

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Přírodovědecká fakulta

Bakalářská práce

**Modifikace 3D tiskárny Prusa i3
MK3 na uzavřený koncept s
dvojnásobnou tiskovou plochou**

Karel Beránek

školitel: Mgr. Jakub Geyer

České Budějovice 2019

Bibliografické údaje:

Beránek K, 2019: Modifikace 3D tiskárny Prusa i3 MK3 na uzavřený koncept s dvojnásobnou tiskovou plochou, Bakalářská práce. [Modify the 3D printer Prusa i3 MK3 to a closed concept with a double printing area, Bc. Thesis, in Czech] - 61 stran, Ústav Fyziky, Přírodovědecká fakulta, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Anotace:

Tato práce popisuje úpravy konkrétního modelu 3D tiskárny, modelu Prusa i3 MK3, na uzavřený koncept s dvojnásobně rozšířenou tiskovou plochou v ose X. Zabývá se návrhem a realizací jednotlivých mechanických částí, elektroniky a firmwaru. Popisuje varianty dílčích řešení a důvody, které nakonec vedly k upřednostnění konkrétního řešení.

Abstract:

This work describes modifications of particular model of 3D printer, model Prusa i3 MK3, to closed concept with doubly enlarged printing area in X axis. It deals with design and realization of individual mechanical parts, electronics and firmware. It describes the variants of partial solutions and the reasons that eventually lead to the preference of a particular solution.

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 – v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Přírodovědeckou fakultou - 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

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Mgr. Jakubu Geyerovi za odborné vedení této práce, cenné rady a vstřícnost při konzultacích. Také bych rád poděkoval své rodině za podporu, trpělivost a toleranci.

Obsah

1. Úvod	7
1.1. Cíle práce	9
2. Teorie tisku	10
2.1. Popis částí FFF/FDM tiskáren a jejich dělení.....	11
2.2. Teplotní roztažnost materiálů.....	15
3. Návrh a realizace	17
3.1. Podmínky.....	17
3.2. Konstrukce mechanických částí	18
3.2.1. 3D model tiskárny.....	18
3.2.2. Rám tiskárny	18
3.2.3. Tisková plocha.....	21
3.2.4. Tisková hlava, osa X.....	22
3.2.5. Skříň.....	24
3.3. Úprava elektroniky a kabeláže.....	26
3.3.1. Napájecí zdroj	26
3.3.2. Spínání druhé tiskové podložky.....	28
3.4. Firmware.....	41
3.4.1. Úprava konfiguračního souboru tiskárny	42
3.4.2. Zvětšení maximálních limitních hodnot tiskové plochy v ose X	42
3.4.3. Automatická kalibrace první vrstvy (Mesh Bed Leveling)	42
3.4.4. Zobrazení teploty druhé tiskové podložky	43
3.4.5. Zobrazení teploty druhé podložky v příkazu M105	45
3.4.6. Úprava spínání vyhřívané podložky	45
3.5. Sledování a dohled.....	47
3.6. Software.....	48
3.7. Testování a provoz	48
4. Závěr.....	49
5. Seznam zkratk, slovníček pojmů	51
6. Reference.....	52

7. Seznam obrázků	54
8. Seznam tabulek.....	55
9. Přílohy	56

1. Úvod

Historie 3D tisku sahá až do roku 1980, kdy Hideo Kodama v Japonsku popsal způsob zrychleného návrhu a výroby prototypů. Také popsal technologii vytvrzování fotocitlivého roztoku UV světlem. Později, roku 1986 si tuto technologii nechal patentovat Chuck Hull pod názvem SLA (StereoLithography). Paralelně s tím pak začaly vznikat další technologie, z nichž nejznámější je FDM (Fused Deposition Modeling), aktuálně registrovaná firmou Stratasys. V současné době je tato technologie spíše známá pod značkou FFF (Fused Filament Fabrication) z důvodu registrace značky FDM. Ve skutečnosti se ale jedná o stejný princip a myslíme o stejné technologii. [1] Rozšíření technologie 3D tisku nastalo až po roce 2009, kdy patent vypršel. Dochází tak ke zdokonalení elektroniky, tisku a potřebného software, a to začali využívat další společnosti a open source komunity.¹

Před zhruba dvaceti lety si málokdo mohl dovolit mít doma laserovou nebo inkoustovou tiskárnu. V důsledku technologického vývoje, miniaturizace či zefektivnění výrobních postupů, se laserové či inkoustové tiskárny staly spotřební elektronikou, dostupnou širokému spektru uživatelů. Dnes již nikoho nepřekvapí malá laserová tiskárna, která je i s vestavěným síťovým připojením typu WiFi nebo Ethernet, dostupná za zhruba 3 tisíce korun. 3D tisk prožívá v současnosti nebývalého rozmachu, který lze přirovnat ke zmiňovanému rozmachu 2D tiskáren. Například v Rakousku už v roce 2017 byla v běžném supermarketu s elektronikou (Mediamarkt) vystavena 3D tiskárna, jen kousek dál od řady myček na nádobí z jedné strany a PC příslušenství ze strany druhé. Je patrné, že se situace s 3D tiskárnami začíná podobat situaci s 2D tiskárnami. Průkopníkem této technologie se stal Josef Průša, který založil firmu s názvem Prusa Research s.r.o., jeho tiskárny jsou určeny široké veřejnosti, školám a menším firmám. Dnes operační systém Windows 10 obsahuje programy pro jednoduché 3D kreslení, prohlížeč 3D objektů, přímý tisk na 3D tiskárně nebo možnost využít internetové služby, která nám potřebný objekt vytiskne a hotový vytištěný výrobek pošle poštou. My si jen zvolíme typ materiálu a doručovací adresu.²

¹ History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented? | All3DP. *All3DP | World's #1 3D Printing Magazine* [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>

² Online 3D printing service. [online]. Copyright © 2009 [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/services/online-3d-printing-service/>

V současnosti je 3D tiskáren na trhu nepřeberné množství, cenově začínají už za méně než 4 tisíce korun.¹ Bohužel se jedná o nejjednodušší varianty, které mají mnoho negativ ve srovnání s dražšími modely, hlavně v oblasti kvality a funkcionality. Drtivá většina levných spotřebních modelů 3D tiskáren je limitována plochou, na kterou je možné tisknout. Pokud nemáme k dispozici větší tiskovou plochu a potřebujeme vytisknout něco většího, musíme objekt rozdělit na více částí a pak je následně spojit lepením nebo konstrukčním spojem, např. kolíky, zápatky, drážky, šrouby...

Rozdělení tisku na více menších částí je preferovaná metoda, ale ne vždy je vhodná. Nevýhody následného spojování mohou být především:

Změna pevnosti ve spoji

Nemožnost lepení některých plastů

Estetické – spoj může vadit pohledově

Zvětšení hmotnosti

Konstrukční – spoj by byl konstrukčně velmi složitý

Technologii 3D tisku provází i několik problémů, které souvisí s řadou fyzikálních vlastností. Jednou z nejvíce problematických je teplotní roztažnost materiálů. Při každé konstrukci jakéhokoliv zařízení, je třeba s touto skutečností počítat. Prakticky všechny materiály, v závislosti na teplotě, mění svůj objem. Tato vlastnost je pozorovatelná nejen u pevných látek, ale i u kapalin a plynů. Příklad: plastový výrobek dlouhý 1000 mm, vyrobený z často používaného materiálu ABS, se při zahřátí z teploty 20°C na 110°C prodlouží přibližně o 8,1 mm, což je poměrně velký rozdíl rozměru a při chladnutí dochází k stejnému zkrácení.² Během tisku dochází k zahřívání, ale i chladnutí v různých částech tištěného objektu, které jsou vzájemně spojeny a ještě přilepeny k tiskové ploše. Podobně, jako se prohne bimetalový plíšek složený ze dvou materiálů s různou teplotní roztažností, prohne se i předmět složený pouze z jednoho materiálu, pokud je zahříván nebo ochlazován jen z jedné strany. Zde hovoříme o vnitřním pnutí materiálů, které způsobuje deformaci objektu, oddělování jeho jednotlivých vrstev od sebe, praskliny nebo odlepení od tiskové plochy. Výše naznačené problémy jsou důvodem, proč není jednoduché „jenom“ zvětšit tiskovou plochu 3D tiskárny, ale je nutné zajistit tisk ve stabilním a teplejším prostředí, které lze docílit tiskem v uzavřeném

¹ 3D Printer - Shop best 3D Printer Kits online with Wholesale Price at Banggood.com. *Online Shopping for Cool Gadgets, RC Quadcopter, 3D Printer at Banggood* [online]. Copyright © Banggood All Rights Reserved. [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <https://www.banggood.com/Wholesale-3D-Printer-c-3480.html>

² Kalkulačka teplotní roztažnosti online, *PLASTUM Trading s.r.o.* [online]. Dostupné z: <https://plastum.cz/teplotni-roztaznost>

prostoru, odděleném od okolního prostředí, kde nebude docházet k prudkým změnám teploty během tisku. Název **uzavřený koncept** tiskárny vychází právě z tohoto principu tisku v uzavřeném prostoru.

Práce je zaměřena na úpravu tiskárny *Prusa i3 MK3*, která nepatří do kategorie levných tiskáren, přesto je jednou z nejrozšířenějších 3D tiskáren ve své kategorii. Obsahuje mnoho technických vylepšení, které levné tiskárny nemají. Je to produkt české firmy, která dodává i veškeré náhradní díly a poskytuje servis a cenné rady svým uživatelům a proto je tedy nejlepším kandidátem pro projekt zvětšení tiskové plochy.

1.1. Cíle práce

Cílem práce je vytvořit funkční prototyp modifikované 3D tiskárny Prusa i3 MK3, který bude mít (na rozdíl od klasické verze) podobu uzavřeného konceptu, který umožní 3D tisk rozměrnějších objektů i z teplotně více roztažných materiálů (filamentů). Současně bude mít tento prototyp dvojnásobnou vyhřívanou tiskovou plochu (v ose X), která bude vyhřívat druhotně i uzavřený tiskový prostor.

- Popsat existující principy u uzavřených konceptů 3D tiskáren (pohyb podložky v ose Y nebo Z, přímý/nepřímý extruder, atd.) a vybrat vhodná řešení použitelná pro modifikaci Prusa i3 MK3.
- Vytvořit zjednodušený 3D model prototypu a modely součástek (určených k vytištění), které budou použity při modifikaci.
- Realizovat fyzickou modifikaci jedné tiskárny Prusa i3 MK3 na uzavřený koncept včetně rozšíření tiskové plochy a nezbytných úprav elektroniky.
- Provést úpravu firmware tak, aby bylo zachováno maximum z funkcí dostupných v originální Prusa i3 MK3.

2. Teorie tisku

3D tisk je aditivní výroba, to znamená, že se přidává materiál k již existující části, místo klasického opracování materiálů řezáním, broušením nebo soustružením. Jedná se tedy o technologii, kde je minimum odpadu. Většina materiálu se spotřebuje jen tam, kde je potřeba. Výjimkou jsou podpěry, které je nutné u objektů s převisem do volného prostoru vytisknout a následně odstranit. Toto je ale možné minimalizovat vhodným konstrukčním návrhem nebo vhodným natočením objektu směrem k tiskové podložce.

3D tiskárny lze rozdělit podle výrobní technologie, podle typu materiálu a metody jejího tavení a tuhnutí. Základními zástupci jednotlivých technologií jsou: SLA, DLP, SLS a FDM.

SLA (Stereolitography) metoda používá tekutý polymer, jeho vytvrzení je prováděno bodovým zdrojem světla o konkrétní vlnové délce, jde převážně o UV laser, jehož paprsek je směřován přímo do místa, kde je materiál vytvrzen. Po dokončení tisku je nutné ještě výsledný objekt dotvrzovat působením UV světla ve speciální komoře, protože není zcela tvrdý. SLA typ tisku je velice přesný, ovšem náklady na pořízení i spotřební materiál jsou poměrně drahé. [2]

DLP (Digital Light Processing) metoda opět používá tekutý polymer, je velmi podobná technologii SLA, s tím rozdílem, že místo pohybujícího se soustředěného paprsku světla je proces osvit polymeru realizován v celé ploše jedné vrstvy. Toho je docíleno pomocí displeje či projektoru, kde je jako zdroj světla použito UV záření. Tím že se provádí osvit celé vrstvy najednou, je tisk rychlejší a vrstvy jsou spolu lépe spojené. V roce 2019 začala společnost Prusa Research prodávat svojí verzi tiskárny a doslova zbořila představu o nedostupnosti této technologie z důvodu vysoké ceny. Je to další krok k většímu rozšíření této technologie. [3]

SLS (Selective Laser Sintering). Základem tisku je prášek (kov, plast, sklo a další), tento prášek je nanesen v každé vrstvě po celé tiskové ploše a je válcem zarovnán přesně na požadovanou výšku. Pomocí laseru se pak, podobně jako u SLA technologie, vykreslí požadovaná vrstva. Laser má na rozdíl od SLA technologie mnohonásobně větší výkon, tím dojde k roztavení prášku a spojení jednotlivých částíček. Neosvětlená místa zůstávají sypká, ale tuhá. Po vykreslení jedné vrstvy se posune dno s celým objemem o výšku jedné vrstvy níže a celý proces se opakuje. SLS typ tiskáren je velice drahý a je používán především

v průmyslovém odvětví. Výhodou je, že nezapečený prášek zůstává v okolí objektu a odpadá nutnost použití podpěr při tisku. Nezapečený prášek se po ukončení tisku recykluje a je zase možné jej použít. SLS tisk je velice přesný, kovové materiály jsou technicky a konstrukčně lépe použitelné pro jejich vlastnosti než například plast. Nevýhodou je nemožnost tisku dutých objektů, protože prášek zůstane uvnitř a není jej pak možné vysypat, nutnost recyklační a čisticí stanice pro zbylý prášek a vysoká cena. [4]

FFF (Fused Filament Fabrication). Tisk začíná roztavením materiálu, který prochází horkou tryskou, ta se vzhledem k tiskové ploše pohybuje v osách X Y a Z, při těchto pohybech je z trysky vytlačován roztavený materiál. Tisk musí probíhat tak, aby pod tryskou byl vždy pevný podklad. Není možné tisknout do prázdného prostoru. Nově nanášená vrstva se musí spojit s vrstvou pod ní, alespoň částí plochy. Pokud se jedná o tisk první vrstvy, znamená to, že se tiskne přímo na tiskovou plochu. Tento typ tiskárny je v rámci bakalářské práce upravován, proto budu dále podrobněji popisovat konstrukci a odlišnosti jednotlivých funkčních bloků, podle nichž je možné dále tyto tiskárny podrobněji dělit.

