

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích  
Přírodovědecká fakulta**

**Výroba desek plošných spojů pomocí CNC  
frézovacího zařízení s využitím Open source  
programů**

Bakalářská práce

**Milan Houšť**

Vedoucí práce: Ing. Michal Šerý, Ph.D.

České Budějovice 2018

## Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 18.4.2018

.....  
Milan Houšť

## **Poděkování**

Na tomto místě bych **velmi rád** poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Michalu Šerému, Ph.D., za jeho užitečné praktické rady, profesionální pedagogický přístup, odborné vedení a za čas, který mi věnoval při řešení dané problematiky.

Houšť, M., 2018: Výroba desek plošných spojů pomocí CNC zařízení s využitím Open Source nástrojů [Production of printed circuit boards using CNC devices and Open Source tools. Bc. Thesis, in Czech.] – 58 p., Faculty of Science, University of South Bohemia in České Budějovice, Czech Republic.

### **Abstrakt**

Tématem této bakalářské práce je popis postupu výroby prototypových, ev. malosériových desek s plošnými spoji na frézovacím CNC zařízení. Cílem je vytvoření prakticky použitelného, zdokumentovaného a opakovatelného pracovního postupu, který z výměnných CAD-to-CAM dat zajistí tvorbu řídicích souborů pro CNC zařízení s využitím Open source softwarových nástrojů. V aplikační části bude prezentován výsledek navrženého postupu na konkrétní desce s plošnými spoji.

**Klíčová slova:** deska plošného spoje, DPS, NC, CNC, frézka, fréza, Open source, CAD, CAE, CAM, EDA, G-kód, Gerber, Excellon.

### **Abstract**

This bachelor thesis aims to describe the production process of prototype and small series printed circuit boards on a computer numerically controlled (CNC) milling machine, and to document a practical reproducible working procedure using CAD-to-CAM files and open source tools to create a CNC control file. In the analysis section the results of the proposed procedures will be presented using a specific printed circuit board as example.

**Keywords:** printed circuit board, PCB, NC, CNC, milling machine, cutter, Open source, CAD, CAE, CAM, EDA, G-code, Gerber, Excellon.

# Obsah

1	Úvod – motivace a cíle práce.....	1
2	Open source software – definice, vlastnosti, výhody .....	2
2.1	Definice .....	2
2.2	Vlastnosti Open source programů .....	2
2.3	Nejpoužívanější Open source licence .....	3
2.4	Vývoj a podpora .....	3
2.5	Výhody používání řešení založeného na Open source .....	3
3	Desky s plošnými spoji.....	4
3.1	Plošné spoje v elektrotechnice [3],[4],[5],[6],[7].....	4
3.2	Typy materiálů na výrobu plošných spojů .....	5
3.2.1	Materiály izolační nosné vrstvy .....	5
3.2.2	Materiál vodivé vrstvy .....	6
3.3	Funkční, informační a ochranné části DPS – popis vrstev .....	6
3.3.1	Vrstvy spojů, prokovy .....	6
3.3.2	Vrstva vrtání .....	7
3.3.3	Vrstvy nepájivé masky .....	7
3.3.4	Vrstvy popisů .....	7
3.3.5	Vrstva ořezu – formátování na výsledný tvar.....	8
3.4	Ochrana nezamaskovaných částí plošného spoje .....	8
3.5	Opravy DPS.....	9
4	Způsoby softwarového návrhu DPS – EDA/CAD/CAM .....	10
4.1	Open source EDA/CAD/CAM software .....	11
5	Výměnné formáty CAD-to-CAM .....	12
5.1	Formát dat Gerber .....	12
5.2	Valor ODB++.....	13
5.3	GenCAM (IPC-2511).....	14

5.4	IPC 2581 .....	14
6	Frézka [16] .....	15
6.1	Popis stavebnice .....	15
6.2	Sestavení frézky .....	17
6.2.1	Konstrukce stroje .....	17
6.2.2	Lineární posuvy – vedení podél třech os, pohony .....	17
6.2.3	Mazání .....	20
6.2.4	Elektroinstalace .....	20
6.2.5	Instalace SW .....	21
6.2.6	Uvedení do provozu .....	21
6.3	Dodatečné úpravy frézky .....	21
6.3.1	Měřicí sonda .....	22
6.3.2	Koncové spínače .....	23
6.3.3	Tuhost zařízení 1 .....	24
6.3.4	Tuhost zařízení 2 .....	25
6.4	Úprava konfigurace GRBL – firmware .....	26
6.5	Výsledná sestava frézky a řídicího počítače .....	28
7	Řízení CNC obráběcích strojů .....	29
7.1	Popis řízení NC stroje .....	29
7.2	Popis řízení CNC strojů .....	29
7.3	Data pro řízení CNC strojů .....	30
7.4	G-kód – stručný popis [20] .....	30
8	Konverzní nástroje CAD-to-CAM => G-Kód .....	32
8.1	FlatCAM .....	32
9	Aplikační část .....	33
9.1	Použitý hardware .....	33
9.2	Použitý software .....	33

9.3	Použité nástroje .....	34
9.4	Použité nářadí .....	34
9.5	Použitá měřidla a fotoaparát .....	35
9.6	Vstupní data .....	35
9.7	Konverze dat – FlatCAM – tvorba NC souborů .....	36
9.7.1	NC data pro frézování dělicích čar .....	36
9.7.2	NC data pro vrtání .....	38
9.7.3	NC data pro formátování desky .....	39
9.7.4	Ověření konverze dat .....	40
9.8	Tvorba desky plošného spoje .....	40
9.8.1	Výšková mapa .....	41
9.8.2	CNC frézování DPS .....	42
9.8.3	CNC vrtání DPS .....	43
9.8.4	CNC formátování DPS .....	44
9.9	Ukázka vyrobené desky plošného spoje .....	44
10	Závěr .....	45
11	Seznam obrázků: .....	46
12	Reference .....	48
13	Přílohy .....	50

# 1 Úvod – motivace a cíle práce

Motivací této práce je rozšíření využití zařízení CNC2418 k výrobě desek s plošnými spoji (dále jen DPS). Činnost CNC frézky je primárně řízena daty ve formátu G-kódu. Software pro návrh zapojení a design DPS tento formát dat pro řízení NC stroje ale negeneruje.

Cílem této práce je navrhnout postup výroby DPS pomocí CNC frézovacího zařízení CNC2418. Výrobním podkladem a vstupními daty budou CAD-to-CAM výstupy jednotlivých vrstev DPS ve standardním výměnném formátu dat Gerber. Dílčím cílem práce je konverze výměnného CAD-to-CAM formátu dat Gerber do formátu pro řízení CNC stroje, G-kódu. Druhým dílčím cílem je praktické ověření navrženého postupu výrobou plošného spoje na CNC frézce.



## 2 Open source software – definice, vlastnosti, výhody

Každý využívaný program v této práci splňuje podmínky pro zařazení do kategorie Open source programů, proto tuto kategorii programů stručně přiblížím.

### 2.1 Definice

Vlastní plnou definici termínu Open source software lze nalézt na webových stránkách iniciativy OSI – Open Source Initiative [1]. Obecně platí, že jsou to programy s přístupným zdrojovým kódem, které splňují všechny podmínky, které jsou shrnuté v následující kapitole. Příklady masově rozšířených Open source řešení jsou například programy MySQL, OS Linux, PHP, Python, Firefox, Android, Libre Office, Inkscape, 7-Zip, Midnight Commander, MediaWiki, Koha a i Moodle.



Obrázek 1 Logo OSI  
Převzato z <https://opensource.org/>

### 2.2 Vlastnosti Open source programů

Každý program, který je šířen pod nějakou Open source licencí, viz dále, musí splňovat následující podmínky, převzato z [1]:

1. Free Redistribution (možnost volného šíření).
2. Source Code (přístupný zdrojový kód).
3. Derived Works (možnost tvorby odvozených prací).
4. Integrity of The Author's Source Code (integrita zdrojového kódu autora).
5. No Discrimination Against Persons or Groups (zákaz diskriminace osob a skupin).
6. No Discrimination Against Fields of Endeavor (zákaz diskriminace oblasti využití).
7. Distribution of License (šíření licence – není třeba přídavných licencí).
8. License Must Not Be Specific to a Product (nezávislost licence na programovém produktu).
9. License Must Not Restrict Other Software (licence nesmí omezovat používání dalších programů).
10. License Must Be Technology-Neutral (licence musí být technologicky neutrální).

## 2.3 Nejpoužívanější Open source licence

Licence je jednání s uživatelem nebo sdělení, které blíže specifikuje pravidla a podmínky použití programu – autorského díla. Žádné licenční ujednání nesmí anulovat platnost pravidel pro Open source software [1]. V praxi běžně používanými „Open Source“ licencemi jsou dle OSI tyto [2]:

- Apache License 2.0 (Apache-2.0),
- 3-clause BSD license (BSD-3-Clause),
- 2-clause BSD license (BSD-2-Clause),
- GNU General Public License (GPL),
- GNU Lesser General Public License (LGPL),
- MIT license (MIT),
- Mozilla Public License 2.0 (MPL-2.0),
- Common Development and Distribution License version 1.0 (CDDL-1.0),
- Eclipse Public License version 2.0.

Licencí Open source software existují desítky, viz web OSI [2].

## 2.4 Vývoj a podpora

Open source programy vyvíjí, administrují, šíří a udržují různé skupiny vývojářů, od týmů profesionálů až po jednotlivce, amatérské programátory. Mimo možné nulové ceny je pro mnoho znalých uživatelů důležité i to, že mají systém pod plnou kontrolou, že nejsou při jeho užívání omezováni. Obecně platí, že vývoj Open source programů směřuje a urychluje nespočetná skupina uživatelů, testerů a přispěvovatelů. To, že se na vývoji a financování podílí mnoho uživatelů, včetně institucí, a dokonce i stát (např. systém KOHA, dotace VISK3 Ministerstva kultury na doprogramování určitých modulů), bývá někdy ve výběrových řízeních argumentem pro volbu Open source řešení.

## 2.5 Výhody používání řešení založeného na Open source

Používání tohoto typu programů [1] je vhodné pro ty, kdo chtějí mít přehled o tom, jak program pracuje. A také pro ty, kdo svojí vlastní iniciativou a znalostmi jsou schopni dané řešení plně využít anebo jako členové komunity uživatelů přizpůsobit pro své potřeby. Protože není vyloučeno použití v komerční sféře a Open source programy lze prodávat za jakoukoliv cenu, mnoho softwarových společností se vydalo cestou monetizace Open source programů, na kterých postaví své vlastní komerční řešení (např. linuxová distribuce Red Hat).

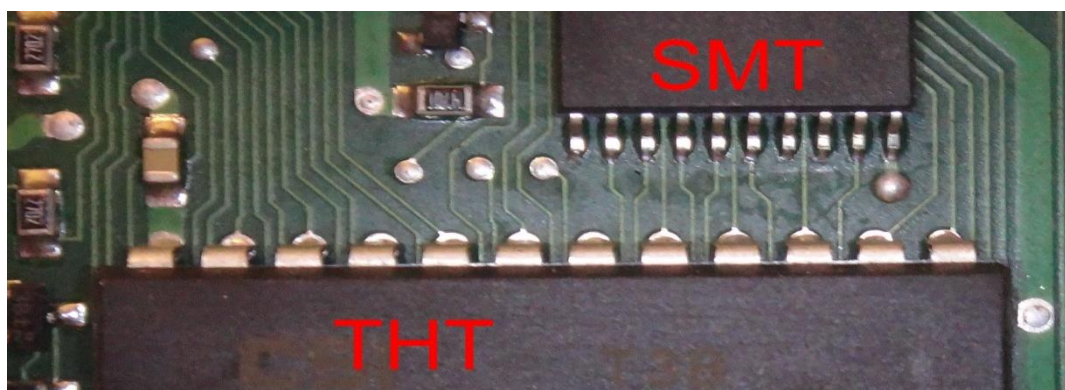
### 3 Desky s plošnými spoji

Předmětem zájmu této práce jsou plošné spoje, proto bude tato kapitola věnována jejich stručnému popisu.

Plošným spojem rozumíme nosnou vrstvu nevodivého materiálu s vodivými vrstvami. Každá použitá vodivá vrstva obsahuje propojovací cesty a umožňuje osazením součástek, ev. propojením vrstev, realizaci požadovaného zapojení dle schématu. Nosné i vodivé vrstvy mohou být z různých materiálů a volí se dle cílového použití zařízení a vzhledem k rentabilitě výroby.

#### 3.1 Plošné spoje v elektrotechnice [3],[4],[5],[6],[7]

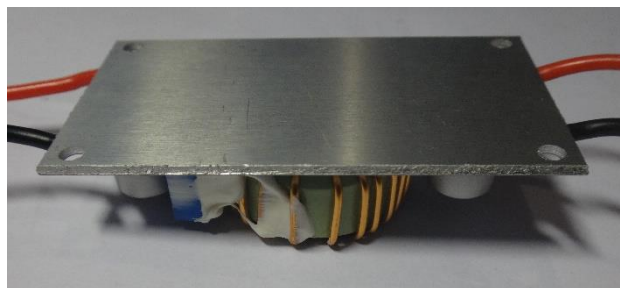
Od samého počátku realizace elektronických zapojení se konstruktéři potýkali s nutností prvky obvodu někam umístit a propojit dle zamýšleného účelu. Vývoj řešení této problematiky prošel určitým vývojem, řešení se přizpůsobovala používané součástkové základně a technologickému vývoji. Ranná elektrotechnická zařízení byla konstruována bez použití plošných spojů mechanickým spojováním součástek (šroubové spoje). Později se začaly používat vývodové součástky a ke spojování se používalo prostorové uspořádání a spojování pájením na izolovaná pájecí očka. S rozmachem elektroniky vznikl dodnes používaný způsob realizace zapojení s využitím plošných spojů. Nejdříve ve třicátých letech za použití vodivých laků, o pár let později se již plošné spoje vyráběly leptáním. Vývodové součástky se umísťovaly na plošný spoj skrz díru a na straně spojů se pájely (*Through-hole technology – THT*). S počátkem integrace součástek na konci šedesátých let se začínají objevovat první bezvývodové součástky, které se pájely na povrch plošného spoje – ze strany spojů – a vzniká tak technologie povrchové montáže (*Surface-mount technology – SMT*). Technologie THT a SMT se velmi často používají souběžně i na jedné desce, viz obrázek 2.



Obrázek 2 Technologie výroby THT&SMT na jedné desce  
Zdroj: vlastní

## 3.2 Typy materiálů na výrobu plošných spojů

Polotovar pro výrobu DPS se skládá nejčastěji ze dvou druhů materiálu – nosné izolační vrstvy a tenké vodivé vrstvy, převážně měděné. V dnešní době se lze setkat i s plošnými spoji, které obsahují třetí vrstvu, kovový plech (plech-nejčastěji slitiny hliníku), který desce poskytuje větší mechanickou pevnost a může i odvádět teplo, viz obrázek 3. Detailní informace lze najít v produktových listech konkrétních materiálů, často na stránkách výrobců a prodejců polotovarů desek [5].



Obrázek 3 Kovový podklad DPS  
Zdroj: vlastní

### 3.2.1 Materiály izolační nosné vrstvy

U této vrstvy nás současně zajímá několik vlastností, které předurčují konkrétní cílové použití – například vodivost, mechanická odolnost, nasákavost, měrná hmotnost, tepelná odolnost, rozměrová stálost, vysokofrekvenční vlastnosti (permitivita) a cena.

Historicky nejdříve se používal jako materiál nosné vrstvy DPS tvrzený papír, následně papír zalitý fenolformaldehydovou pryskyřicí (Pertinax, Kartit, Textit) a dnes se převážně používají sklolaminátové materiály zalité pryskyřicí (např. rozšířený materiál FR4). Při frézování má materiál izolační a nosné vrstvy význam hlavně z důvodu stanovení řezných rychlostí nástroje, rychlosti posuvu a použitých nástrojů, ev. způsobu chlazení a povrchové úpravy (nitridace).

Izolační podložka se vyrábí v mnoha tloušťkách, od desetin milimetru až po několikamilimetrové, které zároveň mohou sloužit k uchycení těžších prvků (transformátory, chladiče), ev. jsou součástí mechanické konstrukce zařízení.

