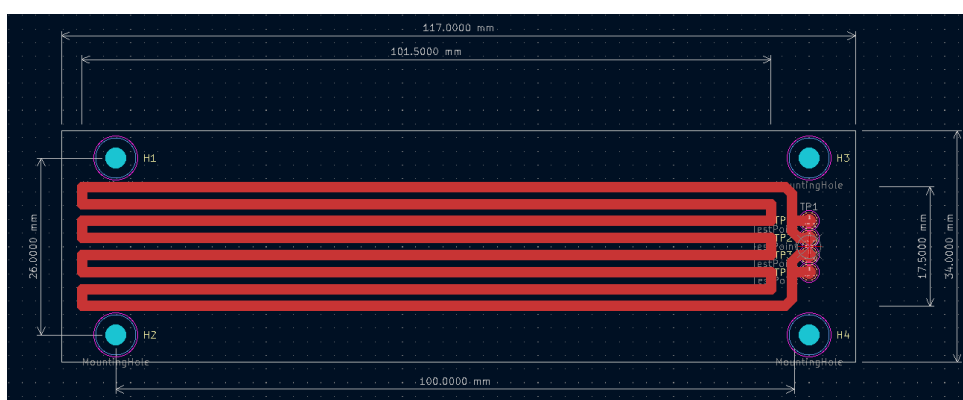


**Obrázek C.14:** Víko krabičky elektroniky.

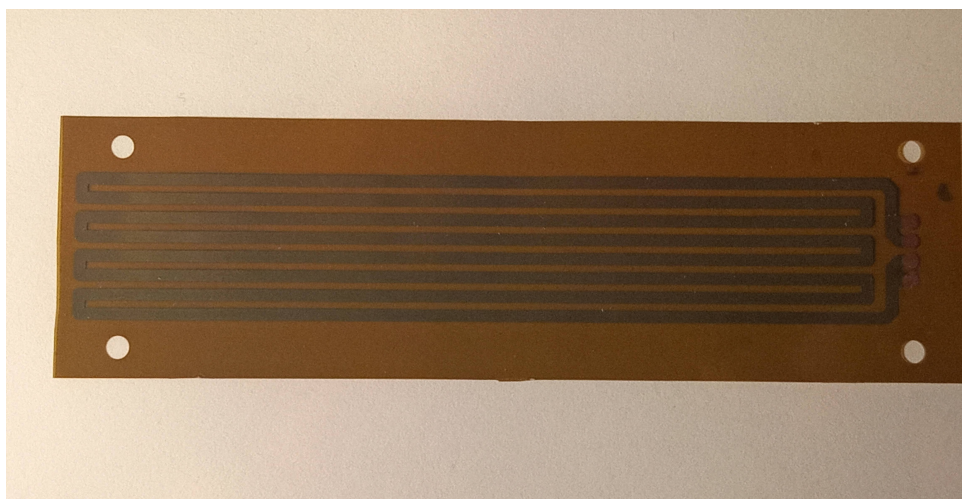


## Příloha D

### Testovací flexibilní plošný spoj



Obrázek D.1: Návrh vzorku podle IPC-TM-650 2.4.3.



Obrázek D.2: Vzorek na polyimidovém základu podle IPC-TM-650 2.4.3.