2.1. Popis částí FFF/FDM tiskáren a jejich dělení

- **Hotend a extruder**

Materiál používaný pro tisk musí projít horkou tryskou, která je součástí zařízení nazývaného HotEnd. Tato část má za úkol roztavit materiál k tisku a přímo tisknout roztavený materiál na požadované místo. HotEnd má dva otvory, vstup a výstup materiálu. Výstup musí být zahřátý přesně na požadovanou hodnotu tavení, aby správně taval materiál pro tisk, zatímco vstup je nutné naopak chladit, aby nedošlo k ucpaní vstupního otvoru nedostatečně roztaveným materiálem. Dále obsahuje čidlo pro měření teploty, topné tělísko, trysku a ventilátor pro chlazení vstupní části. Mezi nadstandardní výbavu patří případně čidlo měření vzdálenosti trysky od tiskové podložky nebo ventilátor pro chlazení materiálu na výstupu, který je používán při tisku, například převisů a mostů. Přímo souvisí s další částí zvanou Extruder, jehož úkolem je dopravit tiskovou strunu (filament) do hotendu. Posun filamentu je zajišťován pomocí pohonu ozubeného a přítlačného kolečka, přímo krokovým motorkem, mezi kterými pak prochází tisková struna. Extruder může být přímo součástí pohybujícího se celku tiskové hlavy, pak hovoříme o **přímém extruderu**, nebo může být umístěn na pevné části a jde o **nepřímý extruder**, ten je spojen s tiskovou hlavou pomocí trubičky (bowdenu), ve které se tisková struna pohybuje. Strunou je u obou typů extruderů pohybováno oběma směry, je tedy

při tisku vtlačována do tiskové hlavy, nebo i povytahována zpět při události zvané retrakce. Povytažení struny dovnitř tiskové hlavy zabrání samovolnému vytékání rozehřátého materiálu z trysky na nežádoucí místa. Například při přejezdech trysky nad místy, kde se nesmí vytlačit žádný materiál. Dále se pojmem tisková hlava nazývá celek, který se pohybuje a tiskne, ať už obsahuje extruder nebo ne. Vlastnosti variant extruderů jsou následující:

Přímý extruder

- ✓ motor pro posun filamentu je součástí tiskové hlavy
- ✓ vyšší hmotnost
- ✓ větší namáhání ložisek
- ✓ přesnější dávkování materiálu
- ✓ vhodné pro tisk z flexibilních materiálů

Nepřímý extruder

- ✓ motor pro posun filamentu je umístěn mimo pohyblivou část tiskové hlavy
- ✓ struna je vedena do tiskové hlavy bowdenem
- ✓ lehčí konstrukce pohyblivé části a menší dynamické rázy při změně pohybu
- ✓ možné uvíznutí struny v bowdenu

• Pohon pohyblivých částí

Pohyb trysky vzhledem k tiskové ploše je intenzivní v osách X a Y, v těchto osách se provede nejvíce pohybů během celého tisku. V ose Z se pohyb uskutečňuje zpravidla v inkrementálních přírůstcích a s vysokou přesností, avšak jen ve velmi malých hodnotách. V jednotlivých osách je pohyb řešen krokovými motory. Základní dělení typu pohybu je:

- ✓ Pohyb pomocí závitové tyče - tyč prochází otvorem s vnitřním závitem, který je spojen s pohyblivou částí. Tyč se pouze točí, nikam jinam se nehýbe. Využívá se přesnosti, zároveň je pohyb pomalý.
- ✓ Pohyb pomocí řemene - plochý ozubený řemen je napnutý mezi dvě řemenice, z nichž jedna je poháněna a druhá je jen jako kladka. Tento pohyb je zpravidla rychlejší.

Konstrukční řešení FFF tiskáren je dále děleno podle pohybu tiskové podložky a tiskové hlavy v osách XYZ. Nejčastější používané konstrukce se dělí na následující tři typy:

Pohybující se podložka

Podložka pohybující se zpravidla v ose Y je řešením, kde je podložka stále ve stejné výšce, pohybuje se pouze ve směru osy X (dopředu a dozadu) pomocí převodu s řemenem po vodících tyčích s lineárními ložisky.

Tisková hlava se pohybuje po ose X pomocí řemene, po ose Z pomocí dvou závitových tyčí. Pohybuje se převážně v jedné ose a tím je minimalizován pohyb velkého svazku kabelů. Nedochozí zde k posunu nad celou tisknutelnou plochou a konstrukčně je pohyb jednodušší, nedochází k dynamickým rázům při pohybu ve všech vodorovných směrech, ale pouze v jedné ose. V druhé ose je pohybováno tiskovou podložkou a zároveň tisknutým objektem, těžiště pohybu v ose podložky je velmi nízko. Dynamické rázy při pohybu je možné dobře kompenzovat podstavou tiskárny. Horní část tiskárny může být lehčí a konstrukčně jednodušší. Pro výtisky s větší hmotností je ovšem nepříjemná dynamika tisknutého objektu. Čím těžší objekt tiskneme, tím více je namáhán motor a řemen pro posun tiskové podložky. Nevýhodou u toho řešení může být i větší půdorysný rozměr tiskárny.

Nosný rám

Toto řešení pohybuje tiskovou podložkou při tisku převážně směrem dolů. Výhodou je, že hmotnost tištěného objektu téměř neovlivňuje průběh tisku. Extruder se pohybuje v ose X a Y a stále ve stejné výšce, konstrukce rámu je v tomto případě obvodová a je složitější, pro obě osy je použit řemen. Ve směru jedné osy je řemen dvojnásobně dlouhý, protože je nutno pohybovat s oběma konci osy současně. V této ose (Y) určuje síla napnutí a kvalita řemenu celkové vůle, které jsou zpravidla větší než v ose X. Pohyby kabelů jsou uskutečňovány ve dvou osách a jsou tedy delší a náchylnější na poruchu. V případě přímého extruderu ještě dochází při přejíždění extruderu mezi krajními polohami k vytažení a rozvinutí struny z cívky, která ale nejde už navinout zpět. Tím vzniká nebezpečí zaseknutí nebo zamotání struny a následnému problému s jejím posunem do extruderu. Obecně lze tento typ tiskáren jednodušeji uzavřít, nosný rám bývá zároveň využit k uzavření prostoru skříně.

Delta

Princip pohybu je u tohoto typu tiskárny odlišný od předchozích dvou typů, nepoužívá klasický systém pohybu po třech osách kartézské soustavy. Tisková hlava spojuje tři ramena, rozmístěná do trojúhelníku, jejichž vnější konce se pohybují pouze ve vertikálním směru po sloupcích. Každé rameno se pohybuje nezávisle, skutečný

pohybu tiskové hlavy je možný všemi směry. Tisková podložka, zpravidla kruhového tvaru, se nemusí pohybovat nikam. Výhodou je především poměrně vysoká rychlost tisku. Nevýhodou je složitější geometrie a sestavení, kalibrace a vysoká výška celé konstrukce.¹

- **Tiskový prostor**

U většiny levných tiskáren neprobíhá tisk v uzavřeném prostoru, to přináší jistá omezení v podobě výběru typu materiálu, ze kterých je možné tisknout. Hlavním problémem je, že při tisku se tiskový materiál zahřívá a zase chladne, tzn., že zákonů fyziky tak mění své vlastnosti. Změna pevného skupenství na taveninu je žádoucí, jinak by nešlo tisknout, ale se změnou teploty se mimo jiné mění i přilnavost, objem a tuhost, tyto vlastnosti zásadně ovlivňují tisk a jsou pro každý typ materiálu různé. Aby se zabránilo výkyvům teplot v průběhu tisku, je třeba zabránit proudění chladného vzduchu z prostoru místnosti kolem tištěného objektu, toho lze docílit právě uzavřeným konceptem tiskárny, tzn., že tisk probíhá v uzavřeném prostoru, kde je pokud možno teplota v celém prostoru stejná.

- **Teplota tiskové plochy**

Proces tisku je zásadně ovlivněn teplotou okolí, teplotou tiskové podložky a teplotou předchozí vrstvy. Je důležité, aby první vrstva dostatečně přilnula k tiskové ploše a neodlupovala se. Zahřátí tiskové plochy na vhodnou teplotu pomáhá zvětšit přilnavost první vrstvy a je kompromisem mezi přilnavostí a tuhostí materiálu. Každý použitý materiál má výrobcem doporučené teploty tisku. Teplotu tiskové podložky pro konkrétní materiály většinou doporučuje výrobce tiskárny. Tiskové plochy jsou vyrobeny z různých materiálů s různou přilnavostí povrchu, některé dokonce nejsou ani vyhřívány. Materiál podložky v kombinaci s její teplotou je neznámá veličina pro výrobce tiskového materiálu. Nejspíše z tohoto důvodu teplotu tiskové plochy neuvádějí. Nejčastěji platí, že pokud je teplota nízká, špatně přilne k tiskové ploše a špatně se spojí s další vrstvou. Pokud je naopak teplota tiskové plochy moc vysoká, dochází k deformacím tištěného objektu, ten začne měknout a měnit svůj tvar, takže není možné jej úspěšně dotisknout do konce. Při tisku vyšších objektů dochází k teplotnímu rozdílu mezi jednotlivými vrstvami, spodní vrstvy mají teplotu podobnou jako tisková plocha, nově vytištěná vrstva se ochlazuje na teplotu vrstvy pod ní a pokud je objekt

¹ All3DP | *World's #1 3D Printing Magazine* [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-a-delta-3d-printer-simply-explained>

vyšší, tak dál od tiskové plochy směrem vzhůru zase chladne, tím se vrstva zmenšuje v osách X a Y. Jenže nemůže změnit svůj rozměr, protože je přilepena k spodní vrstvě. Místo toho se v ní vytvoří vnitřní pnutí. Nanesením další horké vrstvy se spojí vrstva správného rozměru se spodní vrstvou, která už má vnitřní pnutí. Každou další vrstvou se síly jednotlivých vrstev sčítají a může dojít k deformaci tištěného objektu, jeho odlepení od tiskové plochy či jeho prasknutí, tímto problémem trpí v podstatě všechny materiály, některé více (ABS), jiné méně (PLA), vše závisí na rozměrech tisknutého objektu.

2.2. Teplotní roztažnost materiálů

Všechny výše uvedené typy tiskáren musí řešit problematiku teplotní roztažnosti materiálů. Lineární koeficient teplotní roztažnosti je parametr, který má smysl uvádět u pevných těles pouze určitého tvaru, kde jeden rozměr je výrazně větší než zbývající rozměry a značí se α . Příkladem může být hranol, drát, traverza, ale i plech nebo tabule skla. Samozřejmě dochází i ke změně průměru drátu nebo změně tloušťky skla a ne jen délky. Objemová teplotní roztažnost je v případě těchto těles zanedbávána, protože je vzhledem k délce mnohonásobně menší. V případě 3D tisku záleží na typu tištěného objektu, jestli budeme brát v úvahu lineární (déлковou) nebo objemovou roztažnost.

Pro výpočet změny délky objektu použijeme následující vztah:

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta t$$

Pro výpočet nové délky po změně teploty pak vychází vztah:

$$l = l_0 (1 + \alpha \Delta t)$$

kde l_0 je počáteční délka a Δt je rozdíl počáteční a konečné teploty. [5]

Tabulka 1 - Přehled koeficientu lineární délkové roztažnosti vybraných materiálů

Název materiálu	α [$\cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$]
ABS	90 – 110
PET	60
ocel	13
hliník	22,2
sklo	9
tavený křemen	0,5

V tabulce 1 jsou uvedeny pouze orientační hodnoty koeficientu délkové teplotní roztažnosti několika vybraných materiálů, konkrétní hodnoty jsou závislé na přesném složení materiálu a technologii jejich výroby.

Na tiskové podložce dlouhé 504 mm se materiál ABS při zchlazení z 110°C na 20°C zkrátí o 4mm. ¹

¹ Kalkulačka teplotní roztažnosti online, *PLASTUM Trading s.r.o.* [online]. Dostupné z: <https://plastum.cz/teplotni-roztaznost>

3. Návrh a realizace

Před samotnou realizací bylo nutné stanovit podmínky, tj. determinující parametry, které budou ovlivňovat realizaci, dále bylo nutné načíst a zjistit jak přesně tiskárna funguje a následně tak rozmyslet konstrukci mechanických částí, úpravy elektroniky a kabeláže, změnu firmware a software, zajistit sledování a dohled skrze počítač a to vše pak sestavit, rozchodit a otestovat v provozu. Potřebné tisknutelné díly byly vytištěny na původní funkční tiskárně, ještě před jejím rozebráním a přestavbou.

3.1. Podmínky

U každého realizačního projektu se na jeho začátku stanovují podmínky, které přesně definují a popisují cílový stav, nejinak je to i v této práci:

- ✓ Využít maximum dílů z již existující tiskárny.
- ✓ Minimalizovat cenu.
- ✓ Možnost realizace v domácích podmínkách.
- ✓ Jednoduchost údržby.
- ✓ Kompatibilita s následnými upgrady a verzemi Prusa tiskáren.
- ✓ Použití standartního software Slic3rPE, PrusaSlicer.
- ✓ Zdokumentovat dostatečně zásah do firmware z důvodu „synchronizace“ s novými verzemi.
- ✓ Připojení k RaspberryPI a OctoPrint.

Rozborem stanovených podmínek a analýzou vhodnosti různých variant možných řešení bylo rozhodnuto o fyzickém rozdělení tiskárny na dvě hlavní části s dalšími podmínkami:

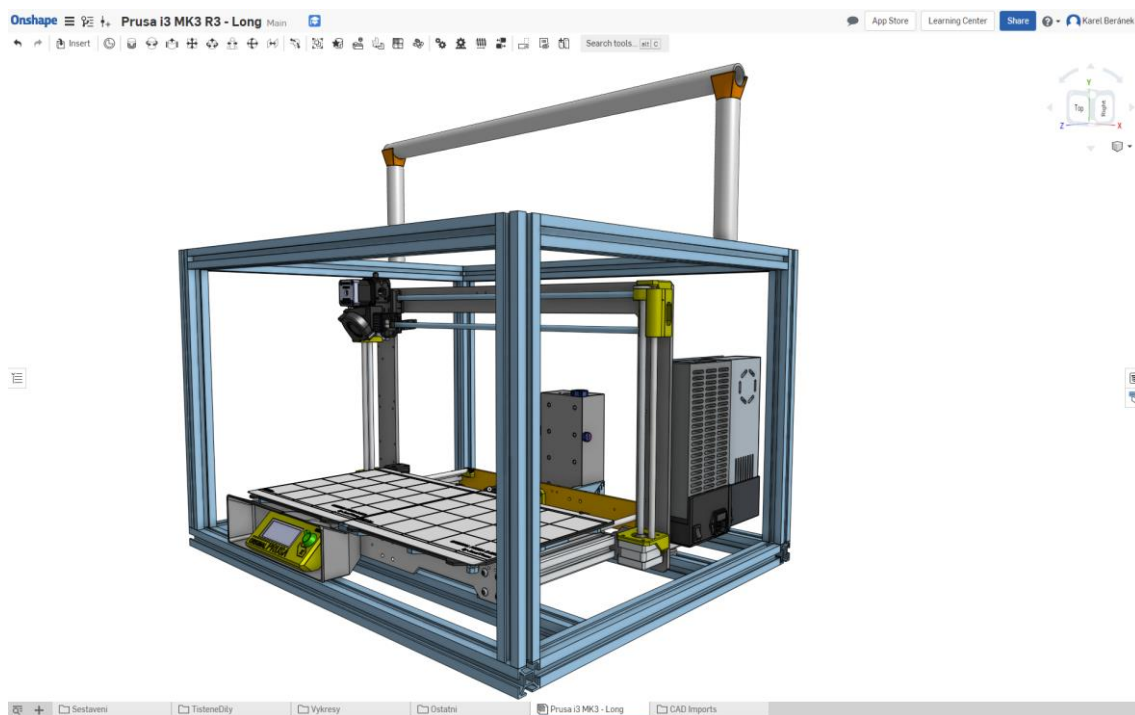
- ✓ **samostatná tiskárna** – rozšířená tiskárna Prusa i3 MK3 v ose X na dvojnásobný rozměr. Tiskárnu musí být možné provozovat samostatně i bez skříně a musí být snadno vyjmutelná ze skříně z důvodu zjednodušení servisních zásahů, údržby nebo z důvodu přenositelnosti. Všechny provozní díly tiskárny musí být schopny provozu i bez skříně.
- ✓ **skříň** - vnější rám s průhledným zakrytváním, musí spolehlivě zajistit nesení tiskárny, rovnou plochu pro umístění tiskárny, umístění cívek filamentu mimo vnitřní část skříně, jednoduché otevírání pouze přední části skříně.

3.2. Konstrukce mechanických částí

Konstrukce mechanických částí se skládá zhruba z těchto částí, kterým se níže budeme věnovat: 3D modelu tiskárny, rámu tiskárny, tiskové plochy, extruderu a skříně

3.2.1. 3D model tiskárny

V programu **OnShape** jsem navrhl a následně vytvořil nový kompletní model 3D tiskárny. [6]



Obrázek 1 - 3D model tiskárny¹

Program OnShape je software parametrického typu CADu, je provozován jako online webová aplikace pouze v internetovém prohlížeči, takže se nemusí instalovat. Použití bezplatné licence umožňuje program používat s jediným „omezením“ - všechny vytvořené modely jsou automaticky veřejně dostupné. Pro školy je možné využít výukovou licenci, která vytvořené modely automaticky nezveřejňuje.