### 3.2.2 Materiál vodivé vrstvy

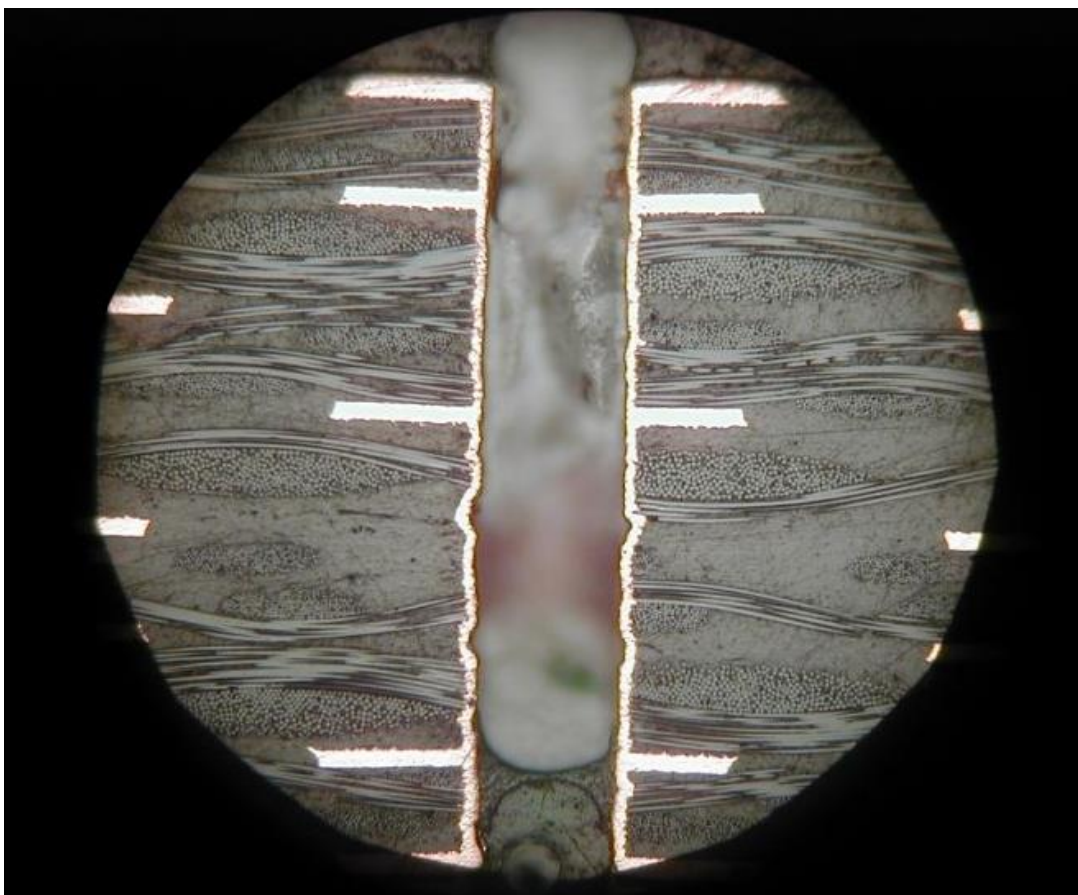
Materiálem vodivé vrstvy je převážně měď v různých tloušťkách vrstvy podle použití – velmi tenké vrstvy 3-5  $\mu\text{m}$  pro VF zapojení, silnější vrstvy více než 105  $\mu\text{m}$  pro větší proudové zatížení. Standardní tloušťka vrstvy je 17-35  $\mu\text{m}$ .

### 3.3 Funkční, informační a ochranné části DPS – popis vrstev

Exaktní popis DPS pro výrobu vyžaduje práci s vrstvami, které integrují totožné a technologicky proveditelné operace jednoho kroku výroby. V každém takovém kroku provádíme kompletní sadu činností určitého typu nad příslušnou částí plošného spoje – frézování, vrtání, popis anebo formátování, tj. ořez desky.

#### 3.3.1 Vrstvy spojů, prokovy

DPS lze běžně vyrábět s řádově desítkami vrstev dle použitého laminovacího zařízení. Laminují se části s již hotovými požadovanými spojovými cestami. Vodivé části jednotlivých vrstev se v případě potřeby spojují tzv. prokovy. Prokovy jsou otvory, které prochází vodivými částmi příslušných vrstev a které se následně galvanicky prokoví. Na obrázku 4 je zobrazen výbrus prokovu, který elektricky spojuje pět vrstev plošného osmivrstvého spoje.



Obrázek 4 Výbrus prokovu vrstev DPS  
Zdroj: <http://www.printed.cz/fotogalerie-893>



Na výbrusu jsou vidět podélné i příčné části tkanin ze skelných vláken (v každé ze sedmi vrstev nosného materiálu) zalité pryskyřicí. Více vrstev nám umožňuje spoje mezi součástkami křížit.

Tato práce ukazuje výrobu maximálně dvouvrstvé DPS, kde jako polotovar používáme celoplošně jedno anebo oboustranně mědí plátovaný nosný materiál. V případě potřeby vrstvy elektricky spojujeme na obou stranách připájenou drátovou propojkou metodou THT. Při tvorbě oboustranné DPS musíme zajistit dostatečně přesné polohování polotovaru, abychom mohli zajistit požadovanou polohu při tvorbě druhé strany spoje.

### 3.3.2 Vrstva vrtání

Tato vrstva popisuje umístění otvorů – na vývodové součástky, ev. montážních – a nese informaci o průměrech nástrojů. Některé Open source programy na ovládání CNC neumí provést příkaz na výměnu nástroje (M6). Proto je někdy výhodné tuto jednu univerzální vrstvu rozdělit na více speciálních vrstev dle použitých vrtáků. Z tohoto důvodu je vhodné porozumět alespoň základní syntaxi formátů Gerber a G-kódu.

### 3.3.3 Vrstvy nepájivé masky

Tyto vrstvy mohou být dvě, horní a spodní. Nepájivá maska je tenká vrstva izolačního materiálu na plošném spoji, která kryje ta místa plošného spoje, která se nepoužívají k pájení nebo montáži, a navíc zabraňuje vzniku nežádoucích můstků mezi spoji při pájení. Snižuje spotřebu pájky při pájení vlnou a brání navlhnutí mědí nepokrytých míst. Pouze teoreticky – celoplošně nanesenou nepájivou masku lze před konečným vytvrzením odfrézovat s pružným uchycením frézy, kdy je síla přtlaku pružinou dostatečná k odfrézování nevytvrzené masky, ale už nepostačuje k průniku do měděné vrstvy, viz obrázek 5. Standardně se potřebné části masky vytvrdí UV zářením a ze zamaskovaných neosvětlených míst se materiál masky odleptá. Následně se maska vytvrdí zahřátím, tj. termickým vytvrzením.



Obrázek 5 Frézování nepájivé masky Zdroj: <https://www.youtube.com/watch?v=7EctuSTL7-w>

### 3.3.4 Vrstvy popisů

Tyto vrstvy mohou být dvě, horní a spodní. Popis je můžeme provádět laserem, lihovým fixem anebo i frézováním. Mimo označení součástek a jejich orientace (např. polarita elektrolytických kondenzátorů, katody diod, barvy LED) je vhodné zapsat i další metadata na DPS – název, verzi, autora, QR kód s linkem na popis konstrukce. V případě oboustranné

DPS musíme zajistit přesné polohování. Frézované popisy vytváříme před aplikací nepájivé masky.

### 3.3.5 Vrstva ořezu – formátování na výsledný tvar

Tato vrstva definuje konečný tvar plošného spoje. Provádí-li se současná výroba několika plošných spojů najednou, je vhodné ponechat při formátování tzv. odlamovací spojovací můstky. Ty zajistí, že již hotový uvolněný plošný spoj nebude frézou posunut do míst, kde bude probíhat ořez dalšího plošného spoje - tím by mohlo dojít k jeho poškození. Následně se všechny spoje z polotovaru odlomí (jako např. u stavebnic plastických modelů).



Obrázek 6 Různé tvary DPS

Zdroj: vlastní

## 3.4 Ochrana nezamaskovaných částí plošného spoje

Měděnou vodivou vrstvu plošného spoje bychom měli ochránit před vzdušnou oxidací, která následně znesnadňuje pájení a zhoršuje kvalitu výsledného spojení se součástkou. Existuje

mnoho způsobů, jak vrstvu mědi ochránit. Mezi ty nejjednodušší patří ošetření povrchu rozpuštěnou kalafunou (v lihu, toluenu apod., viz katalogové listy „laků na plošné spoje“), sofistikovanější metody, které hotovému plošnému spoji zaručí delší dobu pájitelnosti, používají chemické nebo galvanické pokovení. Pokovování je složitější a odbornější proces, kdy spolu jednotlivé kovy mohou reagovat difuzí (např. zlato + měď) a vzniklý dvojkov je nepájitelný a musí se proto použít navíc jakási mezivrstva třetího kovu (cín, nikl), který té difuzi zabrání [8]. Jako nejdostupnější amatérskou a v praxi postačující metodu ochrany vodivé měděné vrstvy používám chemické cínování [9] (nevyžaduje technologickou mezivrstvu) a následné ošetření kalafunovým lakem. Tato ochrana zaručí navíc dlouhodobější neměnnost elektrických parametrů DPS.

Nevhodně zvolená ochrana DPS může zhoršovat její vlastnosti – elektroizolační (maska) a vysokofrekvenční (maska i pokovení).

### **3.5 Opravy DPS**

V dnešní době je většina zařízení realizována kompletně na plošných spojích, a to včetně vstupně výstupních konektorů (USB, 230 V, jack, cinch, power adapter), mechanických ovládacích prvků (tlačítka, vypínače, potenciometry, kodéry), konektorů pro externí bloky (paměti, rozšiřující karty) a v neposlední řadě i těžších prvků (transformátory do DPS, chladiče). V důsledku nadměrného mechanického zatěžování těchto prvků může dojít k mechanickému poškození DPS. Jedná se typicky o předměty každodenního používání, jako jsou mobilní telefony, čtečky, tablety nebo notebooky.

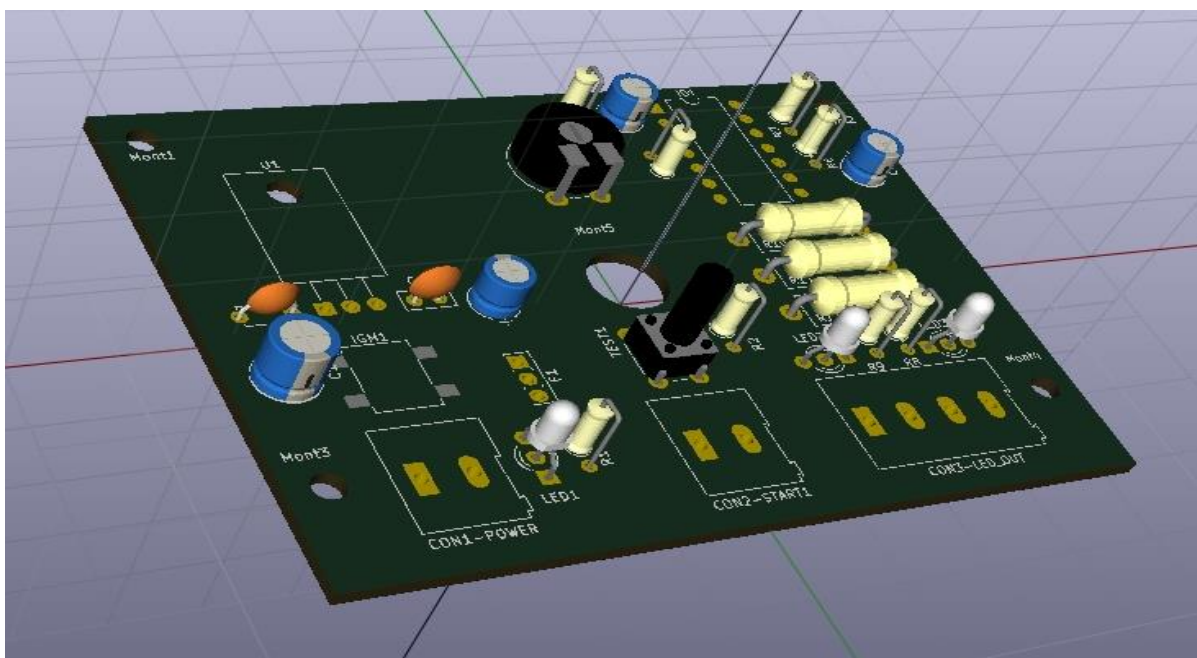
DPS bývá často poškozena odtržením elektricky vodivých částí plošného spoje – vrstvy mědi – od nosného izolačního materiálu anebo mechanickým poškozením nosného izolačního materiálu. Při opravách zajistíme náhradní elektrickou konektivitu (měděné – lanko, drát, pásek) a pokusíme se v případě potřeby obnovit i mechanickou pevnost – například zalitím pryskyřicí. Vždy musíme dbát na to, abychom používali materiály s odpovídajícími (di)elektrickými vlastnostmi. Krajním řešením bývá v určitých případech vyříznutí vadné části a její náhrada.



## 4 Způsoby softwarového návrhu DPS – EDA/CAD/CAM

V dnešní době dostupného výpočetního výkonu a Open Source softwaru pro editaci schémat (EDA), tvorbu designu DPS (CAD) až po možnost exportu dat pro výrobu DPS (Gerber, Excellon), je výhodné i pro kusovou prototypovou, či jednorázovou malosériovou výrobu provádět kompletní návrh (schéma + deska + export dat) za pomoci těchto nástrojů.

Výhodami při návrhu DPS, které zvyšují produktivitu tvorby návrhu, nám budou ukázané spoje dle schématu, naznačená zvolená pouzdra (velikost a tvar) a způsob osazení jednotlivých součástek (odpory nastojato/naležato) a v neposlední řadě i 3D preview výsledného návrhu DPS po osazení součástkami, viz obrázek 7, na kterém je 3D návrh osazené DPS.



Obrázek 7 3D preview osazené DPS  
Zdroj: vlastní

Bez ohledu na používaný software je vhodné při optimalizaci návrhu DPS provádět i dílčí úpravy ve schématu zapojení, které nemají vliv na funkci obvodu, ale které zjednoduší návrh desky plošného spoje (např. pořadí sériově zapojených součástek). Tím lze například snížit počet potřebných vrstev anebo snížit počet drátových propojek na DPS.

## 4.1 Open source EDA/CAD/CAM software

Tato práce nemá za cíl porovnávat použitý návrhový software, pracuje pouze s CAD-to-CAM daty pro výrobu DPS. I když bude v praktické části vyrobena DPS, která byla navržena v systému KiCAD, na konkrétním návrhovém systému v této fázi výroby již nezáleží

Pro splnění cílů této práce potřebujeme pouze CAD-to-CAM datový výstup v požadovaném výměnném formátu. Pro potřeby této práce nepředpokládám úpravy návrhu DPS.

Existují velmi výkonné Open source EDA nástroje, které umožňují tvorbu návrhu DPS a následný export výměnného souboru výrobních dat. Jako příklad můžeme uvést následující programy [11]:

- KiCad, domovská stránka projektu <http://kicad-pcb.org/>,
- Fritzing, domovská stránka projektu <http://fritzing.org/home/>,
- gEDA, domovská stránka projektu, <http://www.geda-project.org/>,

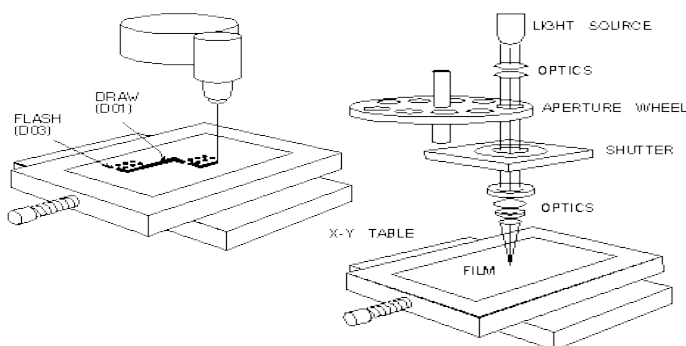
## 5 Výměnné formáty CAD-to-CAM

Tyto CAD-to-CAM výměnné formáty dat umožňují převést návrh plošného spoje z CAD systému ve tvaru, kterému bude po načtení rozumět výrobní CAM software. Protože se už jedná o výrobní podklady, existují ke každému formátu jeho prohlížeče, které nám mohou zobrazit, co který soubor výrobních informací obsahuje.

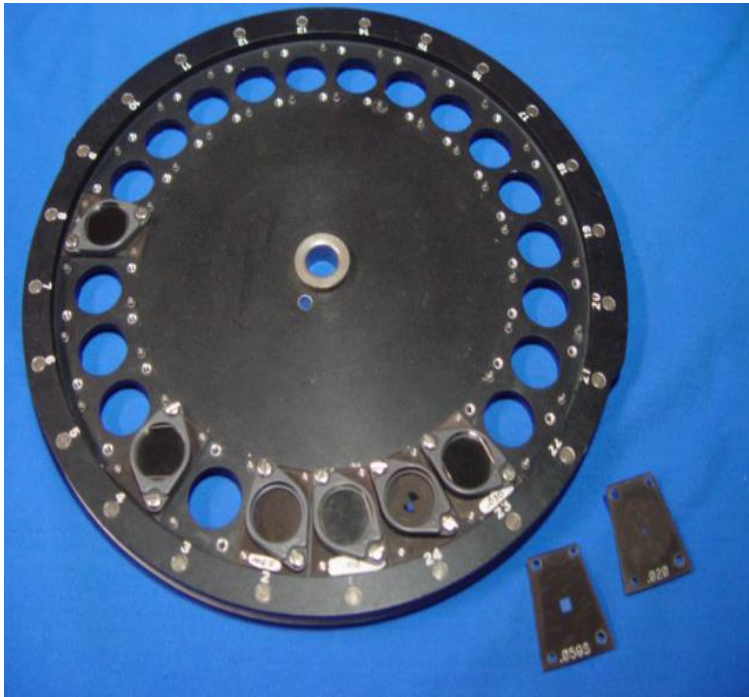
### 5.1 Formát dat Gerber

K výrobě plošných spojů se nejčastěji používá metoda fotocesty. Na vodivou stranu plošného spoje je nanášena vrstva fotorezistu (negativní nebo pozitivní). Vrstva, která je fotocitlivá a kterou lze odleptat po expozici většinou UV zářením v příslušné vývojce a která je navíc odolná proti působení leptací lázně pro měď. V případě negativního fotorezistu (osvícená část polymeruje a vytvrdí se) musíme vytvořit film s předlohou, na kterém jsou budoucí vodivé části mědi nemaskované (bílé) a ostatní neprůsvitné (černé). Tento film se přiloží na polotovar DPS s negativním fotorezistem a osvítí se UV zářením. Následně se vyvoláním odstraní z neexponovaných míst vrstva fotorezistu a tím je deska připravena k leptání měděné vrstvy. (Pozn.: při výrobě se relativně pomalým (a dražším) fotoplotterem vytvoří jedna až dvě co nejkvalitnější archivní předlohy na pozitivní film – co je osvíceno, bylo průhledné. A až následně se z této pozitivní předlohy tvořily pouhým osvitom negativního filmu produkční fólie pro výrobu.)