3.2.2. Rám tiskárny

Nově vytvořený návrh rámu vychází z původního výkresu Prusa i3 MK3 dostupného online na githubu. [7]. Následně byl překreslen a rozšířen o 254 mm, většina otvorů zůstala zachována na původním místě, pouze ve střední části byly vytvořeny otvory pro případné doplňující hliníkové profily. Tyto profily nakonec nebylo potřeba osadit. Nově zhotovený

¹ Zdroj: Autor práce

výkres ve formátu AutoCAD 2007 byl vyexportován a předán elektronicky firmě Alcom Alval s.r.o., která provedla jeho strojové řezání vodním paprskem a označení (nastřelení) teček pro vrtání otvorů CO2 laserem.

Pro rám byl vybrán materiál označený názvem ALQAL, EN AW-5083 [AlMg4,5Mn0,7] tloušťky 6 mm. Jedná se o oboustranně frézovaný materiál ze slitiny hliníku, magnézia a manganu. Kvalita a přesnost rámu je klíčovou vlastností, ovlivňující přesnost a kvalitu vytištěných objektů. Vstupním materiálem pro výrobu přesných hliníkových desek je litý blok, který se dále tepelně zpracovává, aby se materiál zbavil vnitřního pnutí. Tento se nařeže na horizontální pásové pile na menší tloušťky a na portálové frézce, jejíž hlava má průměr 2100 mm, se oboustranně ofrézuje povrch na požadovanou tloušťku s přesností +/- 0,1 mm. Poslední operací je oboustranné potažení ochrannou PE fólií. [8] Klasické válcované plechy nemají takovou přesnost a mají vnitřní pnutí, které se může projevit zkroucením jednotlivých dílů po vyřezání. Řezání vodním paprskem bylo vybráno pro omezení zahřívání, protože klasické opracování může vést ke zkroucení rámu.

Výhody řezání vodním paprskem:

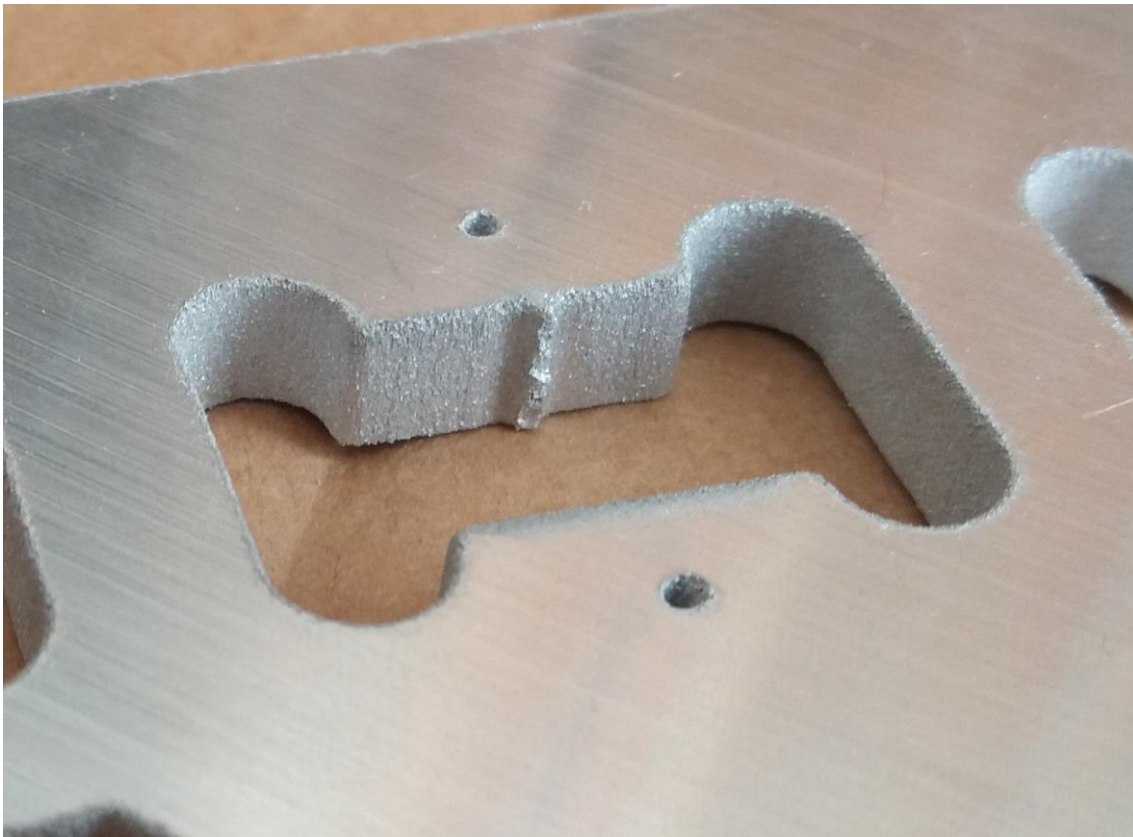
- ✓ Řezání vodním paprskem je bez tepelného ovlivnění řezaného materiálu, tzv. studený řez.
- ✓ Obráběný díl nevykazuje fyzikální, chemické ani mechanické změny a je následně snadno obrobitelný.
- ✓ Vodní paprsek jen minimálně silově působí na řezaný materiál, nedochází tudíž ke vzniku mikrotrhlin.
- ✓ Řezání vodním paprskem je technologií přátelskou k životnímu prostředí. Při vlastním řezání nevznikají žádné ekologicky nevhodné zplodiny. Spotřeba vody na řezání je velmi malá. Z odpadní vody se při sedimentaci vyloučí nečistoty. Jako abrazivo se používají netoxické látky, které mohou být recyklovány pro opakované použití. Použité abrazivo může být bez problémů uloženo na skládku. [9]



Obrázek 2 - Části rámu tiskárny vyříznuté vodním paprskem¹

Následně bylo nutné ručně provést opracování řezaných dílů, kde vznikl poměrně zásadní problém v otvorech pro umístění ložisek v části rámu, na které jsou uchycené tiskové podložky. V místech začátku a konce řezání totiž vznikají otřepky, které byly sice velmi ostré a nebezpečné, ale hlavně byly v místech potřebného přesného uložení ložisek. Proto bylo nutné nejen tyto otřepky zbrousit, ale přesně usadit ložiska jak výškově, tak rovnoběžně. Viz obrázek 3. Po několikahodinové práci s jehlovým pilníkem, lineárními ložisky nasunutými na pojezdových tyčích a posuvným měřidlem se povedlo dočistit hrany a ložiska usadit správně. Pokud by byly ložiska nesprávně usazené nebo zkřížené ve svých osách, docházelo by k jejich nadměrnému zatížení a opotřebení. Pojezdové tyče nasazené do volně položených ložisek na desce musí být navzájem rovnoběžné a nesmí se kolébat v dosedacích hranách, ostatní řezané hrany nemají vliv na přesnost celé tiskárny, protože jsou jen pohledové. Všechny další díly jsou uchycené v otvorech, které bylo třeba vyvrtat, protože byly díry naznačené CO2 laserem, bylo celkem bezproblémové jejich vrtání na stojanové vrtačce. Při vrtání bylo nutné vrtat s nižšími otáčkami a jako mazivo použít technický lín, slitina se pak nelepí na vrták a piliny jsou správně vyhazovány ven z vrtaného otvoru, lín se odpaří a vše zůstává čisté. 73 vyvrtaných děr bylo následně vyřezáno závitem M3, což byla také časově náročná práce, protože závitník M3 je velmi jemný a v domácích podmínkách není možné řezat takto malé závity jinak než ručně. Stejně jako při vrtání, byl závitník mazán technickým lihem, který byl pomocí injekční stříkačky aplikován přesně do řezaného závitu.

¹ Zdroj: Autor práce



Obrázek 3 - Detail místa pro usazení lineárního ložiska pojezdu podložky¹

3.2.3. Tisková plocha

Tisková plocha je v návrhu zvětšena na dvojnásobný rozměr v ose X, nejedná se o zvětšení plochy v obou rozměrech, to by bylo technicky mnohem složitější a i finančně náročnější. Hlavním důvodem této práce je rozšíření plochy pro potřeby tisku delších a rozměrnějších objektů. Navržené řešení rozšířilo tiskovou plochu tak, že se vpravo vedle originální tiskové podložky umístila druhá, stejná, která byla objednána jako náhradní díl. Boční strany jsou rovné, na rozdíl od přední a zadní části. Provedení tiskové podložky je unikátní, obsahuje vyhřívání, kalibrační body, neodymové magnety držící pružný ocelový tiskový plát potažený PEI fólií nebo PEI zrnitý práškový povrch. Středová spára 0,5 mm mezi levou a pravou podložkou byla navržena záměrně. Správnou pozicí tiskových plátů před každým tiskem je nutné minimalizovat její vzdálenost. Zároveň musí být kontrolováno správné usazení tiskových plátů, aby nedošlo k jejich překrývání, což by vytvořilo vyvýšenou hranu. Jejich posun je možný jen přibližně 0,5 mm do stran. V zadní části podložky jsou totiž fixační šrouby pro správné usazení tiskového plátu, které nedovolují jeho větší pohyb do stran. Přesto by tato

¹ Zdroj: Autor práce

malá hodnota možného posunu, a tím i korekce mezery mezi tiskovými podložkami, měla být dostatečná.

Návrh držáku, který nese obě tiskové podložky (FROG) byl vytvořen záměrně s více otvory pro umístění lineárních ložisek a jejich umístění počítalo s třemi pojezdovými tyčemi a pěti ložisky, rozmístěnými po dvou na vnějších tyčích a jednoho na střed. Celkem bylo navrženo 9 otvorů ve třech řadách, je možné v budoucnu změnit rozložení ložisek. Problém s usazením ložisek je popsán v článku 3.2.2 a detail znázorňuje Obrázek 3.

Termistor pro měření teploty druhé tiskové podložky je zapojen do nepoužitého volného konektoru řídicí desky Einsy-Rambo určeného pro termistor druhé tiskové hlavy. Ten bude dále využit při úpravě firmware.

3.2.4. Tisková hlava, osa X

Tisková hlava byla popsána v části teorie tisku (kapitola 2.1), zde jsou uvedeny pouze úpravy, změny a práce s ní spojené.

Úprava pojezdové části, rozšíření pojezdu v ose X

Originální pojezdové tyče jsou průměru 8mm a délky 370 mm, ty byly vyměněny za delší, o celkové délce 624 mm. Předchozí tyče, používané v tiskárně Prusa MK2S používaly méně tvrzenou ocel HRC25. V tiskárně MK3 jsou použity tyče tvrdosti minimálně HRC58. Problematika tvrdosti hladkých tyčí je zmíněna v diskuzi [10]:

Některé objednávky tiskáren Prusa i3 MK3 odešly s tyčemi z méně tvrzené oceli HRC25, které byly dodávány s předchozím modelem MK2S. Rychlejší pohyb MK3 způsobuje jejich rychlejší opotřebení. Správnost chromované tvrzené tyče s tvrdostí **minimálně HRC58**, zjistíte za pomoci neodymových magnetů (magnety z ledničky Vám v tomto případě bohužel neposlouží). Pokud se neodymové magnety na tyči udrží, máte správnou sadu.

Nové tyče použité při této přestavbě mají dokonce lepší parametry - indukčně kalené s tvrdostí HRC62 a byly objednány v internetovém obchodu *cncshop.cz*. Testování pojezdu v ose X a potvrzení funkčnosti byl klíčovým bodem v celém návrhu, který ukázal, že není nutné zasahovat do částí tiskové hlavy, extruderu a pojezdu po ose X. Protože nebylo nutné

zasahovat do konstrukce extruderu, je možné v budoucnu provést upgrade jednotlivých částí, např. upgrade z verze MK3 na verzi MK3S, tento upgrade je nyní k dispozici na eshopu.¹

Součástí úprav byla také výměna řemenu za delší, o 508 mm, s celkovou délkou 1358 mm.

Změna trysky na 0,6 mm

Tisk větších objektů je samozřejmě i časově náročnější, pro urychlení tisku větších objektů byla vyměněna tryska standardního průměru 0,4 mm za větší, s průměrem 0,6 mm. Například pro tisk části široké 1,2 mm není třeba tří linek ale jenom linky dvě, to umožňuje tisk v průměru o třetinu rychleji než se standardní tryskou, vše však záleží na konkrétní konstrukci tištěného objektu. Kromě benefitu rychlejšího tisku v ploše, přináší větší průměr trysky i možnost tisknout s větší výškou vrstvy, tím je možné tisk opět zrychlit a přitom zachovat možnosti tisku šikmých stěn se stejným úhlem, výsledné objekty jsou navíc pevnější. [11]

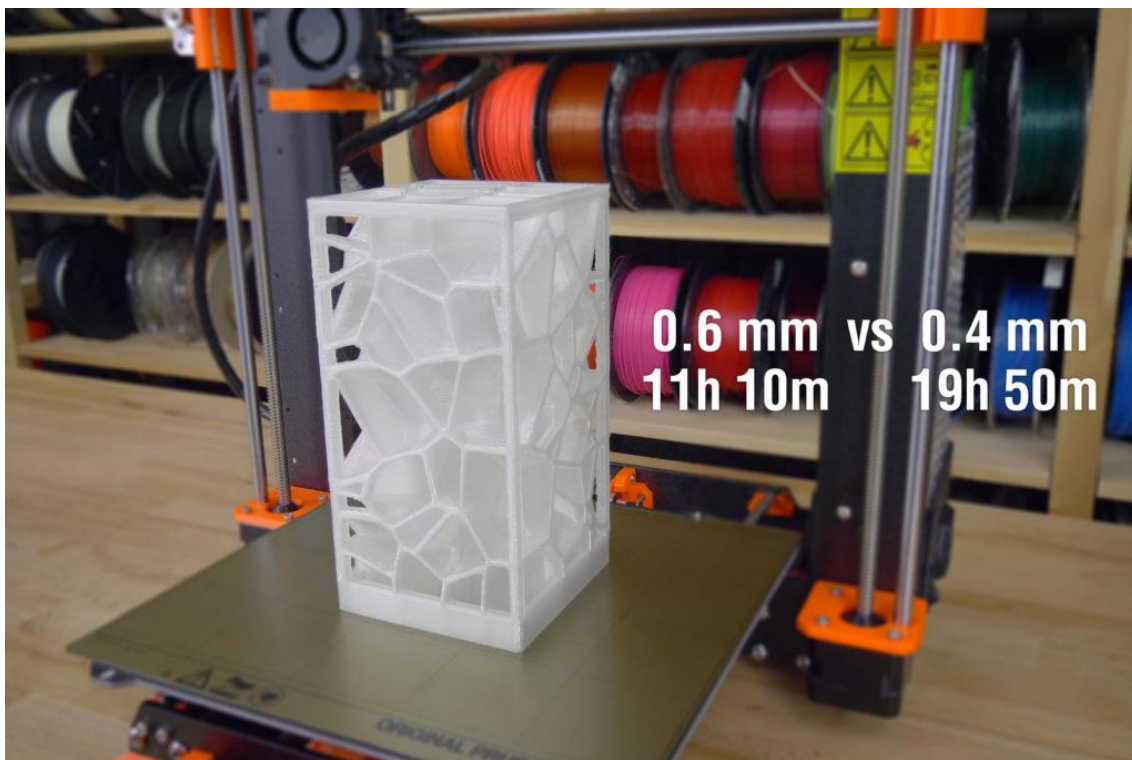
Výhody změny trysky

- ✓ *Až 2× rychlejší tisk*
- ✓ *Téměř stejná kvalita jako s tryskou 0.4 mm*
- ✓ *Odolnější výtisky (pevnější)*
- ✓ *Téměř nulové riziko ucpání trysky*

Nevýhody změny trysky

- ✓ *Horší rozlišení drobných detailů a textů*
- ✓ *Hůře odstranitelné podpory*

¹ Original Prusa i3 MK3 to MK3S upgrade kit - Prusa Research. [online]. Copyright © Prusa Research s.r.o. [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/upgrady/898-original-prusa-i3-mk3-to-mk3s-upgrade-kit.html>



Obrázek 4 - Tisk lampy a porovnání délky tisku¹

3.2.5. Skříň

Obvodový rám skříně je sestaven z hliníkových profilů a z polykarbonátových čirých desek, které jsou uzavřeny v drážkách profilů, pouze přední část skříně je otevírací, pravá a zadní polykarbonátová deska je opatřena otvory pro větrání zdrojů a řídicí elektroniky a v horní části je otvor pro vstup tiskové struny. Hliníkové profily jsou čtvercového průřezu 30 x 30 mm s podélnou drážkou, to umožňuje uzavření polykarbonátových desek a zabraňuje jejich dalšímu pohybu. Z výše uvedeného popisu vyplývá, že celou tiskárnu je možné vyjmout přední částí, proto nepředpokládám, že bude nutné skříň v budoucnu rozebírat.

Hliníkové profily byly objednány přes internetový obchod ehlinik.cz (A + A Pardubice spol. s r. o.). Pro jejich spojování byly použity pouze 4 originální spojky od výrobce, protože cena jedné spojky je 110 Kč bez DPH. Konstrukce celého rámu skříně vyžaduje 16 rohových spojů a 4 posuvné, tzn., že použitím originálních spojek by jen cena spojů vyšla na 2200 Kč bez DPH, to je více než dvojnásobek ceny samotných profilů. Pro rohové spoje jsem použil spojování pomocí mosazné hmoždinky s vnějším průměrem 10 mm a vnitřním metrickým závitem M8, hmoždinka je zasunuta do vnitřní dutiny profilu, kde se při spojení rozepře

¹ O mně - Josef Prusa - 3D tisk a tiskárny Josef Prusa – 3D tisk a tiskárny [online]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/vse-o-tryskach-s-ruznym-prumerem>

šroubem, který zároveň přitahuje rohový profil. Takto vytvořené spojení je dostatečně pevné a za desetinu ceny. Detail viz Obrázek 19 v příloze.

Při výběru materiálu pro zakrytování skříně byly zvažovány čiré materiály plexisklo, polykarbonát, PET, z obavy měknutí a prohýbání desek byl vybrán polykarbonát z důvodu největšího rozsahu doporučených provozních teplot.

Tabulka 2 - Vlastnosti materiálů čirých desek pro zakrytování skříně¹

<i>materiál plné desky</i>	<i>pružnost</i>	<i>UV stabilita</i>	<i>použití v exteriéru</i>	<i>tepelná odolnost</i>
polystyrol	N	N	N	+5 až +75°C
PVC polyvinylchlorid fólie	A	A	A	-10 až +60°C
PVC polyvinylchlorid desky	N	N	N	+5 až +75°C
polymetakrylát, plexisklo, akrylát (PMMA)	A	A	A	-20 až +60°C
polykarbonát (PC)	A	A	A	-120 až +140°C
polyetylentereftalát (PETG)	A	A	A	až +80°C

Otevírání přední části skříně s rozměrem přesně 745 x 465 mm pomocí pantů bylo zamítnuto z těchto důvodů:

- ✓ **Panty nahore** – při otevření by přední kryt bránil přístupu k cívkám filamentu a byl by o ně opřen, složité zavádění filamentu.
- ✓ **Panty vlevo/vpravo** – v prostoru zabere otevření krytu velký prostor, v prostorách školy nebo učeben nebývá kolem vždy dostatek místa. 745 mm volný rádius před a vedle tiskárny navíc může být problém. Navíc hrozí nebezpečí vylomení pantů z polykarbonátu.
- ✓ **Posuvné mechanismy** nebyly v úvaze o moc vhodnější, pokud by byly směrem nahoru, stále by kryt bránil přístupu k cívkám filamentu a v případě posunu do strany by to znemožňovalo umístění tiskárny blíže než 740 mm k libovolné boční stěně nebo překážce.

Finálním řešením je **otevírání celého krytu** úplně volně, bez pevného spoje. To bylo realizováno samolepicí magnetickou páskou 3 cm šířky nalepenou po celém obvodu předního krytu. Jelikož je rám skříně hliníkový, musely být do drážek profilů přichyceny magnetické plechy.

¹ GUTTA - Original Store [online]. Dostupné z: [https://www.guttashop.cz/polystyrol-\(strukturovany\)-5-mm-.7908](https://www.guttashop.cz/polystyrol-(strukturovany)-5-mm-.7908)

Přístup k displeji a ovládacím prvkům je možný skrz otvor v předním krytu. Modul LCD displeje a ovládání je umístěn v krytu, který odděluje vnitřní prostor tiskárny tak, aby byl modul chlazen vnějším vzduchem.

Držák filamentu je hliníková trubka 30x3mm v celé šíři tiskárny a je dostatečně pevná, výška tyče nad horním rámem je více než 180 mm a je tím vhodná i pro větší cívky filamentu, včetně těch s hmotností 2 kg.

3.3. Úprava elektroniky a kabeláže

Umístění řídicí elektroniky tiskárny bylo navrženo s následujícími podmínkami:

- umožnit samovolné proudění chladného okolního vzduchu kolem základní desky Einsy-Rambo
- oddělit elektroniku od teplého prostředí vyhřívaného prostoru
- použít originální délky kabelů extruderu a nikde je nenastavovat, obzvláště v pohyblivých částech
- pokud možno nenastavovat ani kabely k tiskovým podložkám
- elektronika musí být součástí tiskárny a ne skříně, aby tiskárna i po vyjmutí z vyhřívaného prostoru stále fungovala a nemuselo se u tiskárny nic složitě odpojovat

Výše uvedeným podmínkám vyhovělo prakticky jen jedno místo, které se nachází vzadu uprostřed, za tiskovými podložkami, s vývody pro kabeláž extruderu nahoru, umístěné zhruba v polovině vertikálního i horizontálního rozmezí pohybu extruderu. Obrovskou předností je možnost použití standartních součástí, bez nutnosti dalšího zásahu do kabeláže a konektorů. Tzn., že při servisní údržbě nebo upgrade je bez problémů možné použít originální náhradní díly Prusa. Navržena byla také nová krabička s držákem a s dostatečným prostorem pro Einsy-Rambo i pro přídavný modul spínání druhé tiskové podložky.

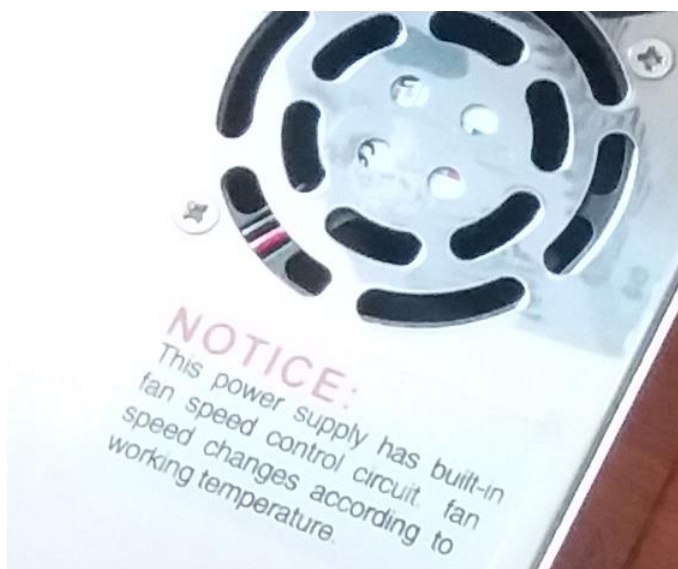
3.3.1. Napájecí zdroj

Parametry originálního zdroje jsou 24V 240W, v přípravě návrhu bylo provedeno měření odběru proudu vyhřívané tiskové podložky a celkového odběru tiskárny. Při porovnání naměřených hodnot s parametry originálního použitého zdroje bylo jasné, že nelze použít pouze jeden zdroj. Bylo nutné buď nahradit stávající zdroj jiným a výkonnějším, nebo přidat zdroj druhý.

Naměřená hodnota proudu tiskové podložky (vyhřívané desky) je 8,25A při 24V. Zahříváním stoupá její vnitřní odpor a po zahřátí je její odběr v sepnutém stavu kolem 7A. Má charakter odporové zátěže, takže její příkon je 198W v při pokojové teplotě.

Byla zvolena varianta přidat druhý 24V zdroj. Cena zdroje, který by se pohyboval ve výkonovém rozmezí kolem 500W je poměrně vysoká a zbyl by originální zdroj, který by nebyl využit. Navíc originální zdroj disponuje funkcí PowerPanic, která by v případě výměny zdroje za jiný byla obtížně nahraditelná.

Byl vybrán zdroj TLPZ-24-350. Tento zdroj má výstupní výkon 350W a obsahuje aktivní ventilátor. S ohledem na provoz v teplém prostředí, kdy je část zdroje orientována dovnitř uzavřeného vyhříváního prostoru, je to ideální volba, zdroj bude chlazen vnějším vzduchem a přispěje to k jeho delší životnosti. Nevýhodou je skutečnost, že ventilátor je zdrojem většího hluku.



Obrázek 5 - Ventilátor přídatného zdroje¹

Poznámka: Upozornění na řízení otáček v závislosti na teplotě se ukázalo jako nepravdivé, ventilátor mění své otáčky okamžitě při změně odběru zátěže, po zapojení vyhřívané tiskové podložky docházelo k nepříjemným akustickým změnám způsobovanými ventilátorem zdroje. Ke změnám docházelo okamžitě při změně PWM a nezáleželo na teplotě uvnitř zdroje, změny otáček ventilátoru byly velmi rychlé a změna teploty uvnitř zdroje nemohla probíhat tak rychle. Po provedené analýze vnitřního zapojení zdroje bylo zjištěno, že napájení ventilátoru je realizováno samostatným vinutím na hlavním vysokofrekvenčním transformátoru a následně je jen jednocestně usměrněno a bez stabilizace napětí. Díky tomu je na tomto vinutí

¹ Zdroj: Autor práce

rozdílné napětí, přímo úměrné zátěži zdroje. Každý spínaný zdroj mění pomocí zpětné vazby frekvenci střídavého napětí v primární části a tím reguluje a stabilizuje výstupní napětí. Proto vzniká přímá závislost rychlosti otáček ventilátoru. Tento nepříjemný efekt se podařilo odstranit přidáním dalšího kondenzátoru paralelně k výstupním svorkám zdroje. Zdroj pak nemusel okamžitě reagovat na rychlé změny odběru způsobené spínáním vyhřívané podložky a otáčky ventilátoru byly korigovány plynule.

Napájecí zdroje byly umístěny těsně vedle sebe a propojeny tak, že používají pouze jednu napájecí zásuvku s jedním kabelem. Druhý nový zdroj je opatřen vlastním vypínačem, který je v sérii s hlavním vypínačem originálního zdroje, díky tomu je možné celou tiskárnu zapínat a vypínat jedním primárním vypínačem, tzn., že druhý zdroj je pouze podružný. **Při tomto zapojení je možné tisknout pouze s jedním zdrojem a vyhřívat pouze jednu podložku** za předpokladu, že bude tištěný objekt umístěn pouze na ploše první (levé) podložky. Druhý zdroj neobsahoval kryt svorkovnice, proto byl navržen a vytištěn nový kryt s otvorem pro vypínač, kabely a úchytem.

Oba zdroje jsou pevně propojeny a jsou připevněny k hlavnímu rámu tiskárny, ale v nových otvorech. Ty jsou posunuty o 3 cm ve vodorovné ose směrem ven. Mřížkovaná větrací část tím zůstala mimo zakrytovanou část skříně. Není potřeba zdroje odpojovat při vyjmutí tiskárny z vyhřívaného prostoru skříně, tiskárna je samostatně funkční.

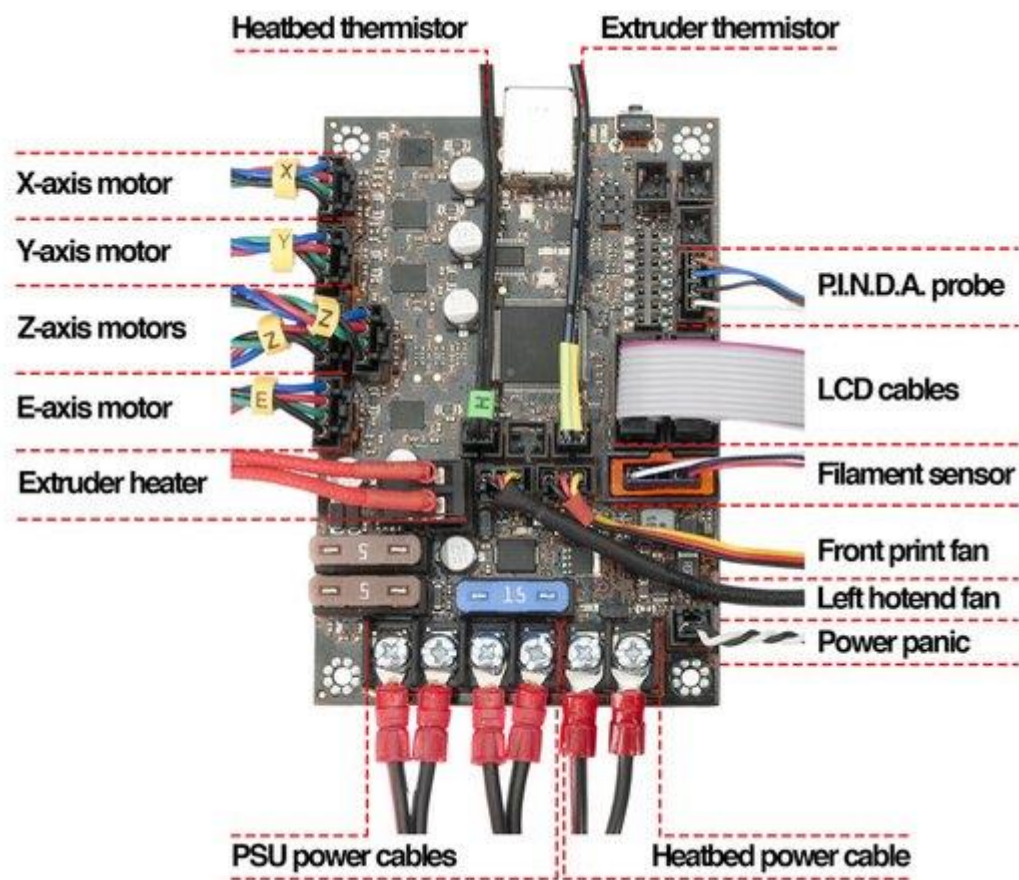
3.3.2. Spínání druhé tiskové podložky

Tiskárna Prusa i3 MK3 používá 8 bitovou základní desku, která je navržena přímo pro 3D tiskárny, hardware této desky je open source, takže všechny její použité součástky včetně schéma zapojení je přístupné na githubu [12], to značně usnadnilo následný návrh potřebných úprav, jejichž základním cílem bylo zajistit spínání druhé tiskové podložky a nezasahovat pokud možno do obvodů řídicí desky Einsy-Rambo. Možností bylo několik:

- Použít volný pin na desce pro spínání silové části druhé podložky
- Využít stávající silovou část a obě podložky spojit paralelně
- Vyvedení vývodu z Gate silového FETu pro další spínání
- Vytvořit samostatný modul pro spínání druhé podložky
- Vytvořit samostatný modul pro spínání obou podložek

Všechny konektory základní desky Einsy-Rambo jsou náležitě uzpůsobeny svému účelu (Obrázek 6), silová část a přívody napájení jsou dostatečně dimenzovány a osazeny masivní

svorkovnicí, vývody pro čidla teploty, krokové motory, ventilátory, LCD displej a topné těleso jsou opatřeny samostatnými konektory. Bohužel deska nedisponuje množstvím volných vývodů pro další použití.