Formát dat Gerber [12], aktuálně ve verzi RS274-X2, je nejstarším používaným formátem pro tvorbu motivů desek s plošnými spoji pro výrobu. Původně to byl pouze předpis pro práci fotoplotru – pro malování světlem na fotocitlivý materiál. Tvar osvitů byl dán clonkami (čtverce, obdélníky, ovály a jiné tvary různých velikostí), které byly umístěny na karuseli, otáčecím zásobníku (aperture wheel). Pohyb fotocitlivé vrstvy po zadaných souřadnicích X a Y při zapnutém osvitě vytváří spojové cesty – draw, osvit bez pohybu v poloze X a Y vytváří plošky – flash, viz obrázek 8.



Obrázek 8 Formát Gerber - kreslení světlem  
Zdroj: <http://pcbdesign-now.blogspot.cz/>



Obrázek 9 Skutečný karusel se clonkami  
Zdroj: <http://pcbdesign-now.blogspot.cz/>

Výše uvedené schéma nám také objasňuje největší nevýhodu původního Gerber formátu. Původní data neobsahovala popis tvarů a bez odpovídajícího karuselu s clonkami na předepsaných pozicích nikdy nevytvoří požadovaný tvar – původní datový soubor proto nebyl zcela použitelný výrobním popisem – potřeboval ještě informace, na jakých pozicích má být jaká clonka.

Dnes už Gerber výměnný formát ve verzi X2 popisuje mimo kreslicích tvarů i nějaké další výrobní atributy [13]. Protože ale neobsahuje kompletní údaje pro výrobu – barvu masky, tloušťky vrstev a podobně, není komplexním CAD-to-CAM formátem. Proto vznikla v roce 2017 iniciativa správce formátu Gerber, která předkládá návrh na úpravu formátu a žádá uživatele o revizi a o doplnění návrhu.

Současným správcem a držitelem patentových práv je belgická firma UCAMCO. Na jejich domovských stránkách lze nalézt nejaktuálnější specifikace, příklady použití, seznam CAD/CAE/CAM programů, které formát Gerber, které konkrétní specifikace podporuje a podobně.

**Vzhledem k obecné podpoře výrobců CAD/CAE/CAM systémů budeme formát GERBER používat ke konverzi dat z CAD/CAM do sady instrukcí pro obráběcí NC stroj.**

## 5.2 Valor ODB++

Valor ODB++ je výměnný CAD-to-CAM data formát plošných spojů vyvinutý v roce 1995 firmou Valor Computerized Systems, Ltd., kterou od roku 2010 vlastní firma Mentor Graphics, Siemens. Je dalším z výměnných formátů, který popisuje DPS – vrstvy plošného spoje. Navíc, oproti formátu Gerber, obsahuje údaje pro výrobu, předpis pro osazování

součástek a testování obvodů. Použití zvyšuje automatizaci, snižuje chybovost a eliminuje lidský faktor.

Oproti formátu Gerber, který lze považovat za otevřený standard, u tohoto formátu byly jisté obavy, jakým směrem se bude vyvíjet podpora a licenční podmínky ze strany vlastníka licence. Obavy panovaly hlavně u konkurenčních výrobců CAD/CAE systémů. I to může být důvod, proč není více používán. [15]

### **5.3 GenCAM (IPC-2511)**

Formát podporovaný organizací IPC (Asociace spojující elektronický průmysl). Oproti Valor ODB++ otevřený, nevlastněný žádnou firmou. Nenašel širší podporu výrobců, nerozšířil se. Vlastnosti podobné s ODB++ [15].

### **5.4 IPC 2581**

Poslední a nejkomplexnější formát podporovaný organizací IPC (asociace spojující elektronický průmysl). Obsahuje to nejlepší z ODB++ a GenCam. Zatím nerozšířen, nevlastní jej žádná firma, viz [14].

Panuje názor, že tvůrci CAD/CAE/CAM programů by mohli mít jisté obavy ze snadné přenositelnosti dat, proto zatím nedochází k masivní implementaci tohoto formátu dat [15].



## 6 Frézka [16]

Pro otestování navržených postupů a možností tvorby DPS frézováním na NC stroji řízeném počítačem byla pořízena stavebnice frézky, viz obrázek 10.



**RATM MOTOR** **CNC2418**  
500mw 405nm Laser  
**Laser GRBL**

EU Delivery! CNC 2418 GRBL control Diy CNC machine working area 24x18x4.0cm, 3 Axis Pcb Pvc Milling machine Carving Engraver, v2.5  
★★★★★ 5.0 (11 votes) | 17 orders

Price: **US \$185.89 - 335.50** / piece  
Bulk Price ▾

Ships From:  China  Germany

Color: 

Shipping: **US \$54.11 to Czech Republic via DHL\_DE** ▾  
Estimated Delivery Time: 9-42 days ?

Quantity:  piece (469 pieces available)

Total Price: Depends on the product properties you select

Obrázek 10 Stavebnice frézky  
<https://www.aliexpress.com>

### 6.1 Popis stavebnice

**Mechanickou část tvoří:**

- hliníkové profily 20x20 mm, 9ks,
- hliníkový stůl 180x250 mm, 1ks,
- nepodepřené vodící tyče průměru 10 mm, 4ks,
- trapézové dvouchodé šrouby průměru 8 mm se stoupáním 4 mm, 2ks,
- sestavená osa Z, zdvih cca 45 mm, 1ks,
- spojovací a pomocný materiál – šrouby, úhelníky, držáky vodících tyčí, ploché držáky motorů, pevné spojky motor-šroub, podpěry.

Část dílů je vytištěna na 3D tiskárně.



Obrázek 11 Stavebnice frézky  
Převzato z <https://www.aliexpress.com>

## Elektrickou výbavu stroje tvoří:

- **3 krokové motory** o rozměrech Nema17, model: 17HS1352-P4130

Specifikace [XX]:

Počet fází: 2

Počet přívodních kabelů: 4

Přesnost natočení:  $\pm 5\%$  (plný krok, bez zátěže)

Přesnost odporu vinutí:  $\pm 10\%$

Přesnost indukčnosti vinutí:  $\pm 20\%$

Úhel kroku:  $1.8^\circ$

Max. proud: 1.33A

Napájecí napětí: 12 V – 24 V DC

Přídržná síla: 1,26 N/m

Radiální zatížení hřídele: 2.2Kg/cm

Průměr hřídele: 5 mm

Délka přívodních vodičů: 30cm

Rozměry vnější: 42 mm x 42 mm



Obrázek 12 Použitý krokový motor  
Zdroj: vlastní

## - řídicí elektronika je

GRBL kontroler (alias Woodpecker, Atmel328p,

sloty pro 3 drivery

krokových motorů,

napěťové stabilizátory,

spínání motoru vřetena a

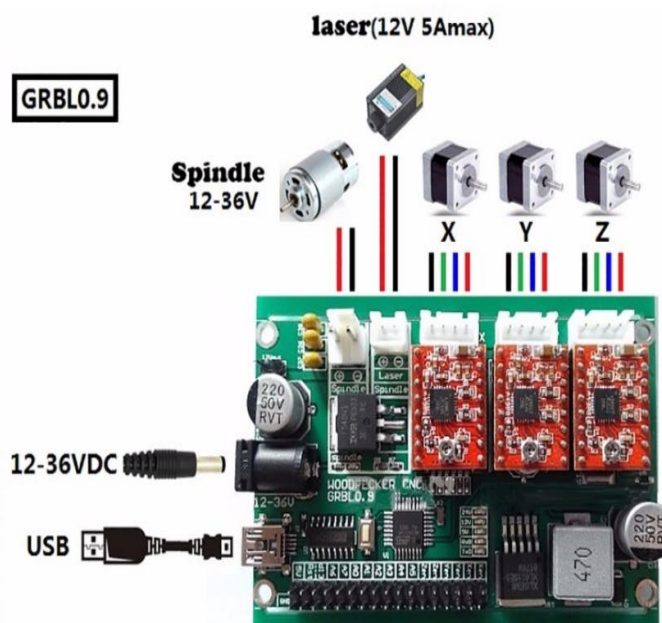
laseru, konektor

propřipojení koncových spínačů a měřicí sondy),

Řídicí elektronika je

dobrá s firmwarem –

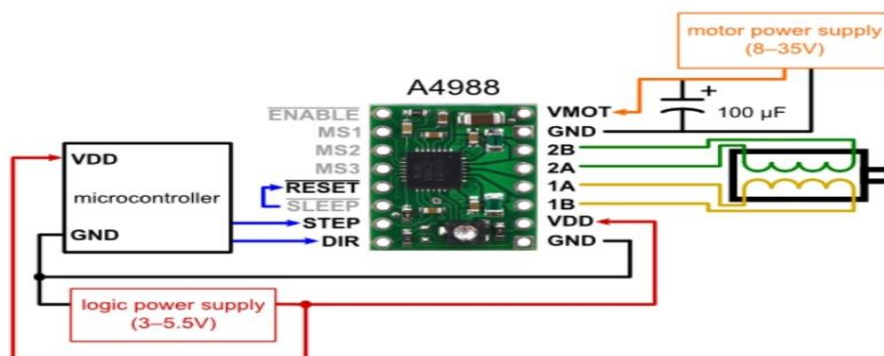
GRBL v.0,9.



Obrázek 13 Elektronika frézky  
Zdroj: <https://images-eu.ssl-images-amazon.com>

GRBL je OpenSource projekt pro Arduino nano (Atmel328p), který interpretuje a vykonává přijímaný G-Code. HW limitem této verze software je možnost ovládat pouze tři osy CNC zařízení.

- **drivery krokových motorů** Pololu s čipem Allegro A4988 (mikrostep 1/16, napájení 8-35 V, 1-2 A proud – dle chlazení), velmi rozšířené u CNC shieldů a RAMPs pro 3D tiskárny.



Obrázek 14 Zapojení pololu driveru s A4988  
Zdroj: <https://www.pololu.com/>

- spínaný napájecí zdroj DC, 24 V/5 A,
- propojovací kabely, včetně USB do PC.

**Vřeteno** je tvořeno komutátorovým stejnosměrným motorem 36 V/2 A (odběr měřen bez zatížení). Osa o průměru 5 mm se redukuje mosaznou spojkou na průměr 3,175 mm (1/8 palce), která slouží k upínání nástrojů. Otáčky bez zatížení při napájecím napětí 24 V jsou 10000 (dle prodejce, neměřeno).

## 6.2 Sestavení frézky

Na úvod k terminologii – frézka je označení pro frézovací stroj, fréza je nástroj na frézování.

### 6.2.1 Konstrukce stroje

Z hlediska konstrukce se jedná o portálovou frézku s pevným portálem, na kterém je horizontální vedení osy X, po kterém se pohybuje mechanismus svislé osy Z. Osa Y je vedena horizontálně pod portálem, kolmo na osy X i Z.

### 6.2.2 Lineární posuvy – vedení podél třech os, pohony

Všechny tři osy mají téměř stejné složení – nepodepřené vodící tyče, lineární kuličkové vedení, pohybový trapézový šroub, trapézovou matici s protikusem, kde vložená pružina tvoří



předpětí. Trapézový šroub je na jedné straně pevnou spojkou 8 mm/5 mm přímo spojen s hřídelí krokového motoru. U osy X a Y, které jsou vodorovné, je druhý konec šroubu podepřen v ložisku v domku. Osa Z je svislá a krátká, proto není na konci šroub podepřen. Veškeré axiální síly při zrychlení posuvu a obrábění se přenášejí na ložiska krokového motoru.

(Návrh na zlepšení: při koupi vybírat takovou konstrukci, která má pohybový šroub spojen s konstrukcí samostatným domkem s ložisky, která přenášejí axiální síly. Motor lze následně připojit i osově pružnou spojkou, viz obrázek 15. Podepřené tyče os X a Y by zvýšily tuhost zařízení.)



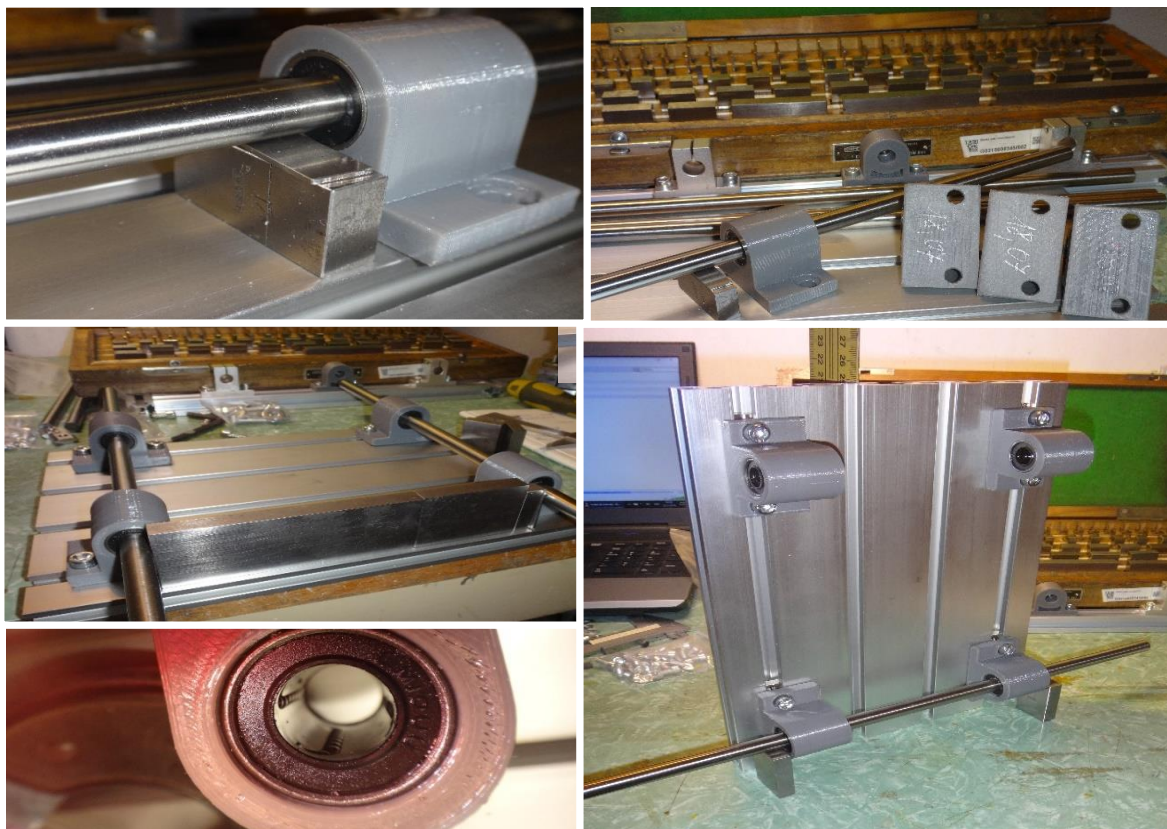
Obrázek 15 Pružná spojka  
Zdroj: vlastní

### 6.2.2.1 Osa Y

Po sestavení spodního rámu frézky jsem začal připravovat díly pro montáž osy Y. Abych si zajistil co možná nejlepší výsledky měření parametrů po sestavení, přeměřil jsem pomocí základních měrek, zapůjčených z PF JČ a svého mikrometru, díly ve stavebnici:

#### Držáky stolu na vodicích tyčích

Pracovní stůl je připevněn k vodící tyči čtyřmi na 3D tiskárně zhotovenými díly s vložením kuličkovým lineárním vedením. S těmito díly byly provedeny dvě úpravy. Byla sražena jedna

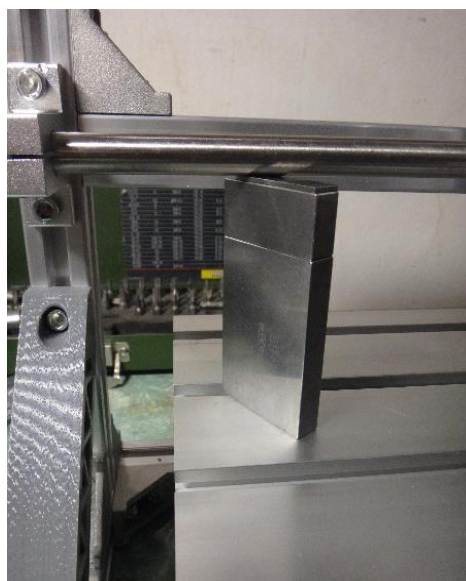


Obrázek 16 Měření a montáž vodicích tyčí osy Y  
Zdroj: vlastní

hrana spodní plochy, která je ve styku se stolem. V tom místě začal tisk 3D dílu a byl tam materiál navíc, který narušoval rovinnost dosedací plochy – cca 0,3-0,4 mm. Po této úpravě všech čtyř dílů bylo provedeno měření vzdáleností mezi spodní plochou a zasunutou vodící tyčí ve vedení. Naměřené hodnoty všech dílů byly v rozmezí 0,08 mm, proto bylo provedeno zaškrabání plochy na jednotný rozměr 18,07 mm, na rozměr nejnižšího dílu. Vodorovnost upevnění držáků vodících tyčí byla nastavena pomocí základních měrek, viz obrázek 16. Následně byl stůl i s vedením a s přišroubovanou pohybovou maticí upevněn na rám přibližně na střed (+2 mm, není důležité). Poté byl zašroubován pohybový šroub do stolu, krokový motor a podpěra šroubu do rámu frézky.