Obrázek 6 - Typické zapojení desky Einsy-Rambo ¹

3.3.2.1. Varianta použití volného pinu na řídicí desce

Tento způsob by vyžadoval připojit nový modul elektroniky k základní desce EINSY-RAMBO a upravit firmware, zdálo se, že to bude nejvhodnější způsob, ovšem nakonec **nebyl zvolen**. Volných vývodů (pinů) na řídicí desce je omezený počet, použitím jen jediného pro spínání přídatného modulu pro druhou podložku by v budoucnu znemožnilo realizaci oficiálních rozšíření. Například již nyní je k dispozici MMU2S – (Multi Material Upgrade), umožňující tisk jednoho objektu z více materiálů, bez nutnosti zásahu obsluhy a automaticky přehazuje tiskové materiály během tisku. Předpokládá však volné výstupní piny pro ovládání elektroniky.

¹ 8. Elektronika - Prusa3D. *Prusa3D by Josef Prusa 3D Printers - Prusa3D* [online]. Dostupné z: <https://manual.prusa3d.com/Guide/8.+Elektronika/1085?lang=en>

Spínání vyhřívání používá PID regulaci s PWM, tato část je řízena pomocí hardwarového časovače a přerušení, které v přesně specifikovaných intervalech spouští obslužné části programu. V případě zásahu do firmware by to mohlo spustit „lavinový“ efekt nepředvídatelných událostí. Časovače a podprogramy spuštěné v době přerušení přímo ovlivňují rychlost komunikace tiskárny s okolím, rychlost USB přenosu, rychlost reakce atd. I sledování teploty tiskové podložky má vestavěno několik bezpečnostních funkcí, které by bylo v tomto případě nutné duplikovat. Jedná se o kontrolu dosažení teploty v daném časovém úseku, kontrolu funkčnosti čidla (termistoru) a podobně. Při každé potřebě změny firmware by bylo nutné tyto změny realizovat znovu a znovu vše důkladně otestovat.

3.3.2.2. Varianta využití pouze stávající silové části

Tento způsob spínání vyhřívání druhé tiskové podložky se zdá být nemožný, ovšem za určitých předpokladů by jej bylo možné realizovat a obě tiskové podložky spojit paralelně. Originální MOSFET tranzistor na řídicí desce, použitý ke spínání vyhřívání podložky, je dimenzovaný až na nepředstavitelný proud 100A. Teoreticky by tento tranzistor bez problémů mohl spínat obě vyhřívání desky paralelně, bylo by nutné vyměnit pouze pojistku 15A za 20A a pravděpodobně by to tranzistor vydržel. Vyžadovalo by to použití pouze jednoho napájecího zdroje. Toto bylo v rozporu s článkem 3.3.1. Zároveň to bylo riskantní a nebezpečné. Pokud zvážíme délku provozu tiskárny, je nežádoucí zatěžovat jakékoliv součástky, obzvláště polovodiče, mohlo by dojít k vážné havárii, proto toto řešení bylo nakonec **zamítnuto**.

3.3.2.3. Varianta vyvedení vývodu z Gate silového FETu pro další spínání

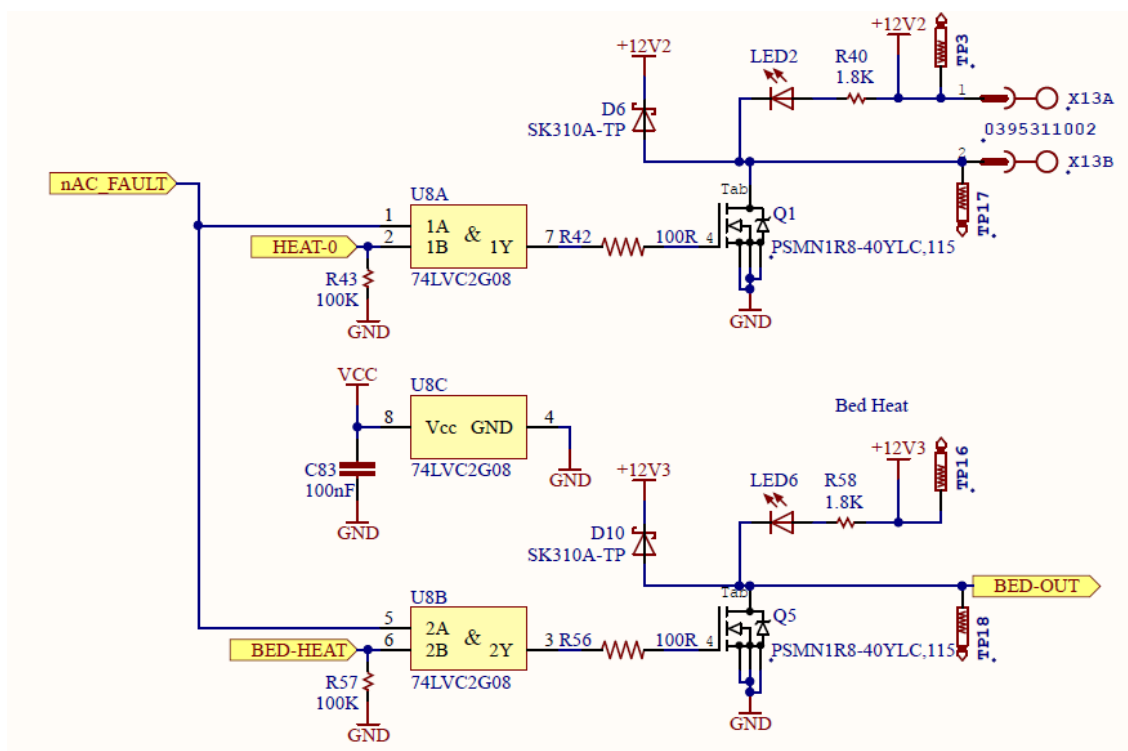
Toto řešení by pro spínání nového modulu vyhřívání tiskové podložky, používalo řídicí signál vyvedený z místa, kde je elektroda originálního MOSFET tranzistoru. Elegantní řešení, bez nutnosti zásahu do firmware, ale vzhledem k velikosti SMD součástek a prostoru na stávající desce v domácích podmínkách neproveditelné. Navíc by došlo k pájení na originální desce poměrně drahé elektroniky, porušení záruky a v případě poruchy by nebylo možné desku jednoduše vyměnit, musela by se opět upravit. Toto řešení bylo také **zamítnuto**.

3.3.2.4. Prototyp samostatného modulu pro spínání pouze druhé podložky

Po výběru vhodné varianty spínání druhé tiskové podložky, přešly práce do výroby prototypu samostatného hardwarového modulu spínání, který pro řídicí signál používá napětí na první vyhřívání tiskové podložce. Jakmile byla konstrukce mechanických částí tiskárny hotová, vytvořil jsem testovací modul pro spínání druhé podložky. Referenčním a řídicím bodem pro spínání tohoto modulu byl přímo silový vývod Einsy-Rambo desky. Silová část obvodů

používá napájení 24V, není proto možné přímo použít toto napětí pro spínání dalšího FET tranzistoru. Vlastností těchto typů tranzistorů použitých pro spínání je to, že řídicí elektroda se chová jako kondenzátor. Pro správné sepnutí tranzistoru je nutné dodat do elektrody poměrně velký náboj v co možném nejkratším čase. Po sepnutí není nutné, aby elektrodou dále tekla další proud. Pro rozepnutí tranzistoru se musí tento náboj zase odvést pryč, nejlépe vyrovnat potenciál s vývodem tranzistoru S (Source). Řídicí napětí vyvedené ze svorkovnice vývodu pro vyhřívanou tiskovou podložku má energie pro sepnutí dalšího tranzistoru dostatek, avšak jsou s tím spojené dva problémy. První je, že signál je invertovaný. Druhý je, že prakticky všechny unipolární tranzistory mají maximální povolené napětí (V_{GS}) na řídicí elektrodě 20V. Toto napětí je však opravdu maximální, v praxi se používá v rozmezí 10 V až 12 V.

Inverze signálu řídicího napětí je způsobena běžným zapojením, kdy je zátěž (vyhřívaná tisková podložka) trvale připojena na kladné napětí (+) a je spínán záporný vývod zátěže k zápornému pólu zdroje (GND).



Obrázek 7 - Schéma části řídicí desky Einsky-Rambo¹

¹ GitHub - ultimachine/Einsky-Rambo. *The world's leading software development platform · GitHub* [online]. Copyright © 2019 GitHub, Inc. [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <https://github.com/ultimachine/Einsky-Rambo>

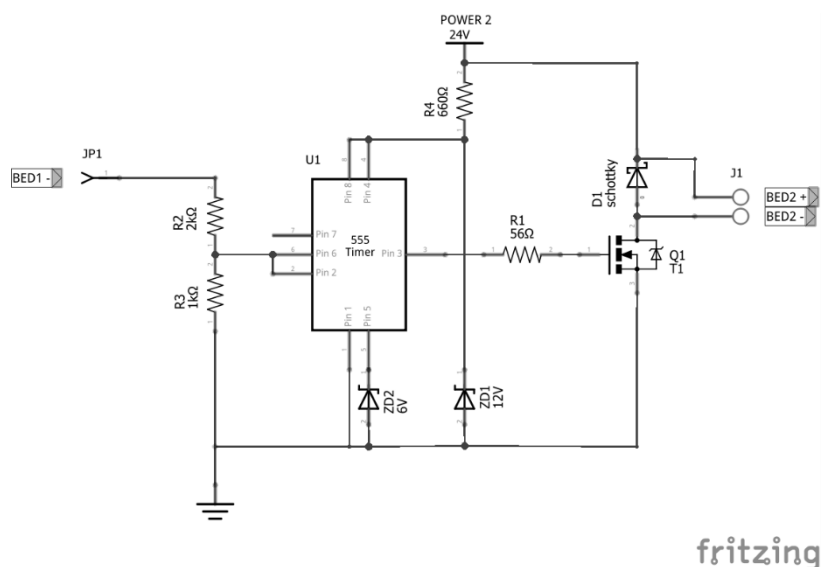
Obrázek 7 je převzat z originální dokumentace, která ve výkresech používá 12V napájení, označuje napájecí větev (+12V2) nebo (+12V3), v případě tiskárny Prusa i3 MK3 je použito 24V napájení. Deska je konstruována tak, že je možné ji napájet jak 12V tak 24V. Tranzistor (Q5) je propojen na (GND) a spíná svorku (BED-OUT), která je záporná. Svorka (BED+OUT) na tomto obrázku chybí, na ní je připojena větev (12V3), která je detailněji rozkreslena v elektrickém schématu Einsy-Rambo na straně 2, který je součástí elektronické přílohy. Důležitou součástí je budič FET, který je v tomto případě zajištěn AND hradlem s vysokým výstupním proudem, dostatečným pro rychlé nabití hradla výkonového tranzistoru. Toto hradlo zároveň zajišťuje okamžité vypnutí výkonových částí v případě výpadku napájení (nAC_FAULT). V kondenzátorech zdroje pak ještě zůstane dostatek energie pro napájení procesoru a provedení přizvednutí tiskové hlavy a uložení poslední tisknuté pozice. Toto je součástí vlastnosti PowerPanic.

V průběhu návrhu bylo zvažováno několik možností, jak upravit vstupní řídicí signál do modulu a jak jej invertovat. Pomocí odporového děliče bylo sníženo vstupní napětí na 7V. Nejvhodnější a cenově zajímavé řešení bylo použít obvod NE555. Tento obvod, v zapojení komparátoru s invertovaným výkonovým výstupem byl ideální kandidát. Široký rozsah napájení umožňuje zvolit výstupní napětí do řídicí elektrody FETu v ideální oblasti kolem 10 až 12 voltů. Pomocí Zenerovy diody (ZD1) a odporu bylo realizováno napájení 12V pro tento obvod, referenční napětí komparátoru je pomocí diody ZD2.

V tomto zapojení je nutné, aby napětí na vstupu (JP1) přesáhlo napětí rozhodovací úrovně, to je přibližně polovina napětí Zenerovy diody ZD2 aby došlo k překlopení klopného obvodu. Pro překlopení zpět je potřeba snížit vstupní napětí na polovinu rozhodovací úrovně. Tento jev je skvělý pro odfiltrování případných zákmitů v silové části původního zapojení první vyhřívané podložky. Výstup na pinu 3 má ideální obdélníkové hrany, náběžné hrany jsou extrémně rychlé a na osciloskopu téměř kolmé. To je důležité pro optimální spínání FET tranzistoru. Obvod NE555 má povolené proudové zatížení až 200 mA a to je dostatečné pro rychlé nabití řídicí elektrody a rychlé sepnutí tranzistoru. Pokud by napětí na řídicí elektrodě vlivem nedostatečné schopnosti řídicího signálu dodat potřebné množství energie v krátkém čase, stoupalo by její napětí pomalu a tranzistor by po tuto dobu pracoval v lineárním režimu a značně by se přehříval. Následující obrázek znázorňuje schéma výše popsaného zapojení. Toto schéma bylo vytvořeno v programu fritzing¹, který jednoduše a rychle umožňuje

¹ FRITZING, Friends. *Fritzing*. Dostupné také z: <https://fritzing.org/home/>

prototypování a zároveň i návrh zapojení na nepájivém kontaktním poli nebo návrh plošného spoje. Program je volně k dispozici pro různé platformy, Linux, Windows i MacOS. [13]



Obrázek 8 - Schéma prototypu modulu pro spínání druhé vyhřívané podložky¹

Při realizaci tohoto zapojení bylo zjištěno několik problémů: v použitém typu tranzistoru MOSFET, zpětné elektromagnetické indukce, problematiky spínané frekvence PWM a optočlenů, popis problémů se nachází níže

Problém tranzistoru. Výkonový tranzistor ze skladových zásob, který jsem pro tento prototyp modulu použil, se nadměrně zahříval. Jeho parametry byly:

- Pouzdro TO220
- Maximální proud $I_{DS} = 40A$
- Maximální napětí $I_{GS} = 40V$

Přestože jeho konstrukce byla výkonově předimenzována a byl v pouzdru TO220 s malým chladičem, jakmile skončila fáze topení s trvalým sepnutím a začala pracovat PWM regulace, nedala se na tranzistoru po pár minutách provozu udržet ruka. Následným měřením pomocí osciloskopu bylo zjištěno, že spínání není prováděno v běžných frekvencích PWM, ale s frekvencí 62,5 kHz. Tato frekvence je maximální možná, kterou je možné použitým 8-bit procesorem ATMEGA realizovat. Při této frekvenci velmi záleží na kvalitě vstupního signálu, strmosti náběžné hrany a množství energie dodané do řídicí elektrody FET tranzistoru.

Tranzistor jsem poté vyměnil za nový, snažil jsem se najít podobný tomu, který je použit na originální desce Einsy-Rambo. Jen v provedení s normálními vývody a ne SMD, aby bylo

¹ Zdroj: Autor práce

jednoduše možné realizovat celý obvod na univerzální desce plošných spojů a vše zapájet do desky a nahradit tím prototypové zapojení na nepájivém kontaktním poli. Výběr nebyl jednoduchý, protože délka jednoho pulzu začíná kolem 4 μ s, doba mezi jednotlivými pulzy (perioda) je 16 μ s

Je to dáno vzorcem $f = 1 / T$, kde $1 / 62500 \text{ Hz} = 0,000016 \text{ s}$. Běžně se používají frekvence do 25 kHz, 62,5 kHz není běžný standart. Jedním z parametrů tranzistoru je doba náběhu (rise time) a doba vypnutí (fall time). Běžné tranzistory mají tyto doby kolem 100 a 200 ns. Pokud budeme uvažovat náběh a vypnutí, musíme oba časy sečíst. Během této doby pracuje tranzistor v lineárním režimu (hřeje se). Protože je těchto náběžných hran 62500 za vteřinu, pak nám vychází $62500 * 0,0000003 \text{ s} = 0,0185 \text{ s}$. V lineárním režimu pracuje tranzistor jen po započtení svých konstrukčních vlastností 1,85 % svého času. Ve skutečnosti je třeba ještě započítat náběžné a sestupné hrany vzniklé na budiči FET a úbytek napětí na ochranném odporu mezi budičem a řídicí elektrodou. Z měření pomocí osciloskopu je součet náběžné a sestupné hrany přibližně 600 ns. To už dává celkem 3,7 % času v lineárním režimu. Při spínaném výkonu kolem 200 W to znamená 3,7 W vyzářeného tepelného výkonu v lineární oblasti. Křivky náběžných hran jsou přibližně lineární a vyzářená energie odpovídá přibližně polovině této hodnoty. Samozřejmě je třeba započítat ještě ztráty v sepnutém stavu, které jsou dány úbytkem napětí na vnitřním odporu v závislosti na protékajícím proudu. $P = R \cdot I^2 \text{ [W]} = 0,008 * 8,25 = 0,54 \text{ W}$. Tato hodnota je teoretická pro trvalé sepnutí, kdy je tranzistor sepnut 100% času. Při PWM regulaci je k hodnotě lineárního ztrátového výkonu započtena poměrná část odpovídající skutečné době plně otevřeného tranzistoru.

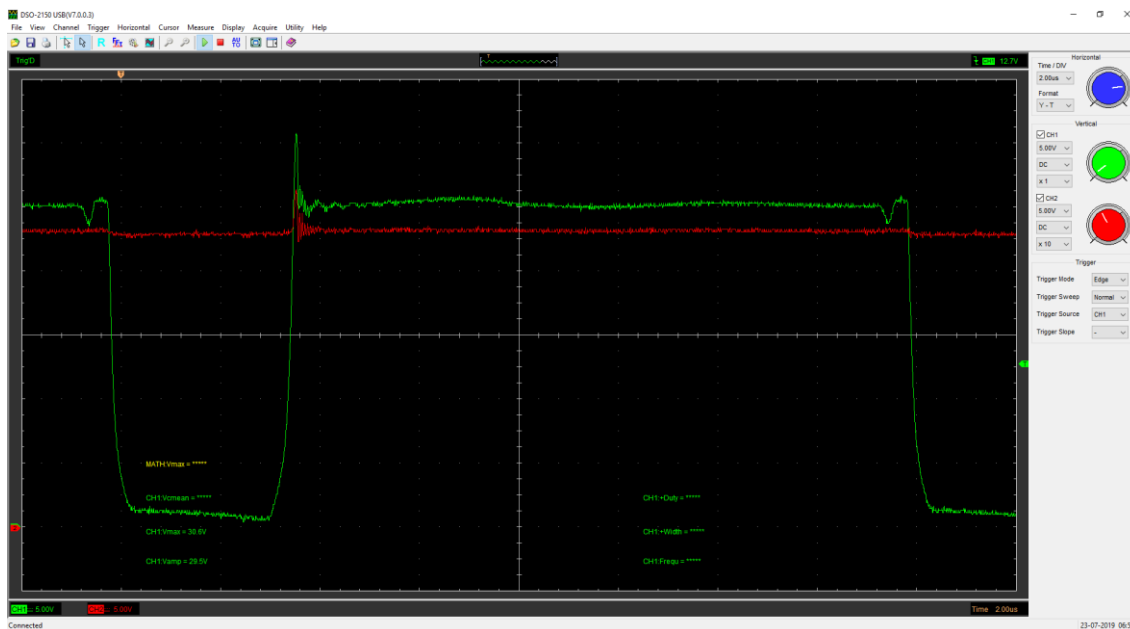
Z uvedené analýzy je zřejmé, že oblast lineárního režimu zatěžuje tranzistor mnohem více, než trvalé sepnutí. Změnou frekvence PWM regulace lze zásadně ovlivnit celkový ztrátový výkon a tím i teplotu tranzistoru.

Byl vybrán tranzistor MOS-N-FET 55V/ 110A/ 200W/ $r_{ds} = 0,008 \text{ Ohm}$. TO220, s cenou kolem 30 Kč.¹ Tento tranzistor fungoval o poznání lépe, přesto musel být tranzistor připevněn k hliníkovému žebrovanému chladiči o rozměrech 10 x 4 cm. Osciloskopem bylo dále kontrolováno chování celého zapojení.

Problém překmitu napětí způsobený elektromagnetickou indukcí nastával při každém rozepnutí tranzistoru, přestože byla zapojena Schottky dioda v závěrném směru paralelně k zátěži. Výměna několika Schottky diod za jiné typy měnila křivky výstupního napětí jen

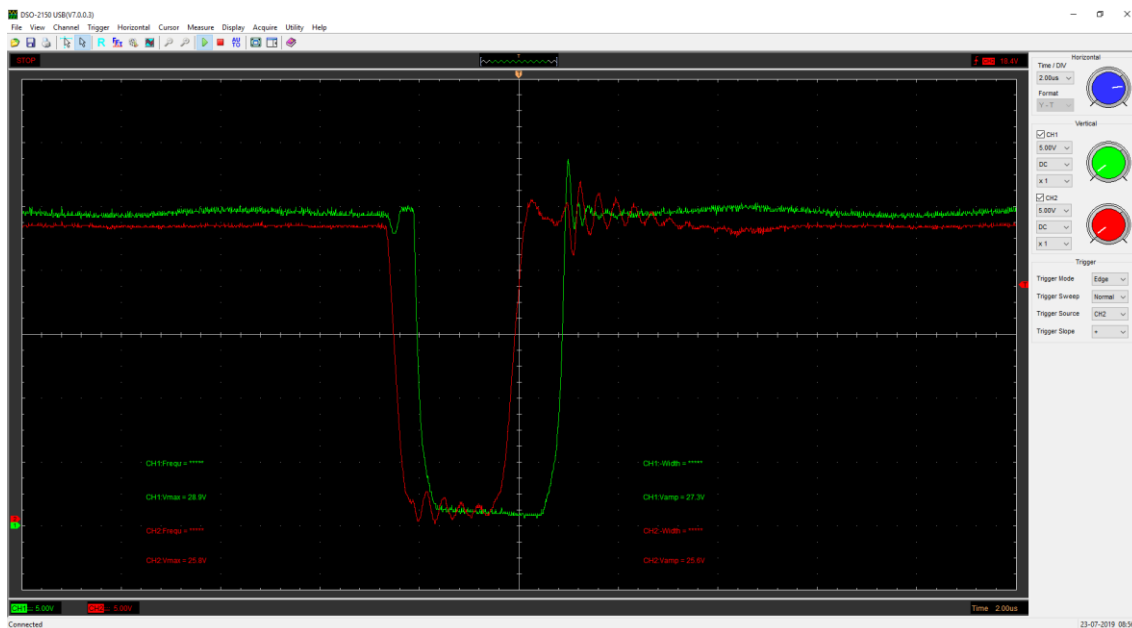
¹ [online]. Dostupné z: <http://www.ges.cz>

minimálně a nebylo možné dosáhnout srovnatelných hodnot naměřených na svorkovnici originální desky Einsy-Rambo. Viz následující Obrázek 9, červeně je vykresleno napájecí napětí, zeleně napětí na zátěži. Z obrázku jsou patrné zákmity při vypnutí tranzistoru, které se přenášejí i do napájecí části.



Obrázek 9 - Průběh napětí při spínání testovacího modulu a výstupní napětí zdroje

Zákmity v napájecí části ovlivňovaly naměřené hodnoty i na primárním zdroji a následně se všechny hodnoty navzájem zkreslovaly. Pokud probíhalo měření pouze na jedné zátěži při odpojené druhé, byly hodnoty v pořádku, tak jak by měly být. Jenže při zapojení dvou zdrojů a dvou zátěží docházelo k interferencím a nebylo prakticky možné určit příčinu problému. Buď byly napěťové zákmity na první podložce, nebo na druhé, podle toho, kde jsem zrovna připojil osciloskop.



Obrázek 10 - Napětí obou tiskových podložek – zelená je z testovacího modulu¹

Protože se jednalo o prototyp desky, byly propojovací vodiče delší a jejich délka ovlivňovala celou sestavu, fungovaly jako antény a vysílače. Bylo nutné celé zapojení přepracovat. Všechny tyto problémy vedly k návrhu oddělení řídicího signálu mezi Einsy-Rambo deskou a modulem pro spínání druhé podložky pomocí optočlenu.

Problematika optočlenů a spínané frekvence. Obrázek 10 ukazuje, že jednotlivé impulzy jsou navzájem časově posunuty, to problém není, ale i kdyby se povedlo zabránit nežádoucím zákmitům, tak rozdíl v době sepnutí se u nich vzájemně liší o téměř deset procent, a to je problém veliký. Protože se mají podložky spínat stejně a není u nich možné regulovat teplotu pro každou zvlášť, nesmí být do každé podložky dodáno jiné množství energie. A rozdíl deset procent je v tomto případě nepřijatelný. Proto byl další vývoj na tomto prototypu zastaven a **modul nebyl použit.**

3.3.2.5. Finální varianta samostatného modulu pro spínání obou podložek

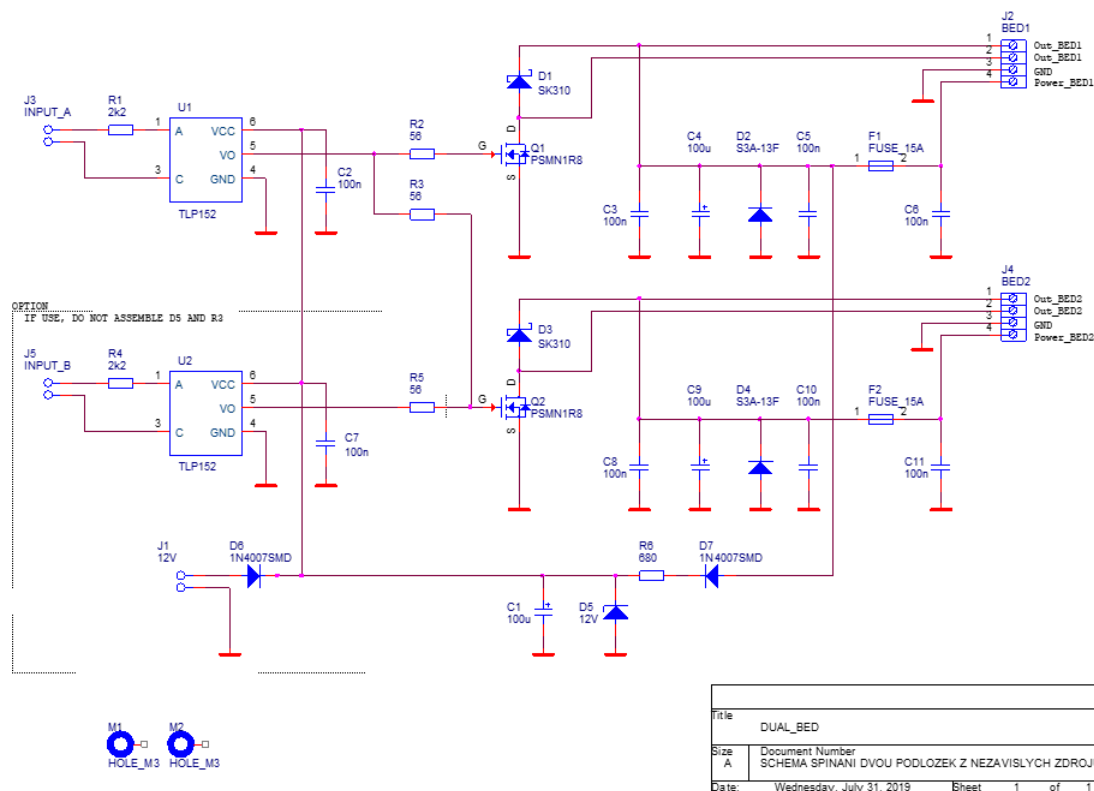
Z předchozího vývoje konstrukce a testování prvního prototypu bylo stanoveno několik klíčových vlastností, které musí splňovat potřebný modul:

- Oddělení řídicího signálu od základní desky Einsy-Rambo pomocí optočlenu
- Spínání dvou FET tranzistorů současně - nedojde k zpoždění a rozdílným délkám spínacích pulzů do každé vyhřívané podložky, řídicí signál bude jeden a oba tranzistory budou shodné

¹ Zdroj: Autor práce

- Každý tranzistor bude mít silovou část napájenou z vlastního zdroje
- Zdroje budou mít společný nulový potenciál s možností úplného oddělení
- Napětí do řídicí elektrody FET tranzistorů bude univerzální a to 12V
- Použijí se pokud možno součástky, které jsou na originální řídicí desce Einsy-Rambo, včetně odrušení a filtrace napájecí části. Odpadne tím problém s výběrem vhodných výkonových součástek
- Protože se jedná o SMD součástky, rovnou se navrhne a vytvoří deska s plošnými spoji a osadí se svorkovnicí a nožovými pojistkami.
- Plošný spoj se navrhne pro případné ovládání dvěma samostatnými řídicími signály, pro dva budiče a dva optočleny, ale pokud to nebude potřeba, nebude se tato část osazovat
- Plošný spoj se navrhne pro možnost externího napájení 12V pro případ, že by nevyhovovalo napájení pomocí Zenerovy diody

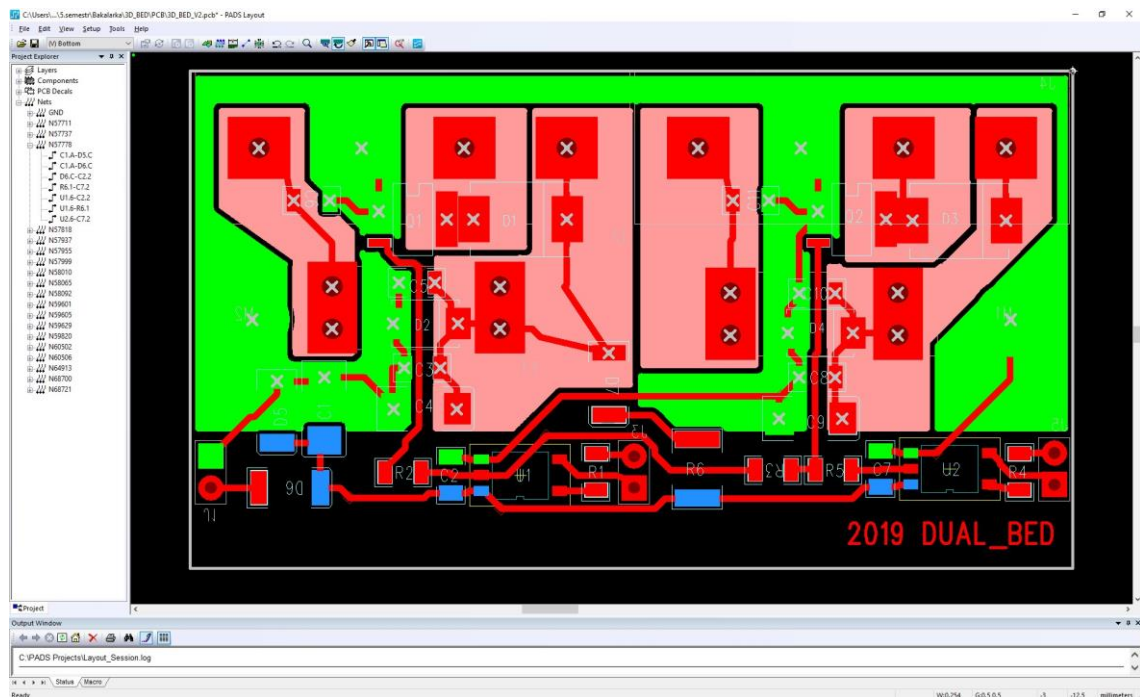
Klíčovou součástkou je výběr optočlenu. Protože optočlen je možné zapojit přímo do svorek, kde je normálně připojena první vyhřívaná podložka, odpadá problém s inverzí řídicího signálu. Je možné použít standartní budič FET tranzistorů, který je pro tento účel navržen. Firma Toshiba vyrábí součástky, které integrují optočlen a budič FET do jednoho pouzdra, na trhu je ale aktuálně k dispozici pouze jedna, která splňuje potřebné parametry napájecího napětí a frekvenci spínání, je to **TLP152** v SMD provedení. Při návrhu jsem vycházel z katalogového zapojení a hodnot v něm uvedených. Tento katalogový list je součástí elektronické přílohy. Další klíčovou součástkou jsou dva N-FET tranzistory **NEXPERIA PSMN1R8-40YLC**. Jak již bylo zmíněno, jsou to přesně stejné součástky jako na základní desce Einsy-Rambo. Vnitřní odpor tranzistoru v sepnutém stavu mezi vývody Source a Drain je 1,8 mΩ a maximální proud 100A, špičkový pulzní proud je dokonce 1128 A, což je až neuvěřitelné vzhledem k velikosti pouzdra 5 x 6,2 mm.