#### 6.2.2.2 Osa X

Osa X je umístěna na portálu, rozteč vodících tyčí je dána pevným vedením sestavy osy Z. Při montáži byla nastaven spodní vodící tyč osy X rovnoběžně se stolem, viz obr. (Pozn. Tato metoda předpokládá rovinnost stolu.) Po dosažení stejné vzdálenosti u spodní tyče byla dotažena i horní tyč vedení – po najetí sestavy osy Z do krajních poloh).



Obrázek 17 Seřizování osy X  
Zdroj: vlastní

#### 6.2.2.3 Osa Z

Osa Z se dodává ve smontovaném stavu. Je třeba pouze dotáhnout šrouby pevné spojky mezi krokovým motorem a posuvným šroubem.

#### 6.2.2.4 Pohony os

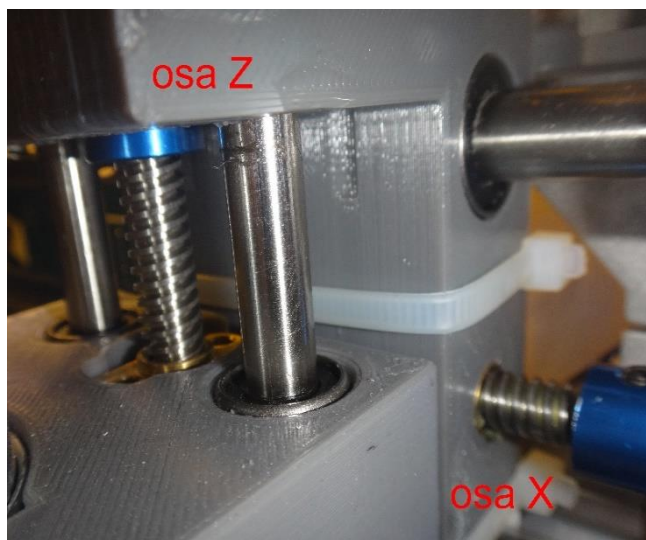
Pohyb po osách zajišťují krokové motory, viz informace o elektrické výbavě stavebnice v kapitole 4.1. Použité řešení nepoužívá ke zjišťování aktuální pozice žádnou zpětnou vazbu (kodér na hřídeli motoru) nebo odměřování (snímače polohy na osách) a aktuální pozice vřetene je počítána výlučně z počtu odeslaných kroků řídicím systémem, z parametru motoru počet kroků na otáčku ( $360^\circ/1,8^\circ=200$ ), ze stoupání použitého pohybového šroubu a ze směru otáčení.

Je-li systém dobře navržen, při jeho standardním používání nedochází k tzv. ztrátě kroku, kdy je do motoru odeslán impuls a motor krok neprovede. Tento stav nastává obecně při přetížení krokového motoru. Například není-li systém vybaven koncovými spínači a systém se dostane do některé z krajních poloh, do motoru jsou odesílány impulsy k provedení kroku, ale žádný

krok se provést už nemůže. Další možností je neúměrné zatížení vřetene při obrábění (rychlý posuv, velké zrychlení, velká tříska), kdy také může dojít ke ztrátě kroku.

#### 6.2.2.5 Zjištěné problémy

Společným problémem všech tří os je nesouosé spojení hřídele krokového motoru s posuvným šroubem. Zatímco u osy Y je problém „vyřešen“ větší vzdáleností (3,5 cm) modré spojky, viz obrázek 18, osa/šroub od posuvné matice stolu a možným ohybem šroubu, u os X a Z se spojka a mosazná pevná matice dostávají v krajních polohách téměř do kontaktu, viz obr.



Obrázek 18 Spojky motor x pohybový šroub  
Zdroj: vlastní

18 a v těchto polohách, zvláště pak u osy X, která je na svém druhém konci

radiálně fixována, už lze šroubem otočit velmi ztuhá. Důsledkem je zbytečné radiální zatěžování motoru, pohybového šroubu s maticí a spojky s důsledky rychlejšího opotřebení, možné nepřesnosti a možnosti ztráty kroku.

#### 6.2.3 Mazání

Na vodící tyče i pohybové šrouby byl nanesen tenký film maziva HIWIN PLO-05. Mazání je velmi důležité a potřebné, snižuje tření mechanických částí a zvyšuje jejich životnost. V našem případě, kdy vodící tyče a pohybové šrouby neobsahují prachové krytí, odfrézovaný materiál se na namazaných částech zachytává. Uvědomíme-li si, že budeme frézovat skelnou tkaninu zalitou v pryskyřici, frézováním vytvořený jemný prach se stane velmi tvrdým a účinným abrazivem. Proto při frézování DPS zakrývám vodící tyče i pohybový šroub osy Y folií.

#### 6.2.4 Elektroinstalace

Krokové motory jsem do řídicí jednotky zapojil dle přiloženého návodu (správně zapojit X, Y a Z), viz kapitola 4.1 *Popis stavby*, zapojil jsem i kabely od vřetena, USB kabel do PC a napájení. Konektory vylučují chybné zapojení, které by mohlo elektroniku poškodit.

U motoru, který tvoří vřeteno, je třeba připevnit červený kabel na faston, který má u sebe červenou tečku. Při opačném zapojení se motor točí doleva.

### 6.2.5 Instalace SW

Z přiloženého CD o průměru 8 cm jsem nainstaloval ovládací software GRBLControl, verze 0.8. Na stránkách projektu GRBL je reference na stažení stejně vypadající, aktuálnějšího ovládacího software Candel, pro GRBL v.0.9 je určena verze 1.0.11. [17]. Ovládací software se neinstaluje, po stažení a rozzipování do libovolné složky jej lze spustit spuštěním souboru Candel.exe.

### 6.2.6 Uvedení do provozu

Po zapnutí napájecího napětí a spuštění ovládacího programu se nastaví správný komunikační port počítače (*service, settings, connection*) a šipkami v sekci *Jog* programu jsem vyzkoušel posuny podél všech os. – funkčnost a správný směr pohybu. Při prvním zapnutí motoru-vřetene se rotor vřetena pouze pootočil a celé zařízení přestalo pracovat. Po proměření zdroje jsem zjistil, že není na výstupu žádné napětí. Zařízení jsem proto připojil k laboratornímu zdroji, max. 42 V/2 A s nadproudovou ochranou, nastavil jsem napětí 24 V a maximální proud 500 mA. Posuvy začaly pracovat a nedocházelo k zapínání nadproudové ochrany. Při zapnutí vřetene již došlo k poklesu napětí v důsledku nadproudu zdroje, po nastavení maximálního povoleného proudu laboratorního zdroje na 1,5 A zařízení pracovalo bez problémů. Poté jsem napájecí napětí zvýšil na 34 V (max. povolené je 36 V) a opět vyzkoušel vřeteno. Významně se zvýšily jeho otáčky, což je pro frézování malými průměry nástrojů žádoucí. Z kabelu sekundárního vedení dodaného vadného napájecího zdroje jsem vytvořil napájecí kabel s připájenými banánky do laboratorního zdroje pro dlouhodobější používání tohoto způsobu napájení.

## 6.3 Dodatečné úpravy frézky

První hodiny používání frézky ukázaly nějaké nedostatky. Následuje proto popis provedených uživatelských úprav, které výrazně zlepšily užité vlastnosti zařízení, nejsou finančně nákladné a k jejich provedení postačí vrtačka, vrtací kladivo (lze zapůjčit), pilka na železo, pilníky, smršťovací bužírky a trocha spojovacího materiálu.



### 6.3.1 Měřicí sonda

Měření obrobku anebo určování aktuální polohy nebo délky vyměněného nástroje je standardní funkcí CNC zařízení. Projekt GRBL nabízí tuto funkcionalitu a záleží pouze na ovládacím programu, jak ji dokáže využít – buď pouze na tvorbu výškové mapy, nebo i na automatické odměření délky nástroje po výměně anebo určení středu kruhového otvoru – pro určení nulových pozic X a Y. Zapojení měřicí sondy testuje, jsou-li dva konkrétní piny desky elektroniky zkratované – vyžaduje elektrickou konektivitu.

V našem případě plánovaného frézování plošných spojů, kdy frézujeme pouze do hloubky 0,1-0,2 mm, musíme zaručit rovinnost upnuté DPS na celé používané ploše nejlépe v rozmezí do 0,05 mm. Tuto v amatérských podmínkách obtížně dosažitelnou podmínku obejdeme tím, že vytvoříme tzv. výškovou mapu, kdy si frézka měřicí sondou zjistí aktuální výšky upnuté desky v určitém, námi zadaném obvodu a rastru. Při frézování pak dle aktuální pozice X a Y a výškové mapy dynamicky mění polohu osy Z tak, aby hloubka řezu byla téměř konstantní.

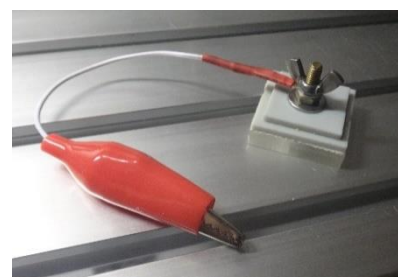
Protože se sonda při používání pohybuje s osou X a s osou Z (s vřetenem), nabízí se možnost vedení jejího elektrického připojení svazkem elektroinstalace pro vřeteno, koncové spínače osy Z a napájení krokového motoru posunu osy Z. Proto jsem vyrobil (vyfrézoval) držák elektrického připojení sondy a přilepil jsem jej na držák vřetena. Pomocí křídlové matky lze k držáku připojit kabel, který připojíme na sondu ve vřetení. Tím odpadne hlídání jednoho kabelu při vytváření výškové mapy. Podobné řešení kabeláže se nabízí provést i s druhou částí sondy, která by mohla být připojená trvale ke stolu. Ke stolu ale nevede žádná elektroinstalace, a tak zatím druhou část sondy



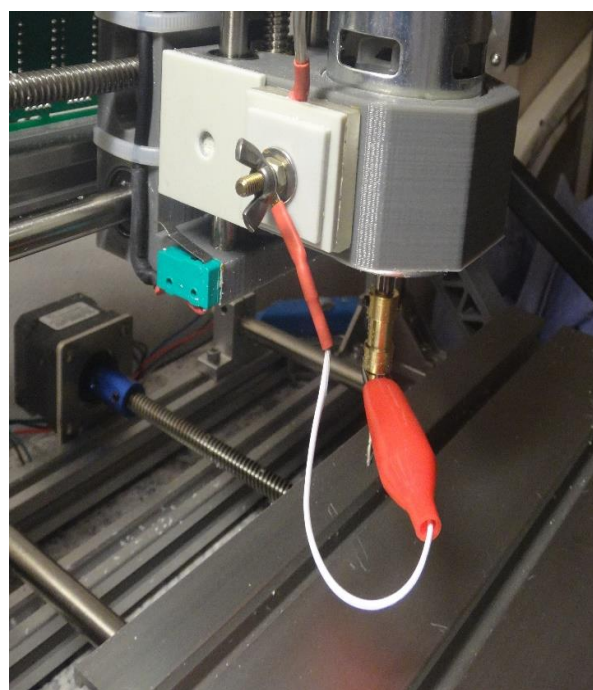
Obrázek 19 Vyfrézovaná část držáku, zdroj: vlastní



Obrázek 20 Šroub sondy s pájecím očkem, zdroj: vlastní



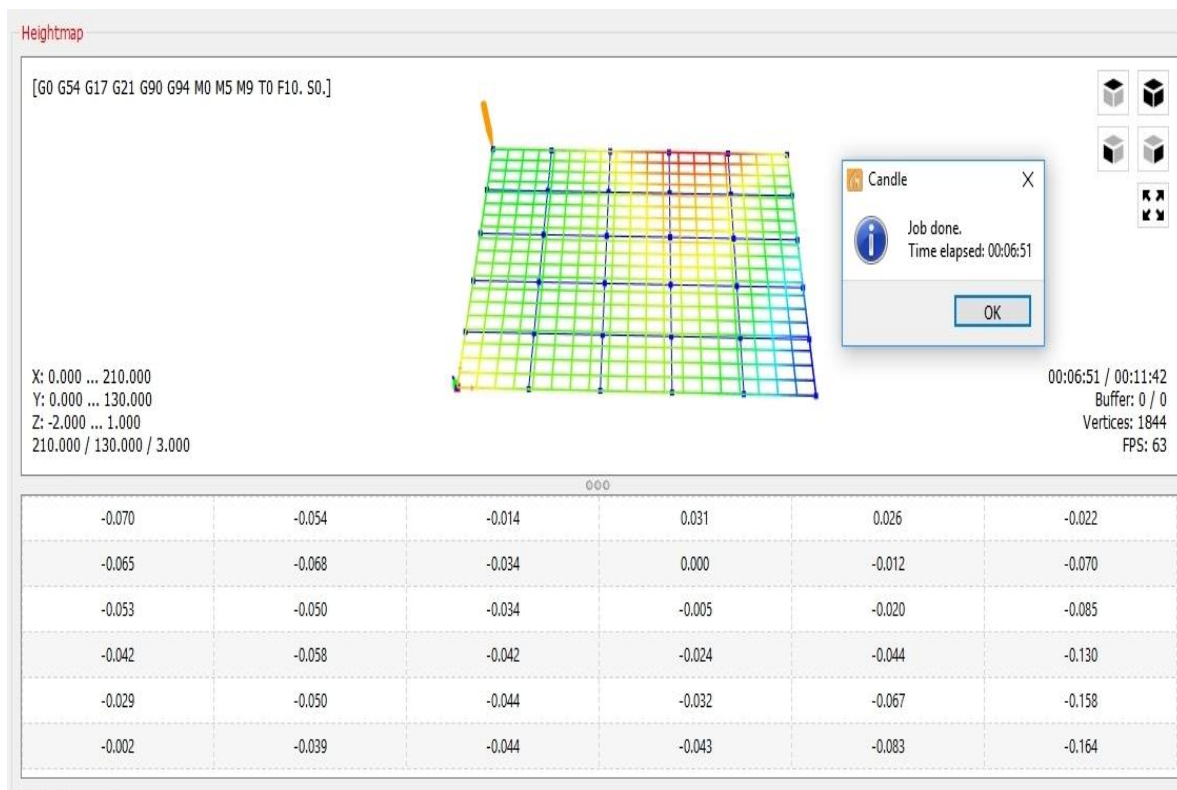
Obrázek 21 Hotový držák sondy před montáží, zdroj: vlastní



Obrázek 22 Přilepený a propojený držák sondy  
Zdroj: vlastní

– zemníci – přivádím ke stolu volně vedeným kabelem.

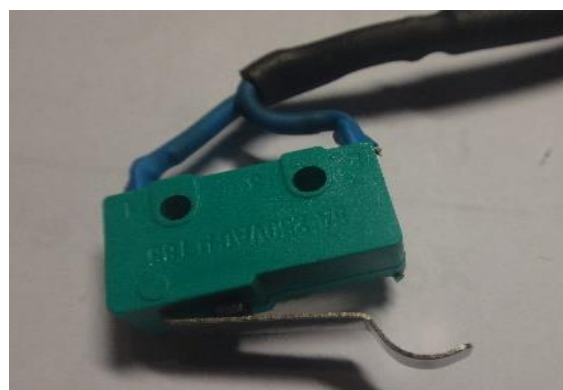
Sondu jsem otestoval vytvořením výškové mapy pracovního stolu frézky, viz následující obrázek. Úprava dílů na stejnou výšku a usazení osy X dle základních měrek se dle dosažených výsledků vyplatilo, viz tabulka.



Obrázek 23 Výsledek měření rovinnosti pracovního stolu frézky  
Zdroj: vlastní

### 6.3.2 Koncové spínače

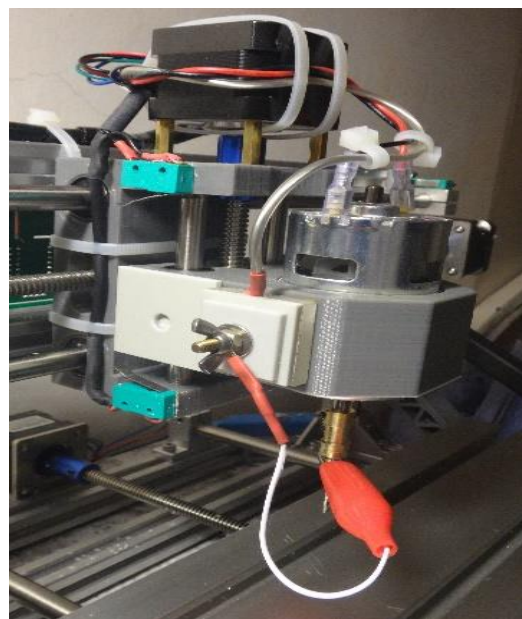
Přesto, že řídicí elektronika frézky umožňuje připojení koncových spínačů, stavebnice je neobsahuje a není na ně ani mechanicky připravená – nepočítá s nimi. Koncové spínače v projektu GRBL plní 2 funkce: ochranu stroje, hlavně motorů a také možnost najetí do tzv. *Home* polohy [19], což je jakási krajní poloha všech tří os současně.



Obrázek 24 Koncový spínač před montáží  
Zdroj: vlastní

Na internetových stránkách GRBL projektu [18] jsem našel informace o tom, jak koncové spínače zapojit. Zvolil jsem řešení přímé konektivity bez optopřevodníků se sériovým zapojením koncových spínačů v režimu NC (normal closed). Protože krokové motory a přívody k nim přenášejí velmi intenzivní pulzní provoz a generují elektromagnetické rušení, kabeláž ke spínačům byla provedena silnějším, opleteným a fólií stíněným dvoužilovým audiokabelem. Zapojení bylo provedeno tak, aby nevznikaly zemní smyčky – stínění vedení ke spínačům pro každou osu bylo připojeno na zem (GND) pouze v jednom místě a co nejbližší řídicí jednotce.

Největší problém byl s mechanickým uchycením koncových spínačů. Z možných řešení uchycení byla nakonec vybrána metoda přilepení oboustrannou lepicí páskou. Protože jsem měl 2 druhy – 3M oboustrannou pásku na displeje, baterie nebo digitizery při opravách mobilních telefonů a standardní (no name) oboustrannou kobercovou pásku, provedl jsem otestování obou. Subjektivně jako lepší jsem vyhodnotil a následně na všechny koncové spínače použil pásku kobercovou. Viz na obrázku 25 ukázka nalepených koncových spínačů osy Z (zelená barva).



Obrázek 25 Koncové spínače osy Z  
Zdroj: vlastní

### 6.3.3 Tuhost zařízení 1

Po sestavení zaujme subtilnost zařízení a jeho nízká hmotnost. Důsledkem těchto skutečností je při provozu neklidný, chvějící se stroj. Proto jsem se rozhodl stroj usadit na nějakou hmotnější, rovnou, tepelně málo roztažnou podložku, která ale ještě umožní nekomplikovaný transport zařízení. Cenově nejvýhodněji vycházela betonová deska (50,-Kč), ale beton by se musel povrchově upravovat-natírat, protože se z něj neustále práší. I z tohoto důvodu byla nakonec jako nejvhodnější vybrána granitová deska o rozměrech 40x40x3cm (129,-Kč).

Upravil jsem 4 spojovací úhelníky ze stavebnice tak, aby jimi prošel šroub M6. Vytvořil jsem 4 železné úchyty z dutého profilu 10x15 mm (jekl) a vytvořil uprostřed otvor pro vratový šroub (čtyřhranný otvor). Abych nemusel úchyty natírat, zatavil jsem je do modré smršťovací





Obrázek 26 Příprava rámu frézky pro montáž a montáž na granitovou desku  
Zdroj: vlastní

fólie. Koupil jsem 4 velkoplošné podložky průměru 58/22 mm, výška 4 mm. Podložky jsem vybíral dle tloušťky, aby byly stejně vysoké (mikrometrem, naměřil jsem 3 různé tloušťky, které se lišily asi o 0,3 mm, každá „stejná“ tloušťka pak už byla v toleranci 0,01 mm). Frézku jsem usadil na kamennou granitovou desku tak, aby nepřesahovala žádnou svojí částí půdorys desky. Vyznačil jsem místa pro otvory a pomocí půjčeného vrtacího kladiva provrtal. Zadní části kamene, kde se při vrtání vyštípl kus materiálu, jsem vyspravil rychletuhnoucím cementem. Na spodní část jsem nalepil 3 gumové nohy. Frézku jsem přišrouboval ke kamenné podložce a opět pomocí základních měrek seřídil osu X. Viz obrázek 26 z montáže.

#### 6.3.4 Tuhost zařízení 2

Portál, na kterém se nachází osa X a na ní mechanismus osy Z byl vyztužen vzpěrou (přidaná vzpěra má černou barvu). Vzpěra je uchycena k základnímu rámu v místě s největší tuhostí, tam, kde je konstrukce přichycena ke kamenné podložce. Tím jsem vyztužil portál alespoň v předozadním směru.



Obrázek 27 Výztuha portálu  
Zdroj: vlastní



## 6.4 Úprava konfigurace GRBL – firmware

Projekt GRBL je obecně využívaný Open source software pro řízení krokových motorů CNC zařízení G-kódem. Ne každé zařízení, které tento software využívá, má stejný hardware – lišit se mohou motory, pohybové šrouby, délky posuvů (=>SW limit), umístění motorů posuvů vlevo nebo vpravo, dynamické parametry jednotlivých os, maximální rychlosti jednotlivých os, minimální a maximální otáčky vřetene a podobně. Proto existuje způsob, jak lze tyto údaje pro konkrétní zařízení uložit a některé v případě potřeby modifikovat.

V našem konkrétním případě frézky se prodejce postaral o to, aby byly do paměti procesoru, spolu s řídicím programem, zapsány správné hardwarové konfigurační informace o frézce, viz tabulka parametrů firmware GRBL verze 0,9 na obrázku 28.

<b>GRBL v. 0,9 - parametry firmware</b>			
<b>\$\$</b>	<b>příkaz pro výpis těchto parametrů</b>	\$24=25.0	homing feed, mm/min
\$0=10	step pulse, msec	\$25=500.0	homing seek, mm/min
\$1=25	step idle delay, msec	\$26=250	homing debounce, msec
\$2=0	step port invert mask:00000000	<b>\$27=1.0</b>	<b>homing pull-off, mm</b>
\$3=5	dir port invert mask:00000101	\$100=800.0	x, step/mm
\$4=0	step enable invert, bool	\$101=800.0	y, step/mm
<b>\$5=1</b>	<b>limit pins invert, bool</b>	\$102=800.0	z, step/mm
\$6=0	probe pin invert, bool	\$110=800.0	x max rate, mm/min
\$10=3	status report mask:00000011	\$111=800.0	y max rate, mm/min
\$11=0.010	junction deviation, mm	\$112=500.0	z max rate, mm/min
\$12=0.002	arc tolerance, mm	\$120=10.0	x accel, mm/sec <sup>2</sup>
\$13=0	report inches, bool	\$121=10.0	y accel, mm/sec <sup>2</sup>
\$20=0	soft limits, bool	\$122=10.0	z accel, mm/sec <sup>2</sup>
<b>\$21=1</b>	<b>hard limits, bool</b>	\$130=200.0	x max travel, mm
\$22=1	homing cycle, bool	\$131=200.0	y max travel, mm
\$23=1	homing dir invert mask:00000001	\$132=200.0	z max travel, mm

Obrázek 28 GRBL firmware  
Zdroj: vlastní

Jednotlivá nastavení lze v případě potřeby změnit. Tuto možnost zmiňují hlavně proto, že po doplnění měřicí sondy a koncových spínačů je třeba tuto konfiguraci přes konzoli ovládacího programu upravit.

### **Provedl jsem tři úpravy výchozí konfigurace:**

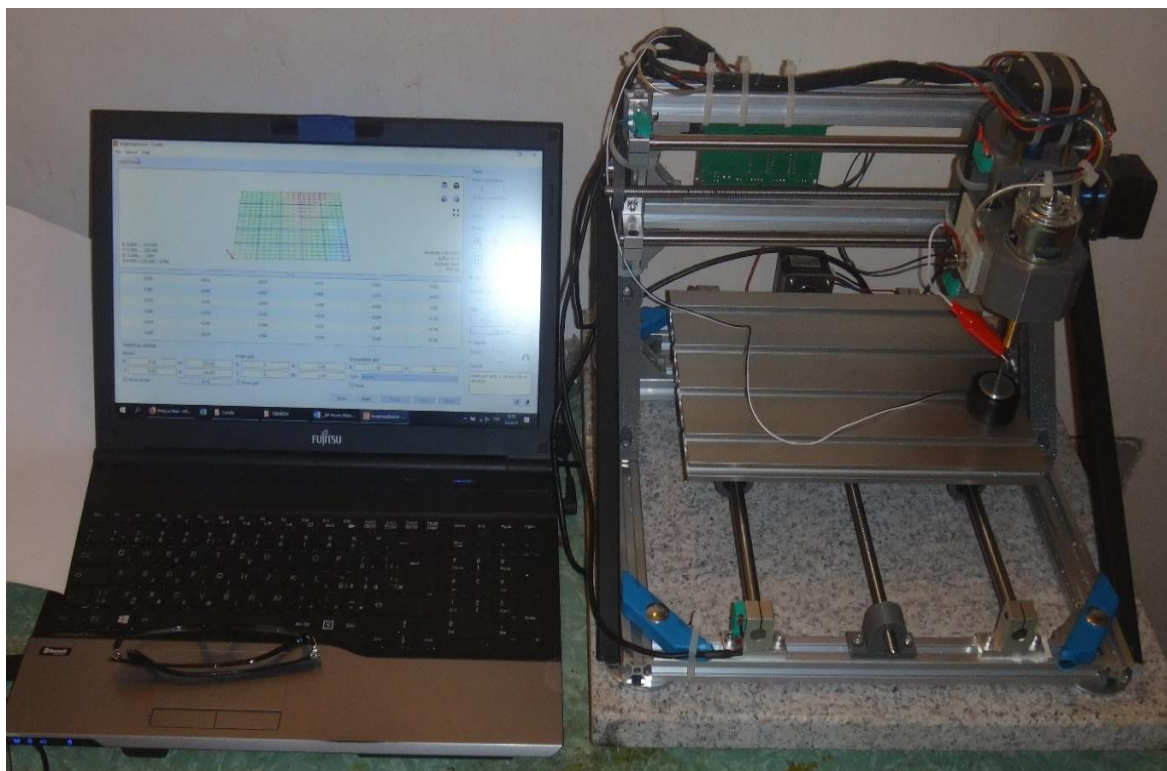
- změnu hodnoty parametru \$5 na 1 – u koncových spínačů používáme default hodnotu *low*, obvod je sériovým zapojením koncových spínačů vždy defaultně uzavřen (výhoda tohoto zapojení spínačů /NC-normal closed/, které téměř výhradně používají profesionální konstruktéři CNC strojů, spočívá v tom, že lze snadno zjistit přerušeni kabeláže koncových spínačů),
- změnu hodnoty parametru \$21 na 1 – lze použít měřicí sondu, *hard limits enable*, bez této změny nastavení nelze používat detekci nuly v ose Z a generovat výškovou mapu,
- změnu hodnoty parametru \$23 na 1 – tato úprava není potřebná, osobně preferuji jako *Home* polohu u osy X levou stranu (default je pravá). Po zadání příkazu \$H stůl přijede dopředu až na koncový spínač, osa X je vlevo na koncovém spínači a vřetenem na ose Z je v horní poloze na koncovém spínači.

### **Činnost koncových spínačů ve spojení s firmwarem GRBL - pravidla:**

- po sepnutí (sepnutí ve smyslu aktivace, v našem případě se koncové spínače při použití fyzicky rozepnají) kteréhokoliv koncového spínače se přeruší všechny posuvy a stroj se zastaví. Při strojním vyjíždění z krajní pozice musíme dávat pozor, kterým směrem se posouváme, spínač je již aktivován-rozpojen a jestli zvolíme špatný směr posuvu, žádná ochrana už není. Toto řešení – tzn. umožnění posuvu i ve stavu sepnutého koncového spínače po přerušeni předchozí činnosti – dává smysl, jinak by nebylo možné z této krajní polohy vyjet strojním posuvem, ale pouze ručním otáčením pohybového šroubu (Pozn. Některé prodávané frézky mají na konci pohybových šroubů držáky k ručnímu posuvu. U osy Z, kde toto řešení není možné z prostorových důvodů, je pak použit motor s hřídelí prodlouženou na obě strany motoru – spodní strana hřídele motoru je připojena na pohybový šroub, k horní straně je připevněn držák k ručnímu posuvu).
- spínače mají tu vlastnost, že po sepnutí, abychom dosáhli rozepnutí, musíme ovládací páku spínače uvolnit. K rozepnutí nedojde ihned, ale až po posunutí o několik milimetrů. To znamená, že při najetí do krajní polohy se stroj zastaví, my provedeme reset chybového stavu a odemknutí stroje a při vyjíždění z krajní pozice po posuvu o několik výše zmíněných milimetrů se stroj zastaví ještě jednou – při rozepnutí! Opět je třeba resetovat chybový stav a odemknout stroj a pak lze pokračovat v používání. Toto chování spínačů je ošetřeno při provádění najetí do *Home* polohy stroje, viz kapitulu 6.3.2 – *Koncové spínače*, kdy procedura po najetí do krajní polohy a sepnutí koncového spínače v každé ose provede

vyjetí z této polohy o zadaný počet milimetrů, viz parametr GRBL firmware \$27 - Homing pull-off, a tím zabrání přerušení činnosti frézky při následném použití [19].

## 6.5 Výsledná sestava frézky a řídicího počítače



Obrázek 29 Sestava frézky s řídicím počítačem  
Zdroj: vlastní

## 7 Řízení CNC obráběcích strojů

CNC (computer numerical controlled) obráběcí stroje jsou zařízení, která dokáží přijmout, vyhodnotit a provést počítačem zasílané instrukce číslicového řízení.

### 7.1 Popis řízení NC stroje

Numerické řízení (NC) stroje znamená, že existuje seznam příkazů, které řídicí jednotka stroje dokáže interpretovat – pohybovat nástrojem, ovládat pohyby částí stroje, spouštět, zastavovat a jinak ovládat jednotlivé subsystémy strojů (chlazení, výměna nástrojů apod.). V 50. a 60. letech minulého století se začala realizovat myšlenka provoz stroje automatizovat i jinak, než tzv. tvrdou regulací pomocí zářezek, dorazů a šablon. Nejvíce brzdila vývoj této technologie hlavně skutečnost, že neexistoval pro obrábění výkonný, elektricky ovladatelný a zároveň velmi přesný způsob, jak polohovat části stroje při obrábění. (Tento problém je v současnosti vyřešen například servopohony a krokovými motory. Aktuální pozice polohované části se může buď přímo snímat na dané ose anebo počítat z počtu provedených kroků motoru. Více informací [16].)

Řídicí jednotky těchto strojů načítaly děrné pásky s programy pro požadované operace, které následně prováděly.

### 7.2 Popis řízení CNC strojů

Se zvyšující se přesností obráběcích strojů se zvyšují i požadavky na přesnost výrobků (tj. menší výrobní odchylky od požadovaného, teoreticky vypočítaného tvaru). Vznikají nové typy strojů a zařízení, které se navíc neustále vylepšují a jsou schopny provádět větší počet různých obráběcích, manipulačních a kontrolních operací, a to třeba i při pohybu ve všech osách. Rapidně vzrůstá objem oboustranně přenášených dat – řídicích NC dat a také zpětnovazebních kontrolních dat (sepnutí koncových snímačů, aktuální pozice na osách, aktuální otáčky vřetena, výstupy měřících a polohových sond, informace o teplotě jednotlivých systémů stroje apod.). Proto byly řídicí jednotky obráběcích strojů vybaveny počítači, které řídí chod stroje zasíláním NC dat a pomocí zpětné vazby reagují na aktuální události a stavy. CNC stroje se staly standardem kvalitní hromadné výroby všude tam, kde nelze použít rychlejší a levnější metody přesné výroby.

### 7.3 Data pro řízení CNC strojů

Vytvořený, vyzkoušený a optimalizovaný soubor NC dat pro výrobu konkrétního dílu na konkrétním stroji byl dříve, kdy se nepoužívaly strojní CAD/CAM softwarové systémy, nákladnou záležitostí. Při následné změně výrobního zařízení bylo třeba tento NC soubor upravit tak, aby řídicí jednotka nového stroje interpretovala data způsobem, který povede k provádění stejných výrobních a obslužných úkonů.

Z tohoto důvodu koncem 60. let firma EIA vytvořila jakýsi univerzální řídicí jazyk pro ovládání NC a CNC strojů, který by neměl být hardwarově závislý. Tento jazyk byl uznán v roce 1980 jako standard *RS274*, častěji nazývaný G-kód (ISO-kód). Je to nejrozšířenější jazyk pro ovládání CNC a NC strojů, má ale spoustu variant.

### 7.4 G-kód – stručný popis [20]

Řídicí jednotka každého obráběcího stroje akceptuje jistou podmnožinu instrukcí G-kódu. S novými stroji a řídicími jednotkami výrobci modifikují a rozšiřují používané kódy řízení. Proto nelze – i přes existenci standardu – ve většině případů NC soubor z jednoho stroje přenášet na jiný – vždy je třeba nejdříve ověřit kompatibilitu řídicích jednotek a podporovanou množinu G-kódů.

V této práci bude použit k otestování navrženého postupu Open source projekt GRBL, proto si zde vypíšeme pouze podmnožinu příkazů jazyka G-kódu, který je schopen tento software interpretovat. Přehledy na obrázcích 30 a 31 nejsou manuálem programátora G-kódu.