Obrázek 11 - Schéma modulu paralelního spínání dvou tiskových podložek¹

Návrh a vytvoření schéma napájení byl vytvořen v demoverzi profesionálního programu OrCAD a návrh plošného spoje pak v programu PADS. V návrhu jsou záměrně velké měděné plochy pro odvod tepla, z důvodů co nejkratších vývodů jsou tranzistory umístěny co nejbližší vývodům svorkovnice a masivní svorkovnice zároveň pomáhá odvodu ztrátového tepla. Protože se jedná o jednostranný plošný spoj, bylo nutné z důvodu křížení spojů upravit pořadí vývodů na svorkovnici a je jiné, než je na originální desce Einsy-Rambo. Pořadí vývodů je (+)(-)(-)(+) pro každý kanál. Z pohledu svorkovnice je jejich pořadí PWR1+,PWR1-,BED1-,BED1+ a PWR2+,PWR2-,BED2-,BED2+. Elektrolytické kondenzátory v provedení SMD by zbytečně zvětšovaly modul ze strany spojů a SMD součástek a komplikovaly celé uspořádání, proto jsou použity klasické axiální kondenzátory s drátovými vývody. Pojistky a svorkovnice jsou poměrně masivní a musí být osazeny z druhé strany než SMD součástky, aby je bylo možné vůbec připájet. Tím nevznikne problém s vyčnívajícími kondenzátory, protože ty jsou převyšovány robustní svorkovnicí a pojistkami.

¹ Zdroj: Autor práce



Obrázek 12 - Návrh plošného spoje v programu PADS Layout¹

Samotná výroba plošného spoje byla provedena v domácích podmínkách v následujících krocích:

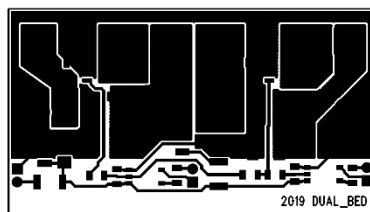
- Vyčištěná a odmaštěná deska pro plošný spoj byla nalakována UV fotocitlivým lakem.
- Vytisknutí černobílé matrice plošného spoje na laserové tiskárně na průhlednou fólii
- Přiložení matrice na destičku a zafixování izolepou
- Osvit zhruba 15 minut stolní lampičkou s UV zářivkou
- Umytí exponovaných částí laku v tekoucí vodě
- Vyleptání plošného spoje v roztoku hydroxidu železitého

Po osazení a prvním proměření bylo nutné jeden tranzistor přepájet, neboť při pájení došlo k propojení jeho vývodů s ploškou pro odvod tepla a silová část byla trvale propojená. To je bohužel problém pájení SMD součástek v domácích podmínkách. Nicméně i tak se povedlo celý problém vyřešit. Pro nápravu bylo nutné celý tranzistor odpájet, očistit pájené plošky od přebytků cínu a připájet jej znovu. Je tedy nutné naprosto přesně osadit tranzistory a před připojením ke zdrojům napájení nejprve důkladně proměřit všechny části obvodu, jestli není někde zkrat. Zde je potřeba podotknout, že v tomto zapojení **není k Einsy-Rambo desce připojená žádná tisková podložka**, místo ní je připojen pouze optočlen nového modulu pomocí pinu J1. Silová část obou vyhřívaných podložek je připojena k tomuto novému modulu.

¹ Zdroj: Autor práce

Při oživování už nebyl detekován problém, měření osciloskopem potvrdilo správnost celého zapojení, napěťové průběhy spínaných impulsů v obou tiskových podložkách byly správné, bez překmitů a zvlnění. Provedl jsem i měření zdroje 12V tvořené Zenerovou diodou D5 a na elektrolytickém kondenzátoru C1 nedocházelo při spínání k žádným poklesům napětí. Tak jsem zkusil ještě zvětšit odpor R5 abych snížil proud protékající touto Zenerovou diodou. Po této úpravě se již projevoval mírný pokles napětí při spínání PWM, proto jsem od této úpravy upustil a nechal R5 dle původních propočtů. Protože odvod tepla od Zenerovy diody i po několikahodinovém provozu nepředstavuje žádný problém, byla napájecí část budiče akceptována a nemuselo se řešit variantní napájení z externího regulátoru 12V, se kterým bylo v návrhu desky plošného spoje počítáno. Piny pro tento přívod napájení (J1) nebyly z tohoto důvodu osazeny, stejně tak nejsou osazeny součástky R5, C7, U2, D6, R4, J5 a místo diody D7 je propojka.

Černobílá maska pro tisk na transparentní fólii je součástí elektronické přílohy ve formátu pdf, kde jsou dodrženy velikosti potřebné pro tisk. Stejně tak je součástí přílohy i rozmístění jednotlivých součástek.



Obrázek 13 - Osvitová maska pro výrobu plošného spoje¹

Celý modul byl dle očekávání funkční a bylo provedeno několik testů, při kterých byla kontrolována hlavně teplota součástek a napěťové průběhy v napájecí a výstupní části. Tranzistory použité v tomto zapojení mají mnohem lepší parametry než původní, které byly použity v prvním prototypovém modulu (článek 3.3.2.4) a ztrátový vyzařovaný tepelný výkon je o dost menší. Bohužel se tranzistory stále zahřívaly, dle mých zkušeností více než je běžná teplota ostatních součástek v jiných zařízeních s podobným typem spínání. Zahřívání nebylo kritické, ale nebyl jsem spokojen, i když modul pracoval správně. Přesto bylo ještě provedeno porovnání s teplotou originálního FET tranzistoru na řídicí desce Einsy-Rambo a překvapivě bylo zjištěno, že se tento tranzistor také zahřívá a to tak, že po přiložení špičky malíčku doslova pálí. Přesné měření teploty takto malého SMD tranzistoru nebylo provedeno žádnou exaktní metodou, protože takové měření vyžaduje miniaturní čidlo dobře spojené s tranzistorem. Vhodnější k tomuto měření by byla například termokamera. Vyhodnocením předešlé situace

¹ Zdroj: Autor práce

s nepřiměřenou teplotou výkonových tranzistorů bylo rozhodnuto, že **problém zahřívání tranzistorů je třeba řešit na softwarové úrovni, pomocí úpravy firmware** a snížit frekvenci PWM regulace, nebo ji úplně vypnout a používat klasické spínání ON/OFF s delšími časovými úseky.

3.4. Firmware

Použitý firmware v této tiskárně je upravená verze Marlin. Tento firmware poprvé vytvořil v roce 2011 pro RepRap a Ultimaker Erik van der Zalm. Dnes Marlin řídí většinu světových 3D tiskáren. Je to OpenSource projekt a je dále udržován komunitou nadšenců. Jeho zdrojové kódy jsou k dispozici na githubu. [14] Tiskárna Prusa i3 MK3 z tohoto firmware vychází a má vlastní repositář zdrojových kódů taktéž dostupný na githubu. [15] Stejně jako u předchozích částí projektu, byly i pro firmware definovány klíčové vlastnosti:

- Zvětšení maximálních limitních hodnot tiskové plochy v ose X
- Automatická kalibrace první vrstvy sondou P.I.N.D.A i v rozšířené ploše (Mesh Bed Leveling)
- Zobrazení teploty druhé tiskové podložky na displeji
- Zobrazení teploty druhé tiskové podložky do stavových informací na terminálovém výstupu pro další využití
- Zachování všech současných funkcí tiskárny

Úpravám firmware předcházela analýza stávajícího zdrojového kódu a rozhodnutí o výběru platformy, na které bude prováděna kompilace. Rozhodnuto bylo provádět kompilaci z prostředí Linux, jelikož Windows verze a Arduino IDE neumožňuje například vložit jazykové verze do zkompilovaného firmware. První úpravy pro první prototyp začaly s verzí Prusa-Firmware-MK3_3.6.0-RC1 již v únoru v roce 2019. Potřebné úpravy byly úspěšně realizovány a tiskárna byla funkční, firmware byl tak považován za dokončenou část. V září 2019 bylo rozhodnuto, z důvodu nadměrného zahřívání tranzistorů, se opět provede zásah do firmware. Jenže v té době již byla k dispozici o několik verzí novější verze. Při čtení změn, oprav a nových funkcí v mezitím vydaných verzích bylo mimo jiné zjištěno, že došlo k úpravě firmware z důvodu možného nadměrného zahřívání základní desky, podrobněji nic dalšího specifikováno nebylo, přesto to byl další pozitivní argument, který vedl k rozhodnutí opět přepracovat firmware. Následující popis změn se váže na verzi firmware **3.8.0-RC2**, která byla v době řešení problémů s přehříváním tranzistorů nejaktuálnější.

Kompletní firmware před úpravou a upravená verze souborů je součástí pouze elektronické přílohy. V následujících kapitolách budou zdrojové soubory identifikovány stylem **název souboru:číslo řádky** nebo **řádků**, kde začala úprava. Přehled změn je blíže specifikován v příloze C.

3.4.1. Úprava konfiguračního souboru tiskárny

Výběr tiskárny a definice pro potřebný model jsou v podadresáři C:\Firmware\Prusa-Firmware-MK3\Firmware\variants

V tomto adresáři jsou soubory pro všechny modely Prusa tiskáren. Je možné smazat nepotřebné soubory a nechat tam pouze jeden, `1_75mm_MK3-EINSy10a-E3Dv6full.h` a přejmenovat jej na `1_75mm_MK3-EINSy10a-E3Dv6full_BIG.h`. Urychlí to následně kompilaci, protože nebude možné vybrat jiný typ tiskárny než tento jediný.

Změny obecného charakteru provedené v souboru **Configuration.h:74**

```
#define STRING_CONFIG_H_AUTHOR "(Karel Beranek, prf.jcu.cz)" // Who
made the changes.
```

3.4.2. Zvětšení maximálních limitních hodnot tiskové plochy v ose X

Firmware tiskárny obsahuje pevně zadané hodnoty rozměru tiskové plochy, kalibračních bodů a limity pro posun v jednotlivých osách. Protože byla tiskárna zvětšena o 254 mm, byla z důvodu přehlednosti definována přímo ve zdrojovém kódu pod názvem `DUAL_BED`. Další konstanta navíc je `KABE_SECOND_THERMISTOR`, která slouží pro rozhodování, které části kódu budou zkompileovány. Jestli ty originální nebo ty upravené.

1_75mm_MK3-EINSy10a-E3Dv6full_BIG.h

```
// kabe rozmer o ktery je rozsirena cela tiskarna v ose X
#define DUAL_BED_X 254.f
#define X_MAX_POS (255 + DUAL_BED_X) //509
#define MESH_MAX_X (228 + DUAL_BED_X) //482
```

3.4.3. Automatická kalibrace první vrstvy (Mesh Bed Leveling)

Tato kalibrace je prováděna před každým tiskem a spočívá v měření vzdálenosti tiskové hlavy od tiskové podložky pomocí indukční sondy. Měření se provádí v devíti referenčních bodech,

rozmístěných v matici 3 x 3 body. Od verze prvního prototypu došlo k zásadní změně ve funkčnosti a tím i ve zdrojovém kódu. Místo fixního měření 3 x 3 body je možné v menu tiskárny zvolit i měření v matici 7 x 7 bodů. Navíc je možné zvolit počet měření provedených v každém bodu. Pro větší tiskovou plochu je tato změna velmi důležitá.

Mesh_bed_calibration.h:12

```
#define BED_Xn (206.f - BED_ZERO_REF_X + DUAL_BED_X - 10.f) //205
```

Mesh_bed_calibration.cpp:82

```
245.f - BED_PRINT_ZERO_REF_X - X_PROBE_OFFSET_FROM_EXTRUDER -  
SHEET_PRINT_ZERO_REF_X + DUAL_BED_X,  
245.f - BED_PRINT_ZERO_REF_X - X_PROBE_OFFSET_FROM_EXTRUDER -  
SHEET_PRINT_ZERO_REF_X + DUAL_BED_X,
```

1_75mm_MK3-EINSy10a-E3Dv6full_BIG.h:417

```
#define MESH_MAX_X (228 + DUAL_BED_X) //482
```

3.4.4. Zobrazení teploty druhé tiskové podložky

Zapojení termistoru druhé tiskové podložky do nevyužitého a volného konektoru na řídicí desce Einsy-Rambo vyžadovalo změnu firmware. Z důvodu minimalizace úprav bylo využito již vestavěných částí programu, které jsou při překladu kompilovány, pouze pokud je hardware vybaven druhým extruderem. Protože druhý extruder ve skutečnosti tiskárna nemá, ale má pouze druhý termistor, musela být tato vlastnost zohledněna při překladu a některé části kódu pro druhý extruder se nesmí kompilovat. Výsledkem je zpřístupnění čtení druhého termistoru funkcemi řízenými hardwarovým přerušením s ukládáním jejich hodnot do paměti v pravidelných časových intervalech a následný přepoččet analogové hodnoty na stupně Celsia. Pomocí definice KABE_SECOND_THERMISTOR a následně podmínek překladu došlo k možnosti kompilovat novou verzi firmware a přitom ponechat i původní verzi, takže je možné upravenou verzi těchto zdrojových kódu používat pro všechny verze standartních tiskáren.

Změna spočívala v posunu stávajících hodnot aktuální a cílové teploty jak extruderu, tak podložky o tři znaky vpravo. Tím došlo k maximálnímu zaplnění volného místa a přitom čitelnosti. Teplota první podložky je vlevo od symbolu H a teplota druhé podložky je vpravo.

Obrázek 14 - Původní a nové uspořádání údajů LCD displeje^{1 2}

Zde nejsou uvedeny kompletní změny kódu, protože by to zbytečně prodloužilo celkový text této práce. Níže je uveden příklad změny a způsob podmínek překladu. Dále uvádím už jen jména modifikovaných souborů a začátky řádek, na kterých začíná změna. Kompletní zdrojové kódy jsou součástí elektronické přílohy.