GRBL v. 0,9 G-kódy	
Nemodální - provedou se nebo ukončí a systém s nimi dále nepracuje	
Kód	Popis
G4	Pozastaví provádění dalších příkazů na počet milisekund
G10L2	Tvorba virtuálního systému souřadnic
G10L20	Přiřadí aktuální pozici na ose libovolnou hodnotu
G28	Ruchlý přesun na domovské pozice všech a nebo jednotlivých os
G28.1	Ruší hodnotu G28
G30	Pozicování osy Z
G30.1	Ruší hodnotu G30
G53	Přesun na zadané absolutní hodnoty X,Y,Z
G92	Posuny os - offset
G92.1	Zrušení posunu os (G92)

Obrázek 30 G-kód - nemodální příkazy  
Zdroj: <https://github.com/gnea/grb>

<b>GRBL v. 0,9 G-kódy</b>	
<b>Modální příkazy - hodnoty parametrů si řídicí jednotka pamatuje až do doby, než jsou přepsány jinou hodnotou</b>	
<b>Kód</b>	<b>Popis</b>
<b>Pohybové kódy:</b>	
G00	Lineárně interpolovaný rychloposuv na zadané pozice
G01	Lineárně interpolovaný posuv na zadané pozice
G02	Posuv po kružnici ve směru hodinových ručiček
G03	Posuv po kružnici proti směru hodinových ručiček
G38.2	Sonda na vřetenu, zastav při kontaktu, jinak chyba
G38.3	Sonda na vřetenu, zastav při kontaktu
G38.4	Sonda na vřetenu, zastav při ztrátě kontaktu, jinak chyba
G38.5	Sonda na vřetenu, zastav při ztrátě kontaktu
<b>Feed Rate Modes:</b>	
G93	Rychlost posuvu definovaná dobou trvání pohybu k cíli (F3 = 1/3min.)
G94	Rychlost posuvu v jednotkách (G20, G21) za minutu (F40 = 40mm/min.)
<b>Měrové jednotky:</b>	
G20	Délková jednotka jeden palec
G21	Délková jednotka jeden milimetr
<b>Systém rozměrů:</b>	
G90	Absolutní - hodnoty X, Y a Z představují vzdálenost od počátku
G91	Relativní - hodnoty X, Y a Z představují přírůstek stávající hodnoty X, Y a Z
<b>Mód kružnice I,J,K:</b>	
G91.1	Relativní výpočet parametrů kružnice I, J a K ( G02, G03)
<b>Pracovní mód stroje:</b>	
G17	Pracovní stůl na osách X-Y, vřeteno na ose Z
G18	Pracovní stůl na osách X-Z, vřeteno na ose Y
G19	Pracovní stůl na osách Y-Z, vřeteno na ose X
<b>Korekce délky nástroje:</b>	
G43.1	Mění pohyby osy změnou jejího offsetu o rozdíl délky nástroje
G49	Ruší hodnotu G43.1
<b>Korekce rozměru řezného nástroje:</b>	
G40	Zrušení rozměrové kompenzace nástroje
<b>Ovládací mód:</b>	
G61	Přesné dojetí, pohyb není tak plynulý a navazující
<b>Provádění programu:</b>	
M00	Programový stop
M01	Programový stop
M02	Konec hlavního programu
M30	Konec hlavního programu
<b>Ovládání chlazení:</b>	
M07	Zapnutí chlazení
M08	Zapnutí chlazení
M09	Vypnutí chlazení
<b>Ovládání vřetena:</b>	
M03	Roztočení vřetene vpravo
M04	Roztočení vřetene vlevo
M05	Zastavení vřetene
<b>Přípustné znaky pro označení parametrů:</b>	
F, I, J, K, L, N, P, R, S, T, X, Y, Z	

Obrázek 31 G-kód - modální příkazy  
Zdroj <https://github.com/gnea/grb>

## 8 Konverzní nástroje CAD-to-CAM => G-Kód

Standardní výměnný formát Gerber pro výrobu DPS obsahuje popis toho, kudy vedou spojovací cesty – kde má zůstat měděná vrstva. To znamená, že obsahují popis tras a geometrické vlastnosti kreslicích objektů – clonek (čtverce, kruhy, trojúhelníky a pod.). Clonky svým pohybem po trase (draw) anebo zábleskem (flash) kreslí výsledný tvar spojovacích cest, ev. měděných ploch.

V případě tvorby DPS frézováním potřebujeme získat z dat výše uvedeného formátu Gerber informace o tom, jak každou takovou trasu oddělit (elektricky izolovat) od ostatních. K tomuto účelu použijeme programy, které si zdrojová data nejdříve vykreslí a výsledný tvar exaktně popíší – vzniknou geometrické útvary všech spojů, a i nepoužitých oblastí. Následně dle zadaných parametrů obrábění – průměr nástroje, ev. šířka řezu nástroje u neválcových nástrojů, hloubka frézování, šířka izolační oblasti, rychlost posuvu, otáčky vřetene a výška osy Z pro bezpečný přesun na jiné místo DPS – vygenerují dělicí trasy kolem každého geometrického útvaru. Následným exportem G-kódu získáme řídicí data pro CNC obráběcí stroj.

Vzhledem k tomu, že od sebe izolujeme jednotlivé vodivé plochy, této metodě tvorby DPS se říká metoda dělicích čar.

K provedení tohoto kroku použijeme Open source software FlatCAM. Dalšími možnými variantami Open source nástrojů je na DPS specializovaný software PCB2CAM a třeba i univerzální kreslicí program Inkscape, který je schopen načítat grafická data (obrázek DPS), nalézt okraje, tím zjistit a následně definovat geometrické tvary a vygenerovat trajektorii dělicích čar. Následně lze data vyexportovat ve formátu G-Kódu.

### 8.1 FlatCAM

© Copyright 2014-2015, Juan Pablo Caram.

Velmi užitečný manuál včetně příkladů a obrázků lze stáhnout ze stránek autora projektu [21]. V aplikační části (kapitola 9.7) je ukázáno použití tohoto programu s vysvětlením klíčových parametrů a vlastností.

## 9 Aplikační část

Výstupem této části práce je mnou zhotovený plošný spoj z výrobních CAD-to-CAM dat, který jsem vyrobil s využitím informací v teoretické části práce.

### 9.1 Použitý hardware

K frézování DPS jsem použil frézku CNC2418, upravenou dle kapitoly 6. Napájení jsem zajistil z laboratorního zdroje domácí výroby 42 V/2 A s nadproudovou pojistkou. Napájecí napětí jsem nastavil na 34 V, proudový rozsah jsem neomezoval. Tento způsob napájení jsem zvolil proto, že původní nový napájecí zdroj nevydržel už první zapojení vřetena frézky. Vzhledem k dlouhodobému používání laboratorního zdroje jsem jej dovybavil náporovým vzduchovým chlazením ventilátorem.

Řídícím počítačem byl notebook Fujitsu Lifebook A532 s procesorem Intel i5-3210M, 2,5GHz, s operační pamětí 8 GB RAM a s operačním systémem Windows 10 Pro, 64 bit, volné místo na HDD cca 300GB. Tato konfigurace počítače byla dostatečně výkonná a použité programové prostředky, včetně software na řízení CNC stroje, nezpůsobily za několik měsíců používání žádný pád operačního systému.

### 9.2 Použitý software

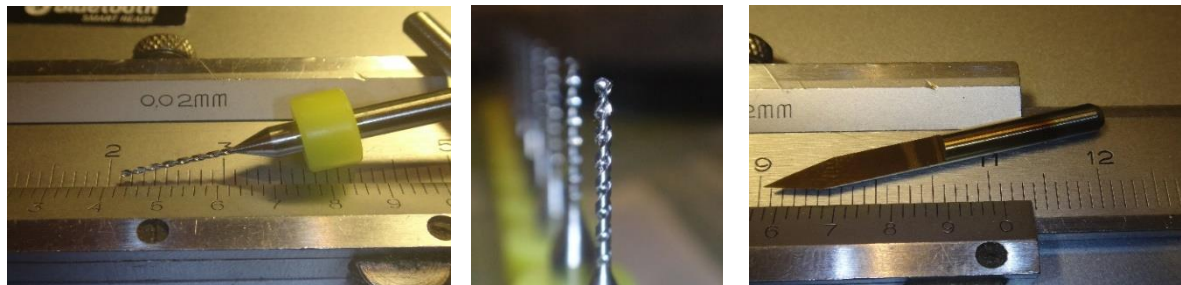
Ke konverzi výrobních dat formátu Gerber do formátu G-kód jsem používal Open source software FlatCAM, verze 8.5. Tento software ke své činnosti potřebuje následující dílčí programy - Python 2.7 32-bit, PyQt 4, Matplotlib 1.3.1, Numpy 1.8, Shapely 1.3, GEOS (Binary package required by Shapely), RTree, SpatialIndex (Binary package required by RTree). Ze stránek projektu <http://flatcam.org> jsem stáhnul distribuci Pythonu, která obsahuje všechny potřebné dílčí programy. Po nainstalování jsem stáhnul a z příkazového řádku nainstaloval vlastní aplikaci FlatCAM.

K ovládání CNC zařízení jsem použil program Candle, verze 1.0.11. Je to nejaktuálnější verze tohoto programu pro projekt GRBL verze 0.9.



### 9.3 Použité nástroje

K frézování dělicích čar jsem výlučně používal frézovací bit 30°; R0,2 mm; 3,175 mm. K vrtání jsem použil vrtáky různých průměrů s upínací stopkou 3,175 mm (1/8"), viz obrázek 32.



Obrázek 32 Vrták 0,7 mm a frézovací bit 30°  
Zdroj: vlastní

Formátování desky jsem provedl frézou průměru 2 mm s vrstvou nitridu titanu, viz obrázek 33.



Obrázek 33 Formátovací frézy  
Zdroj: vlastní

### 9.4 Použité nářadí

Při frézování a pomocných úkonech jsem používal standardní nářadí. Jedinými speciálnějšími potřebami byl smirkový papír zrnitosti 1200 a zlatnický kartáč na čištění vyfrézovaných DPS s „vlasem“ 0,08 mm.



Obrázek 34 Zlatnický kartáč mosazný  
Zdroj: vlastní

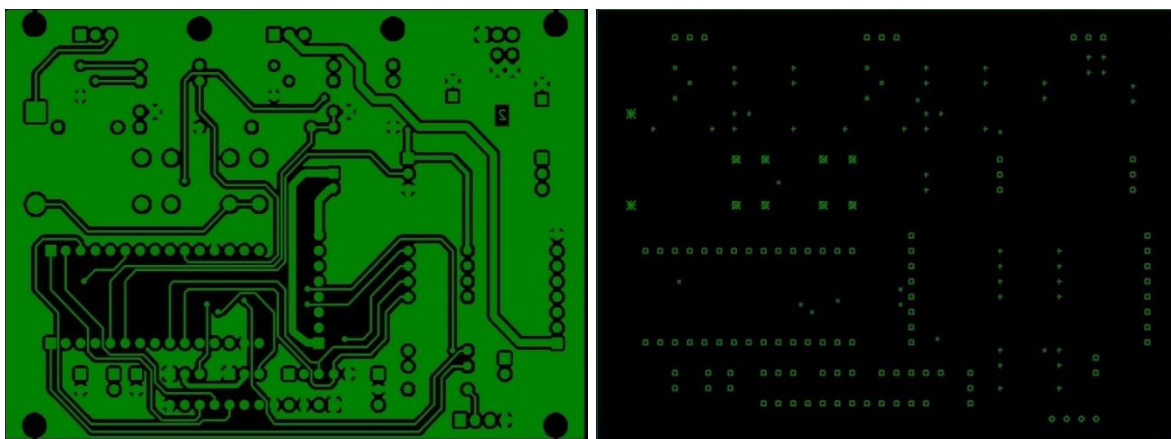
## 9.5 Použitá měřidla a fotoaparát

Při měření a přípravě obrábění jsem použil skládací metr, posuvné měřítko a mikrometr. Fotodokumentaci, včetně „lupou“ focených snímků, jsem průběžně prováděl voděodolným, tzn. i prachuvzdorným fotoaparátem Sony Cybershot DSC-TX30 s optikou Carl Zeiss.

## 9.6 Vstupní data

Jako motiv DPS jsem se svolením autora pana Tomáše Lišky použil náhodný plošný spoj třídy přesnosti 4, vytvořený v programu KiCad, viz obrázek 35. Tuto volbu jsem provedl se záměrem otestování postupu tvorby DPS, jejíž návrh **nebyl optimalizován** pro technologický způsob výroby frézování. Při návrhu DPS pro tuto konkrétní výrobní technologii lze provádět jisté optimalizace tvaru a šířky mezer, kdy jsou voleny mezery mezi jednotlivými spoji tak, aby kromě elektrických vlastností odpovídaly průměru řezných nástrojů (a násobkům snížených o překryv tras). Použitý návrh jsem neupravoval, použil jsem již vyexportovaná data, dle kterých komerční firma provedla pro autora návrhu zakázkovou výrobu DPS.

K otestování výroby DPS jsem použil 2 soubory dat – spodní vrstvu spojů Gerber a vrtací předpis, který obsahuje řádově 150 děr. Vrstvu ořezu si vygenerujeme programem FlatCAM.



Obrázek 35 Tvořený obrazec DPS a vrtací předpis  
Zdroj: Tomáš Liška

## 9.7 Konverze dat – FlatCAM – tvorba NC souborů

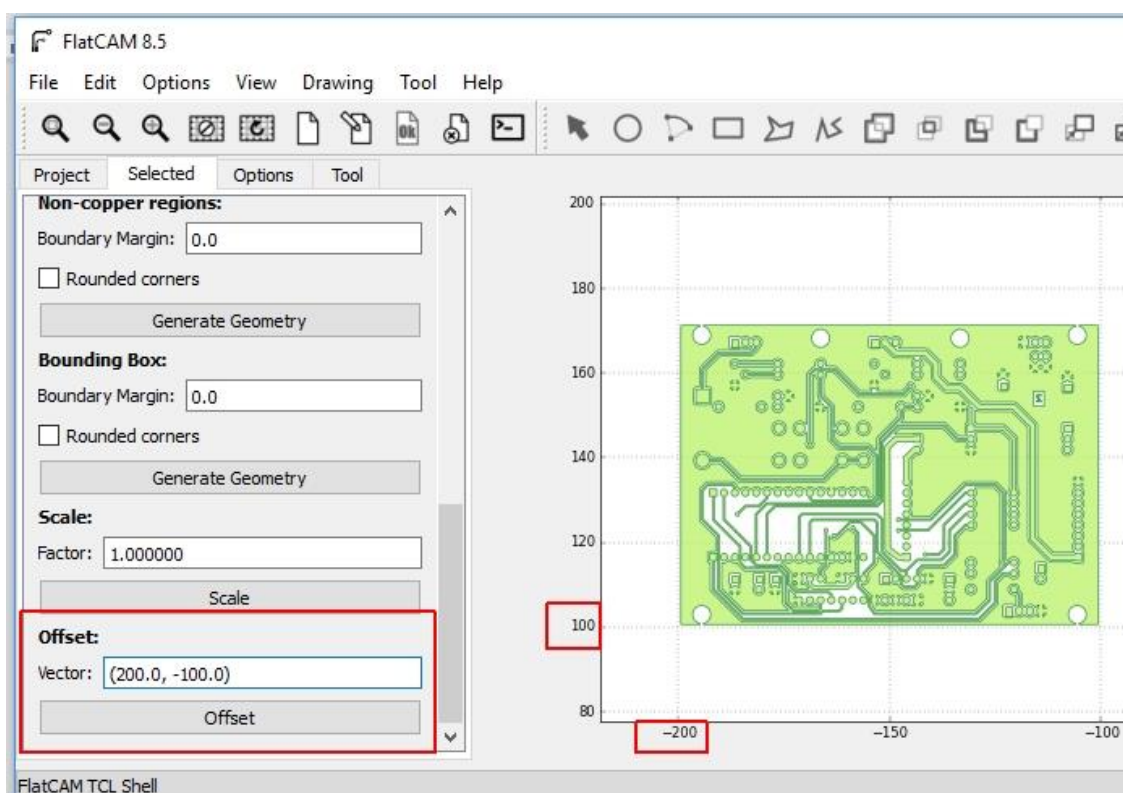
### 9.7.1 NC data pro frézování dělicích čar

#### 9.7.1.1 Tvorba projektu, import vstupních dat

Po spuštění programu FlatCAM [21], funkcí *File, Open Gerber...* nainportujeme postupně všechny vrstvy Gerber, ev. Excellon, které potřebujeme převést do G-kódu a projekt uložíme. (Pozn. Vrtací formát Excellon je již variantou G-kódu.)

#### 9.7.1.2 Nastavení nulového bodu – offset

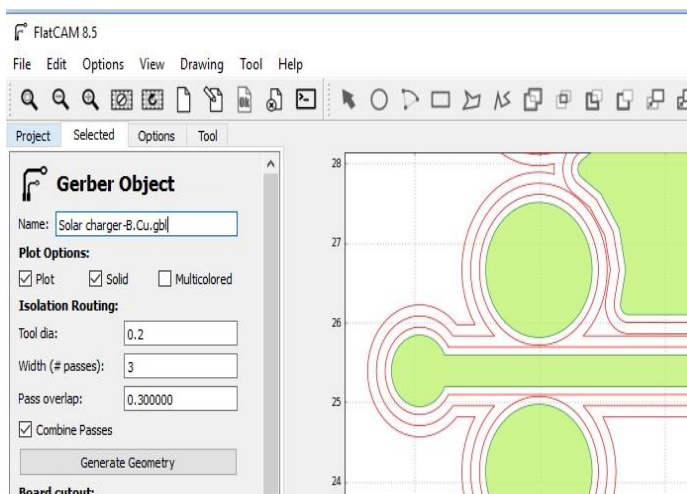
Počátek souřadnic výrobních dat převzatého projektu byl na jiném místě než v levém spodním rohu desky, který používám při práci s CNC zařízením. Tento problém jsem vyřešil použitím funkce *offset*, viz obrázek 36, která umístí nulový bod do požadovaného místa. Po stisku tlačítka *Offset* se výchozí nulový bod přesune z původního na nové požadované místo. O stejný ofset je třeba posunout všechny nainportované vrstvy projektu, jinak nebudou vrstvy DPS slícované.



Obrázek 36 FlatCAM – offset  
Zdroj: vlastní

### 9.7.1.3 Generování tras nástroje

V záložce *Project* jsem označil vrstvu, se kterou budu pracovat. Přesunul jsem se na záložku *Selected* a nastavil parametry pro generování tras nástroje v sekci *Isolation Routing*, viz obrázek 37. Konkrétní nastavení v následujícím případě znamená, že použiji frézování průměr nástroje 0,2 mm (*Tool Dia*), že izolační mezeru rozšířím třemi průchody – tam, kde to lze (*Width*), že druhý a třetí průchod frézou se bude překrývat o 30 % (*Pass overlap*). Použití *Combine passes* znamená, že se pro všechny tři průchody vytvoří jeden soubor tras a následně i jeden soubor NC dat. Na obrázku jsou trasy nástroje červené čáry kolem zelených oblastí. Ty se vytvořily po stisku tl. *Generate Geometry*.



Obrázek 37 FlatCAM – tvorba s zobrazení tras nástroje  
Zdroj: vlastní

### 9.7.1.4 Generování CNC úlohy

Po vygenerování tras v předchozím kroku vznikne v záložce *Project* nový soubor s příponou ISO. Vybral jsem tento nový soubor tras kliknutím myši a přesunul jsem se opět na záložku *Selected*, viz obrázek 38.

Vyplnil jsem parametry v sekci *Create CNC Job*:

*Cut Z*: hloubka řezu nástroje

*Travel Z*: výška pohybu nástroje nad deskou

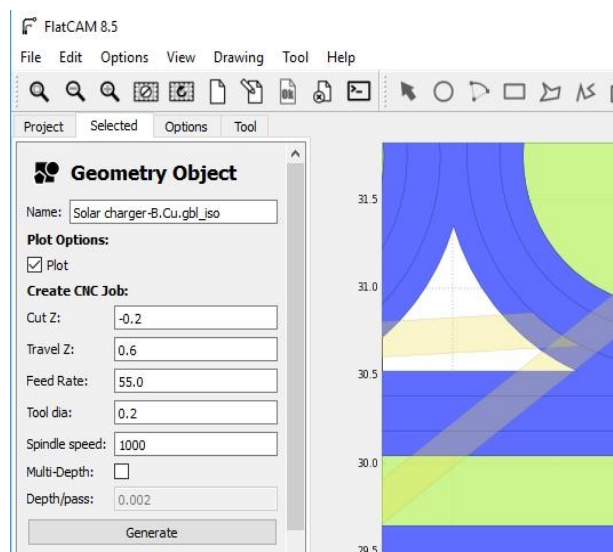
*Feed Rate*: rychlost pohybu při frézování

*Tool Dia*: průměr nástroje

*Spindle speed*: otáčky vřetene (1000 = max)

*Multi Depth*: je-li hloubka frézování velká, lze provést po vrstvách (*Depth/Pass*)

Po stisku tlačítka *Generate* se asi za 20s vygeneroval další soubor, tentokrát s příponou CNC. Odfrézované části jsou modré plochy.

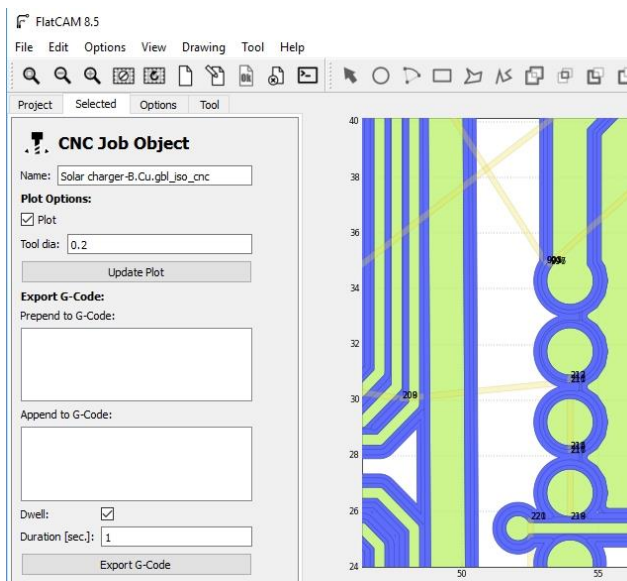


Obrázek 38 FlatCAM – CNC dráha nástroje s odebranými daty  
Zdroj: vlastní



### 9.7.1.5 Vytvoření G-kódu

Ze souborů v záložce *Project* jsem vybral ten s příponou *CNC*. V záložce *Selected* jsem stiskem tlačítka *Export G-Code* provedl vyexportování NC souboru, viz obrázek 39. Velikost souboru je cca 1MB, jeho provádění bude trvat při zvolené rychlosti posuvu a počtu průchodů řádově 3h.



Obrázek 39 FlatCAM – export G-kódu  
Zdroj: vlastní

### 9.7.2 NC data pro vrtání

Postup u vrtání je podstatně jednodušší. Není třeba generovat trasy nástrojů. Vše je dané průměrem vrtáku a souřadnicemi, na kterých se bude vrtat. Můžeme vytvořit dílčí soubory G-kódu pro každý průměr vrtáku zvlášť anebo vybrat několik průměrů anebo vybrat všechny průměry. Tuto možnost – až na nejmenší prokovovací otvory – jsem zvolil i já, viz obrázek 40.

Nastavil jsem parametry vrtání:

Cut Z: hloubka vrtání

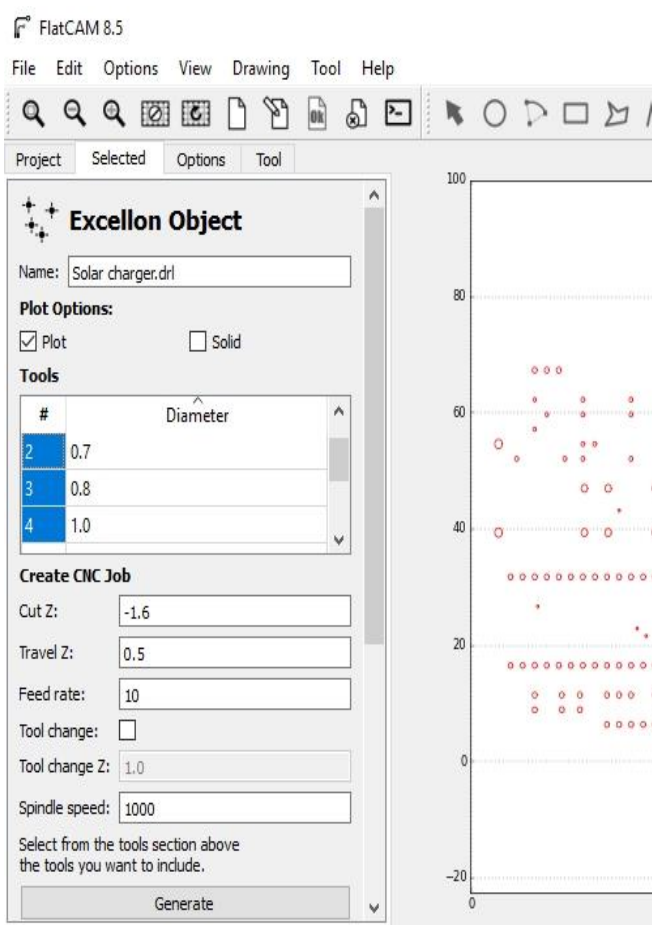
Travel Z: pohyb vrtáku nad deskou

Feed Rate: rychlost vrtání

Tool Chance: výměna nástrojů (NE)

Spindle speed: počet otáček

(1000=max)



Obrázek 40 FlatCAM – generování vrtacích CNC dat  
Zdroj: vlastní

Tlačítkem *Generate* jsem vytvořil CNC soubor, který vyexportuji stejným způsobem, jako v kapitole 9.7.2.

### 9.7.3 NC data pro formátování desky

Formátování je proces, který desce zajistí konečný tvar vyříznutím z polotovaru.

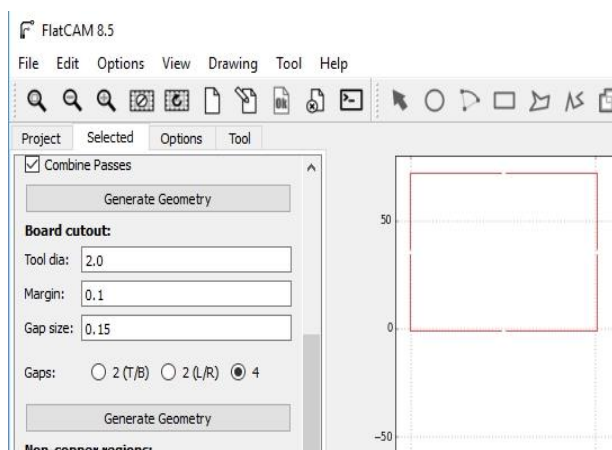
#### 9.7.3.1 Generování tras nástroje

V záložce *Project* jsem vybral opět vrstvu dat Gerber – spodní vrstvu PCB. V záložce *Selected* v sekci *Board Cutout*, viz. obrázek 41.

Nastavíme parametry formátování desky:

- průměr frézy,
- okraj a šířku spojovacích můstků (*Gaps*),
- počet a umístění můstků.

Trasu vygenerujeme stiskem tlačítka *Generate Geometry*.



Obrázek 41 FlatCAM – generování tras formátování DPS  
Zdroj: vlastní

#### 9.7.3.2 Generování CNC úlohy

Po vygenerování tras v předchozím kroku vznikne v záložce *Project* nový soubor, ale bezpřípony ISO. Vybral jsem tento nový soubor tras kliknutím myši a přesunul jsem se opět na záložku *Selected*, viz obrázek 42.

Vyplnil jsem parametry v sekci *Create CNC Job*:

*Cut Z*: hloubka řezu

*Travel Z*: výška pohybu nástroje nad deskou

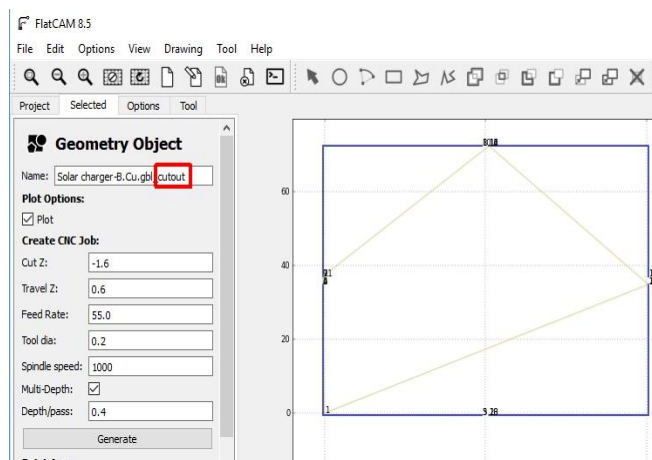
*Feed Rate*: rychlost pohybu při frézování

*Tool Dia*: průměr nástroje

*Spindle speed*: otáčky vřetene (1000 = max)

*Multi Depth*: provedl jsem po vrstvách, odfrézovávám celou 1,5 mm vrstvu materiálu, provedl jsem 4 průchody po 0,4 mm (*Depth/Pass*)

Po stisku tlačítka *Generate* se vygeneroval soubor s příponou CNC. Trasy nástroje jsou modré, jsou naznačeny i přesuny nástroje.



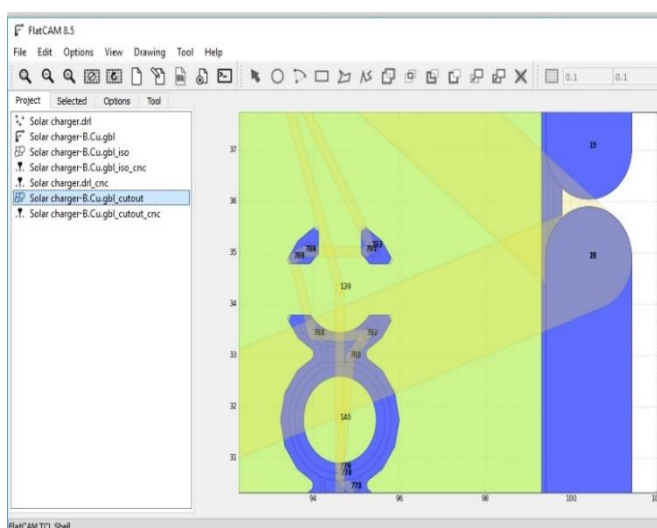
Obrázek 42 FlatCAM - generování dat CNC  
Zdroj: vlastní

### 9.7.3.3 Vytvoření G-kódu

Ze souborů v záložce *Project* jsem vybral soubor \*cutout s příponou CNC. V záložce *Selected* jsem stiskem tlačítka *Export G-Code* provedl vyexportování NC souboru. Velikost souboru je cca 2 kB, jeho provádění bude trvat při zvolené rychlosti posuvu řádově 20 minut.

### 9.7.4 Ověření konverze dat

Abych viděl pouze CNC trasy, u třech souborů s příponou CNC jsem ponechal volbu *Plot* – kreslení. U ostatních souborů jsem tuto volbu odznačil. V grafickém okně náhledů v pravé části programu jsou nyní vidět pouze trasy nástrojů při obrábění – frézování dělicích čar, vrtání a formátování tvaru desky včetně naznačených přesunů nástrojů nad deskou.



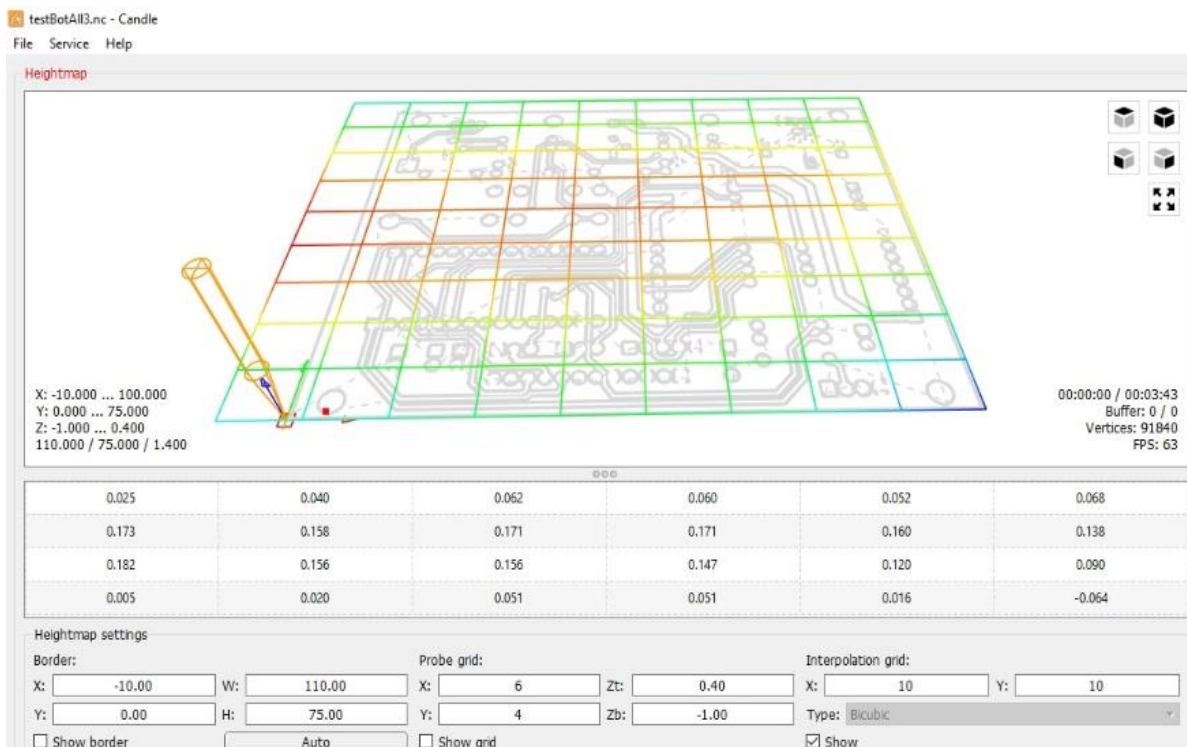
Obrázek 43 FlatCAM - kontrola dat  
Zdroj: vlastní

## 9.8 Tvorba desky plošného spoje

Poté, co jsem vytvořil všechna potřebná data pro řízení CNC frézky, přišrouboval jsem na dřevěnou podložku polotovary pro tvorbu DPS. Vzal jsem si vytištěnou předlohu motivu DPS v měřítku 1:1 a vyznačil jsem si nejlepší umístění na desce a tím stanovil přibližně výchozí bod X0 Y0.

Zapnul jsem napájení frézky, spustil jsem ovládací software frézky a najel jsem nástrojem na dříve označený výchozí bod X0Y0.

## 9.8.1 Výšková mapa



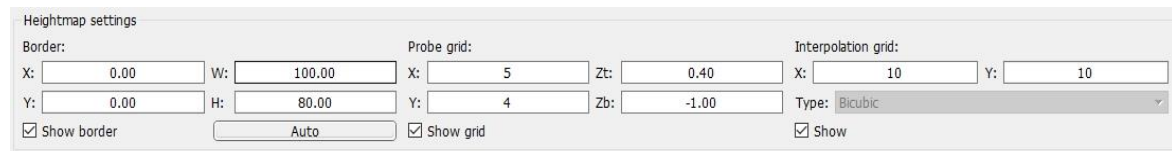
Obrázek 44 Candle – generování výškové mapy

Zdroj: vlastní

Šířka dělicích čar při frézování nástrojem, který není válcový, ale kuželový, je závislá na hloubce frézování. Proto jsem se snažil, pro dosažení stejné šířky drážky při obrábění, dosáhnout přesné rovinnosti upnutí polotovaru. Toho lze dosáhnout podkládáním upínací desky, která je uchycena na lože – pracovní stůl frézky. Bohužel tímto způsobem neeliminujeme různá prohnutí desky – většinou na středu. Řešení tohoto problému nabízí použití tzv. výškové mapy, která při obrábění zajistí dynamickou korekci hodnot osy Z dle aktuální pozice XY a podle hodnot v souboru výškové mapy.

Kroko svorku jsem upnul na nástroj a přiblížil jsem se výškově co nejvíce polotovaru DPS. Druhou část sondy jsem položil její vodivou částí na měděnou plochu polotovaru DPS, u které mapujeme zakřivení. Pomocí sondy jsem se dotkl materiálu a vynuloval jsem hodnoty všech tří os. Sondy ve vřetení jsem posunul o 0,4 mm nahoru. Načetl jsem NC soubor, který plánujeme frézovat a v menu *Heightmap*, výšková mapa, zvolíme *Create*. Bez otevření NC souboru je funkce vytvoření výškové mapy nepřístupná. Nastavíme parametry skenování povrchu: V sekci *Border* jsem nastavil vnější hranice oblasti pro tvorbu mapy. V sekci *Probe grid* jsem určil počet měřených bodů na každé ose, parametr *Zt* určuje výšku přejezdu





Obrázek 45 Candle - parametry výškové mapy  
Zdroj: vlastní

nad deskou k dalšímu bodu měření, parametr  $Zb$  určuje limitní hodnotu osy  $Z$ , do které se sonda pokouší o kontakt s deskou. Nedojde-li ke kontaktu do této hodnoty, procedura generování výškové mapy skončí chybou. Generování se spouští tlačítkem *Probe*. Výškovou mapu jsem uložil, budu ji používat u každé úlohy nad takto upnutou deskou (vrtání a formátování). V případě, že ještě před frézováním dojde k výraznějšímu posunu nulových souřadnic os  $X$  a  $Y$ , je vhodné výškovou mapu přegenerovat, aby každé poloze na souřadnicích  $X$  a  $Y$  odpovídala zjištěná výšková korekce.

### 9.8.2 CNC frézování DPS

Upnul jsem frézovací nástroj do vřetena, určil jeho výškovou nulovou polohu na ose  $Z$ . Otevřel jsem frézovací NC soubor, načtl výškovou mapu a spustil jsem program frézování DPS.



Obrázek 46 Frézování DPS  
Zdroj: vlastní

### 9.8.3 CNC vrtání DPS

Upnul jsem vrták do vřetena, určil jeho výškovou nulovou polohu na ose Z. Otevřel jsem vrtací NC soubor, načtl výškovou mapu. Zarazila mne délka trvání operce – 1h. Zjistil jsem, že po vyvrtání každého otvoru se vrták vrací řeznou rychlostí G01 do polohy Z0. Tato operace prodlužuje vrtání 150ti děr téměř dvojnásobně. Proto jsem v notepadu nahradil u všech výskytů příkaz G01 Z0 prázdným řetězcem

#### **Původní vrtací sekvence jedné díry:**

G00 Xxx.xxxxYyy.yyyy –najetí rychloposuvem na souřadnice otvoru

G01 Z-1.6000 – vrtání řeznou rychlostí do hloubky 1,6 mm

G01 Z0 – výjezd z vyvrtané díry řeznou rychlostí do polohy Z0

G00 Z0.6000 – výjezd rychloposuvem 0,6 mm nad desku

#### **Upravená vrtací sekvence jedné díry:**

G00 Xxx.xxxxYyy.yyyy –najetí rychloposuvem na souřadnice otvoru

G01 Z-1.6000 – vrtání řeznou rychlostí do hloubky 1,6 mm

G00 Z0.6000 – výjezd rychloposuvem 0,6 mm nad desku

Načtl jsem upravená NC data pro vrtání a předpokládaná délka vrtání se úpravou snížila na 36 minut. Načtl jsem výškovou mapu a spustil jsem program vrtání DPS



Obrázek 47 Vrtání DPS  
Zdroj: vlastní

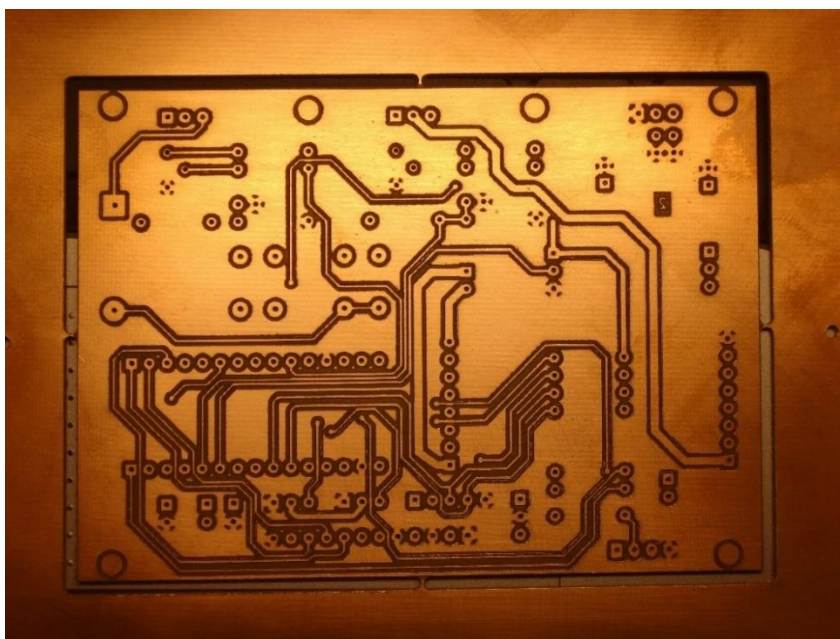
#### 9.8.4 CNC formátování DPS

Vyměnil jsem vrták za formátovací frézu, dotykem na desku jsem určil nulovou polohu osy Z. Otevřel jsem formátovací NC soubor, načtl jsem výškovou mapu a spustil jsem program formátování DPS.



Obrázek 48 Formátování DPS  
Zdroj: vlastní

#### 9.9 Ukázka vyrobené desky plošného spoje



Obrázek 49 Frézováním vyrobená DPS  
Zdroj: vlastní

## 10 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout postup výroby DPS pomocí CNC frézovacího zařízení CNC2418. Bylo využito výrobních výstupů softwarových nástrojů pro návrh DPS. Byl nalezen použitelný postup výroby, který vyžadoval řešení souvisejících dílčích problémů. Navržený postup je funkční. Tímto konkrétním typem zařízení je možné plošné spoje vyrobit.

Dílčím cílem práce byla konverze dat pro výrobu DPS formátu Gerber do formátu G-kód pro řízení CNC stroje. Problém nekompatibility výrobních dat byl vyřešen jejich konverzí zvoleným softwarem. Tento způsob konverze se ukázal zcela funkčním.

Druhým dílčím cílem bylo praktické ověření navrženého postupu výroby DPS. Byl vybrán náhodný, výrobně středně složitý design desky plošného spoje bez optimalizace pro výrobu frézováním. Aplikací navrženého postupu byl tento výrobek zhotoven.

Použití frézovacího zařízení, jehož obsluha vyžaduje jisté znalosti, zde není chápáno a představováno jako nejkvalitnější, nejlevnější a nejrychlejší metoda prototypové výroby desek s plošnými spoji, ale jako další možné využití univerzálního obráběcího zařízení – CNC frézky. Vyzkoušená, opakovatelná, přesností a kvalitou postačující možnost tvorby plošného spoje je zde chápána jako synergické rozšíření možností daného zařízení.

# 11 Seznam obrázků:

OBRÁZEK 1 LOGO OSI PŘEVZATO Z <a href="https://opensource.org/">HTTPS://OPENSOURCE.ORG/</a> .....	2
OBRÁZEK 2 TECHNOLOGIE VÝROBY THT&SMT NA JEDNÉ DESCE ZDROJ: VLASTNÍ .....	4
OBRÁZEK 3 KOVOVÝ PODKLAD DPS ZDROJ: VLASTNÍ .....	5
OBRÁZEK 4 VÝBRUS PRO KOVU VRSTEV DPS ZDROJ: <a href="http://www.printed.cz/fotogalerie-893">HTTP://WWW.PRINTED.CZ/FOTOGALERIE-893</a> .....	6
OBRÁZEK 5 FRÉZOVÁNÍ NEPÁJIVÉ MASKY ZDROJ: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=7ECTUSTL7-w">HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=7ECTUSTL7-w</a> .....	7
OBRÁZEK 6 RŮZNÉ TVARY DPS ZDROJ: VLASTNÍ .....	8
OBRÁZEK 7 3D PREVIEW OSAZENÉ DPS ZDROJ: VLASTNÍ .....	10
OBRÁZEK 8 FORMÁT GERBER - KRESLENÍ SVĚTLEM ZDROJ: 2X Z <a href="http://pcbdesign-now.blogspot.cz/">HTTP://PCBDESIGN-NOW.BLOGSPOT.CZ/</a> .....	12
OBRÁZEK 9 SKUTEČNÝ KARUSEL SE CLONKAMI ZDROJ: <a href="http://pcbdesign-now.blogspot.cz/">HTTP://PCBDESIGN-NOW.BLOGSPOT.CZ/</a> .....	13
OBRÁZEK 10 STAVEBNICE FRÉZKY <a href="https://www.aliexpress.com">HTTPS://WWW.ALIEXPRESS.COM</a> .....	15
OBRÁZEK 11 STAVEBNICE FRÉZKY PŘEVZATO Z <a href="https://www.aliexpress.com">HTTPS://WWW.ALIEXPRESS.COM</a> .....	15
OBRÁZEK 12 POUŽITÝ KROKOVÝ MOTOR ZDROJ: VLASTNÍ .....	16
OBRÁZEK 13 ELEKTRONIKA FRÉZKY ZDROJ: <a href="https://images-eu.ssl-images-amazon.com">HTTPS://IMAGES-EU.SSL-IMAGES-AMAZON.COM</a> .....	16
OBRÁZEK 14 ZAPOJENÍ POLOLU DRIVERU S A4988 ZDROJ: <a href="https://www.pololu.com/">HTTPS://WWW.POLOLU.COM/</a> .....	17
OBRÁZEK 15 PRUŽNÁ SPOJKA ZDROJ: VLASTNÍ .....	18
OBRÁZEK 16 MĚŘENÍ A MONTÁŽ VODICÍCH TYČÍ OSY Y ZDROJ: VLASTNÍ .....	18
OBRÁZEK 17 SEŘÍZOVÁNÍ OSY X ZDROJ: VLASTNÍ .....	19
OBRÁZEK 18 SPOJKY MOTOR X POHYBOVÝ ŠROUB ZDROJ: VLASTNÍ .....	20
OBRÁZEK 19 VYFRÉZOVANÁ ČÁST DRŽÁKU, ZDROJ: VLASTNÍ .....	22
OBRÁZEK 20 ŠROUB SONDY S PÁJECÍM OČKEM, ZDROJ: VLASTNÍ .....	22
OBRÁZEK 21 HOTOVÝ DRŽÁK SONDY PŘED MONTÁŽÍ, ZDROJ: VLASTNÍ .....	22
OBRÁZEK 22 PŘILEPENÝ A PROPOJENÝ DRŽÁK SONDY ZDROJ: VLASTNÍ .....	22
OBRÁZEK 23 VÝSLEDEK MĚŘENÍ ROVINNOSTI PRACOVNÍHO STOLU FRÉZKY ZDROJ: VLASTNÍ .....	23
OBRÁZEK 24 KONCOVÝ SPÍNAČ PŘED MONTÁŽÍ ZDROJ: VLASTNÍ .....	23
OBRÁZEK 25 KONCOVÉ SPÍNAČE OSY Z ZDROJ: VLASTNÍ .....	24
OBRÁZEK 26 PŘÍPRAVA RÁMU FRÉZKY PRO MONTÁŽ A MONTÁŽ NA GRANITOVOU DESKU ZDROJ: VLASTNÍ .....	25
OBRÁZEK 27 VÝZTUHA PORTÁLU ZDROJ: VLASTNÍ .....	25
OBRÁZEK 28 GRBL FIRMWARE ZDROJ: VLASTNÍ .....	26
OBRÁZEK 29 SESTAVA FRÉZKY S ŘÍDÍCÍM POČÍTAČEM ZDROJ: VLASTNÍ .....	28
OBRÁZEK 30 G-KÓD - NEMODÁLNÍ PŘÍKAZY ZDROJ: <a href="https://github.com/gnea/grb">HTTPS://GITHUB.COM/GNEA/GRB</a> .....	30
OBRÁZEK 31 G-KÓD - MODÁLNÍ PŘÍKAZY ZDROJ <a href="https://github.com/gnea/grb">HTTPS://GITHUB.COM/GNEA/GRB</a> .....	31
OBRÁZEK 32 VRTÁK 0,7 MM A FRÉZOVACÍ BIT 30° ZDROJ: VLASTNÍ .....	34
OBRÁZEK 33 FORMÁTOVACÍ FRÉZY ZDROJ: VLASTNÍ .....	34
OBRÁZEK 34 ZLATNICKÝ KARTÁŽ MOSAZNÝ ZDROJ: VLASTNÍ .....	34
OBRÁZEK 35 TVOŘENÝ OBRAZEC DPS A VRTACÍ PŘEDPIS ZDROJ: TOMÁŠ LIŠKA .....	35
OBRÁZEK 36 FLATCAM – OFFSET ZDROJ: VLASTNÍ .....	36
OBRÁZEK 37 FLATCAM – TVORBA S ZOBRAZENÍ TRAS NÁSTROJE ZDROJ: VLASTNÍ .....	37

OBRÁZEK 38 FLATCAM – CNC DRÁHA NÁSTROJE S ODEBRANÝMI DATY ZDROJ: VLASTNÍ.....	37
OBRÁZEK 39 FLATCAM – EXPORT G-KÓDU ZDROJ: VLASTNÍ.....	38
OBRÁZEK 40 FLATCAM – GENEROVÁNÍ VRTACÍCH CNC DAT ZDROJ: VLASTNÍ .....	38
OBRÁZEK 41 FLATCAM – GENEROVÁNÍ TRAS FORMÁTOVÁNÍ DPS ZDROJ: VLASTNÍ .....	39
OBRÁZEK 42 FLATCAM - GENEROVÁNÍ DAT CNC ZDROJ: VLASTNÍ.....	39
OBRÁZEK 43 FLATCAM - KONTROLA DAT ZDROJ: VLASTNÍ .....	40
OBRÁZEK 44 CANDLE – GENEROVÁNÍ VÝŠKOVÉ MAPY ZDROJ: VLASTNÍ.....	41
OBRÁZEK 45 CANDLE - PARAMETRY VÝŠKOVÉ MAPY ZDROJ: VLASTNÍ .....	42
OBRÁZEK 46 FRÉZOVÁNÍ DPS ZDROJ: VLASTNÍ.....	42
OBRÁZEK 47 VRTÁNÍ DPS ZDROJ: VLASTNÍ .....	43
OBRÁZEK 48 FORMÁTOVÁNÍ DPS ZDROJ: VLASTNÍ .....	44
OBRÁZEK 49 FRÉZOVÁNÍM VYROBENÁ DPS ZDROJ: VLASTNÍ.....	44

## 12 Reference

- [1] The Open Source Definition:. *OSI*. [Online]. Dostupný z <https://opensource.org/osd>
- [2] Popular Licenses:. *OSI*. [Online]. Dostupný z <https://opensource.org/licenses>
- [3] Printed circuit board:. [Online]. Dostupný z [https://en.wikipedia.org/wiki/Printed\\_circuit\\_board](https://en.wikipedia.org/wiki/Printed_circuit_board)
- [4] KOUDELA, Vladislav. *Plošné spoje*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. Populární radiotechnika, Sv. 11.
- [5] Základní materiál DPS – možnosti:. SQP International. [Online]. Dostupný z [http://www.plosnyspoj.cz/base\\_materials.php](http://www.plosnyspoj.cz/base_materials.php)
- [6] Desky s plošnými spoji a jejich výroba:. SEMACH. [Online]. Dostupný z [www.semach.cz/pdf/popis.pdf](http://www.semach.cz/pdf/popis.pdf)
- [7] Technologie:. Printed s.r.o. [Online]. Dostupný z <http://www.printed.cz/technologie-857>
- [8] Jaromír, Šimka. Celoplošné galvanické zlacení plošných spojů. DPS - elektronika od A do Z. [Online] Dostupný z <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:4701/celoplosne-galvanicke-zlacen-plosnych-spoju>.
- [9] Cínování PCB:. [Online]. Dostupný z <http://www.hobbyrobot.cz/tipy-triky/cinovani-pcb/>
- [10] KiCAD EDA – A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite [online]. Dostupný z <http://kicad-pcb.org/>
- [11] Comparison of EDA software:. Wikipedia. [Online]. Dostupný z [https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison\\_of\\_EDA\\_software](https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_EDA_software)
- [12] Gerber format:. Ucamco. [Online]. Dostupný z <https://www.ucamco.com/en/file-formats/gerber>
- [13] Gerber's new attributes set to transform CAD-to-CAM communication:. Ucamco. [Online]. Dostupný z <https://www.ucamco.com/en/news/gerbers-new-attributes-set-to-transform-cad-to-cam-communication>
- [14] A Short History of IPC-2581 Consortium:. IPC-2581. [Online]. Dostupný z <http://www.ipc2581.com/about-copy-2/>
- [15] Klauz, M., 2012. Nahradí standard IPC-2581 zavedené formáty Gerber a ODB++?. DPS - elektronika od A do Z: odborný časopis pro vývoj a výrobu v oboru elektroniky., Issue 1805-5044., p. 35.



- [16] MAREK, Jiří. Design of CNC machine tools. Přeložila Ivica KLEPŠOVÁ, přeložil Ivan ŠIMAN, přeložil Zuzana ŽIDLICKÁ. Prague: MM publishing, 2015, 727 s. MM special. ISBN 978-80-260-8637-6.
- [17] Version 1.0 release:. Github. [Online]. Dostupný z <https://github.com/Denvi/Candle/releases/tag/v1.0>
- [18] Wiring Limit Switches:. Patgadget. [Online]. Dostupný z <https://github.com/gnea/grbl/wiki/Wiring-Limit-Switches>
- [19] Set up the Homing Cycle:. Oavatoc. [Online]. Dostupný z <https://github.com/gnea/grbl/wiki/Set-up-the-Homing-Cycle>
- [20] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. 1. vyd. Praha: Grada, 2015, 240 s. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [21] Prototyping PCB:. FlatCAM. [Online]. Dostupný z <http://flatcam.org/>



## 13 Přílohy

### Soubory na CDROM:

- bakalářská práce ve formátu PDF

Složky:

**Input** – vstupní data formátu Gerber a Excellon

**Output** – výstupní NC data ve formátu G-kód

**Software** – program Candle k načtení NC souborů