1_75mm_MK3-EINSy10a-E3Dv6full_BIG.h:10

```
// kabe pridano pro mereni druhého termistoru
#define KABE_SECOND_THERMISTOR
```

Configuration.h:103

```
// kabe uprava na pocet termistoru, nahrazuje v urcitych pripadech
hodnotu EXTRUDERS
#ifdef KABE_SECOND_THERMISTOR
    // kabe nova hodnota EXTRUDERS_TEMP nahrazuje EXTRUDERS
    #define EXTRUDERS_TEMP 2
#else
    #define EXTRUDERS_TEMP 1
#endif
```

temperature.h:50-57

temperature.cpp:55, 918, 1043, 1643

Marlin_main.cpp:5934, 5943

ultralcd.cpp:559, 567, 896, 900, 908

¹ Příručky pro nové uživatele MK3 - Prusa Research s.r.o. – 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši. *Prusa3D - 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši* [online]. Copyright © Prusa Research s.r.o., [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/novy-uzivatel-mk3/>

² Zdroj: Autor práce

3.4.5. Zobrazení teploty druhé podložky v příkazu M105

Tiskárna může být propojena s počítačem přes USB kabel nebo sériový port. Ten se chová jako terminál, pomocí kterého je možné tiskárnu ovládat, tisknout nebo jen číst různé informace o stavu. Toto se děje pomocí příkazů zvaných G-code. Jedním z příkazů pro čtení informací je příkaz M105 na který tiskárna zareaguje odpovědí:

```
ok T:23.5 /0.0 B:21.2 /0.0 T0:23.5 /0.0 @:0 B@:0 P:26.7 A:28.5
```

nově je formát takto:

```
ok T:23.5 /0.0 B:21.2 /0.0 T0:23.5 /0.0 T1:21.2 /0.0 @:0 B@:0 P:26.7  
A:28.5
```

Nová úprava přidala údaj o teplotě ve stejném formátu, ale tváří se, jako kdyby to byla teplota druhé tiskové hlavy (T1). Jsem si vědom toho, že tato úprava může být zavádějící, protože to není teplota tiskové hlavy ale podložky. Výhodou této úpravy je kompatibilita s jinými verzemi software, které tento příkaz používají a není potřeba upravovat externí software, stačí pouze změnit nastavení. Konkrétně je to vyzkoušeno s programem Octoprit, který bude popsán dále v kapitole 3.5.

Marlin_main.cpp:5934

```
// kabe Zobrazení teploty druhe podlozky v prikazu M105 (pro Octoprint  
jako teplota druheho extruderu)  
#ifndef KABE_SECOND_THERMISTOR  
    SERIAL_PROTOCOLPGM(" T");  
    SERIAL_PROTOCOL(1);  
    SERIAL_PROTOCOLPGM(":");  
    SERIAL_PROTOCOL_F(degHotend(1), 1);  
    SERIAL_PROTOCOLPGM(" /");  
    SERIAL_PROTOCOL_F(degTargetBed(), 1);  
#endif  
// kabe end KABE_SECOND_THERMISTOR
```

3.4.6. Úprava spínání vyhřívané podložky

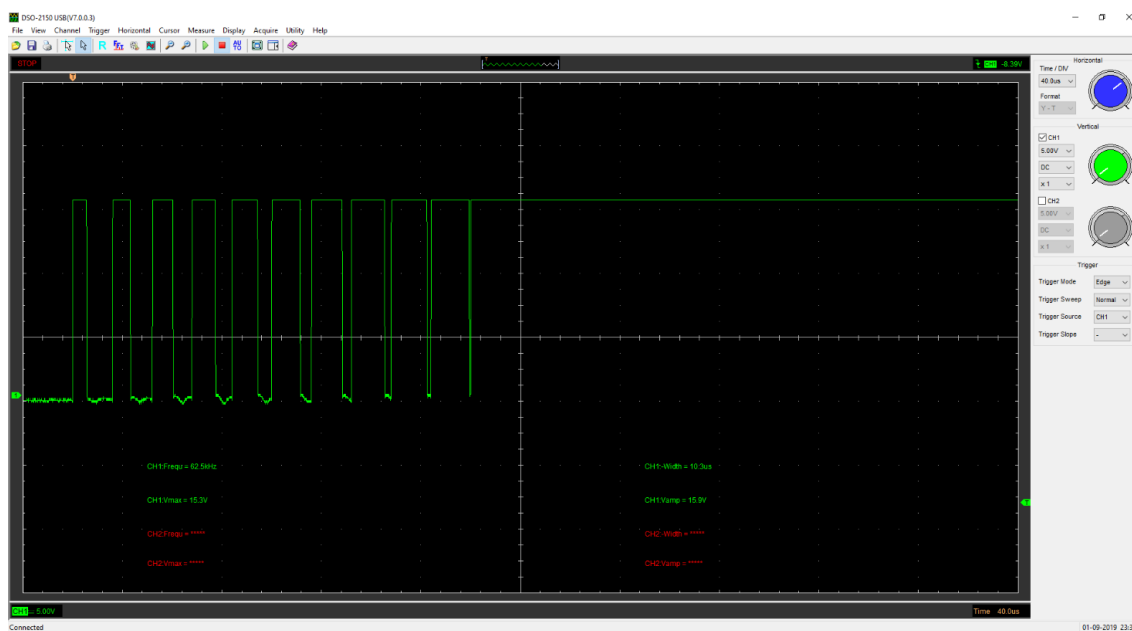
Během testování této verze firmware bylo zjištěno, že se již výkonové tranzistory pro spínání obou tiskových podložek vůbec nehřejí. Osciloskopem bylo změřeno, že došlo k zásadní změně v režimu spínání a to tak, že PWM režim je použit pouze před plným sepnutím

tranzistoru a po jeho vypnutí, není prováděn po celou dobu sepnutí. Trvalé sepnutí je v delších časových intervalech a nedochází k popsanému nežádoucímu efektu zahřívání v náběžných a sestupných hranách velkého množství spínaných pulzů.

Před trvalým sepnutím je provedeno 16 pulzů, od minimální délky až po maximum, to je trvalé sepnutí. V trvalém sepnutí je pak tranzistor udržován delší časový úsek. Rozepnutí je obrácené, z trvalého sepnutí je proveden daný počet impulsů se zmenšující se délkou až do minima. Počet provedených impulsů je definován v souboru *heatbed_pwm.cpp* konstantou:

```
static const uint8_t fastMax = 16;
```

Hodnota, udávající jejich počet, může být změněna, ale 16 je kompromis mezi slyšitelností a zahříváním tranzistoru. Z popisu vyplývá, že menší hodnota impulsů pak sice šetří tranzistor, je však více zatěžován zdroj, protože jsou pro něho náběžné hrany moc ostré. V důsledku toho pak může ve zdroji cvakat, nebo se může ozývat i cvakání z vyhřívané podložky, která funguje částečně jako reproduktor. Vysoká frekvence PWM byla použita proto, že je mimo slyšitelnou oblast lidského sluchu a je 62,5 kHz, tzn. že osoby pohybující se v okolí tiskárny nemusejí poslouchat nepříjemné zvuky.



Obrázek 15 - Detail průběhu napětí náběžné hrany při spínání MOSFET¹

¹ Zdroj: Autor práce

3.5. Sledování a dohled

Pro svou velikost, nízkou cenu a dostatečný výkon, byl k tiskárně připojen jednočipový počítač Raspberry Pi 3B s operačním systémem Raspbian. Dále byl nainstalován program OctoPrint. Je to volně šiřitelný a OpenSource projekt. Jeho prostřednictvím je možné na tiskárnu tisknout, ovládat jí, ale i sledovat její provozní hodnoty. Aby bylo možné sledovat aktuální stavy teploty obou tiskových podložek, je nutné provést úpravu ve změně počtu tiskových hlav v nastavení profilu tiskárny. Vzhledem k ostatním provedeným úpravám uvádím seznam potřebných nastavení, které je nutné provést za předpokladu, že je tam již předem nadefinovaný profil tiskárny Prus i3 MK3.

OctoPrint Settings -> Printer Profiles -> Edit Profile

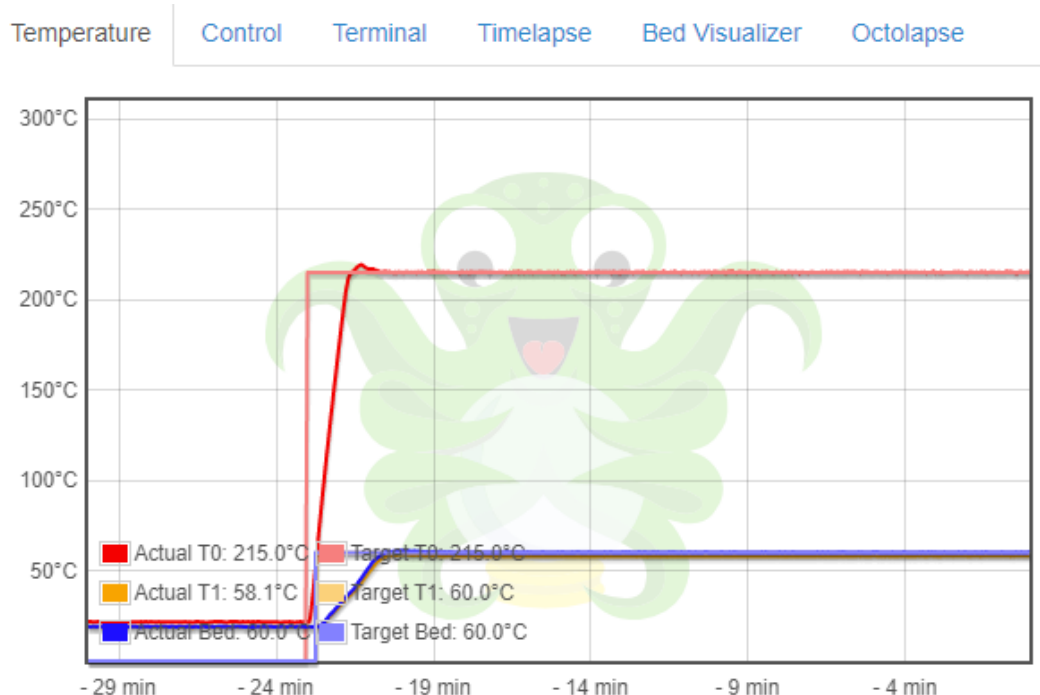
Print bed & build volume -> Width (x) = 504 mm

Hotend & extruder -> Nozzle Diameter = 0,6 mm

Hotend & extruder -> Number of Extruders = 2

Hotend & extruder -> Shared nozzle = no

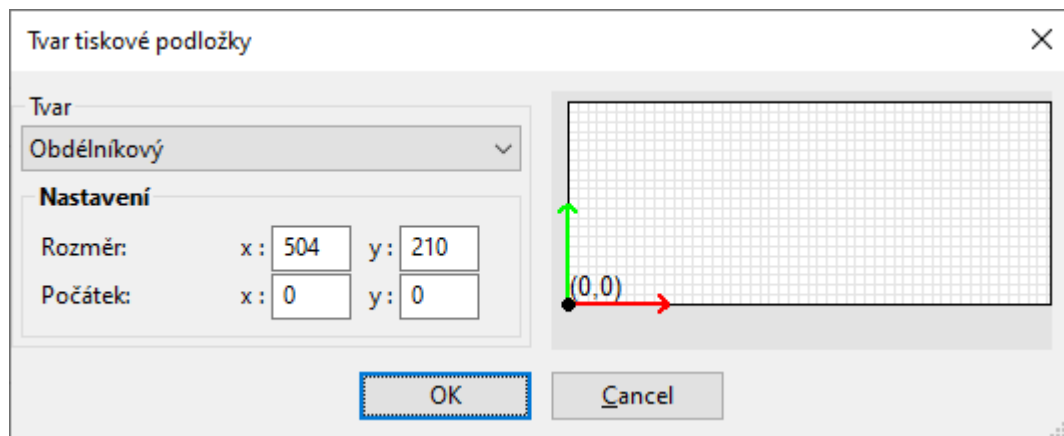
Hotend & extruder -> Offset T1, X = 0, Y = 0



Obrázek 16 - Graf sledování teploty v programu OctoPrint

3.6. Software

Vytvoření G-code (slicování) a tisk na modifikované tiskárně probíhá standartním způsobem např. v programu PrusaSlicer. Je však nutné změnit velikost tiskové podložky ve vlastnostech tiskárny, a samozřejmě i vybrat správný profil pro průměr trysky 0,6 mm.



Obrázek 17 - Nastavení velikosti plochy tiskárny v programu PrusaSlicer

3.7. Testování a provoz

Testování tiskárny a elektronických částí probíhalo během jednotlivých fází vývoje, aby se v případě problémů, mohly okamžitě provést případné změny. Po sestavení a zprovoznění prototypu byly nové potřebné díly tištěny jen na něm. Tisk maximálních rozměrů byl otestován pomocí tisku testovací mřížky, která potvrdila správnou funkci automatické kalibrace první vrstvy a ohýbání kabelů v maximálních výchylkách pohybů jednotlivých os. Osciloskopem byly kontrolovány výstupní napěťové charakteristiky spínání obou vyhřívaných podložek a byla kontrolována teplota elektroniky během dlouho trvajících tiskových úloh.

Ve finálním provedení bylo přibližně do středu vnitřku skříně umístěno čidlo digitálního teploměru. Pomocí kamery a Octoprintu byly vytvářeny časosběrná videa, které byly následně vyhodnoceny. Teplota uvnitř skříně, při teplotě tiskové podložky 110°C, tzn. pro tisk ABS, se v průběhu tisku zvyšovala a ustálila se na teplotě zhruba o 25°C větší než okolní teplota. Tisk z materiálu ABS-T¹ byl proveden na modelu rozloženém přes obě tiskové podložky. Objekt se neodlepil ani nepopraskal, rozměrově byl v pořádku a nedošlo k jeho deformaci.

¹ Filament 1,75 ABS-T - transparentní 1 kg | Plasty Mladeč. *Tiskové struny do 3D tiskáren* | Plasty Mladeč [online]. Copyright © 2019 Plasty Mladeč [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/filament-1-75-abs-t-transparentni-1-kg/p17>

4. Závěr

Výsledkem práce je zhotovení funkčního prototypu modifikované 3D tiskárny Prusa i3 MK3 s rozšířenou tiskovou plochou a uzavřeným prostorem, který je schopen běžného provozu. Před vlastní prací bylo nutné nejdříve nashromáždit všechny potřebné informace k 3D tiskárnám a seznámit se obecnou problematikou tisku, s praktickým provozem a funkcemi tiskárny, získat tak přehled o mechanice jednotlivých částí a jejich problémech, které se nejčastěji u 3D tiskáren vyskytují, blíže prozkoumat software a firmware těchto tiskáren, který je nutný k jejich provozu. Získané informace jsem na jedné straně využil v teoretické části, kde jsem popsal rozdíly mezi FFF tiskárnami vzhledem k jejich konstrukčnímu provedení a na straně druhé je použil k vytvoření návrhu konceptu nového prototypu 3D tiskárny. Cesta od návrhu konceptu k vytvoření nového prototypu je však dlouhá, bylo nutné zde vymyslet, ověřit a následně vybrat vhodné technické řešení, které by splňovalo požadavky a podmínky stanovené prací. Realizaci konceptu jsem začal vytvořením 3D modelu prototypu včetně modelů potřebných součástí a výkresů. Následovaly práce spojené s vytvořením funkčního samostatného elektronického modulu pro spínání druhé tiskové podložky, která je stěžejní částí této práce, všechny informace k modulu včetně jeho funkcí jsem podrobně popsal, a zdokumentoval tak celý výrobní postup, včetně měření, testování a všech jeho problémů, které se v průběhu vývoje vyskytly. Upravil jsem firmware tiskárny, aby zůstaly zachovány všechny původní funkce, ty jsem následně ještě rozšířil o zobrazení teploty druhé tiskové podložky na LCD displeji, včetně přenosu její hodnoty do externího software. V závěru jsem zkontroloval, zdali byly splněny všechny podmínky a cíle stanovené prací u nového prototypu, ověřil jsem funkčnost tiskárny a skříně v provozu a dlouhodobě analyzoval teplotu prostředí uvnitř během tisku. Na základě výsledného měření a zkušebního provozu mohu konstatovat, že předloženou prací a i s vytvořením funkčního prototypu byly všechny stanové cíle a podmínky splněny..

5. Seznam zkratek, slovníček pojmů

3D	Třírozměrný (3 Dimensional)
Filament	Materiál pro tisk, obecně pevný ale může být i prášek, granule, nebo tekutý
Struna	Materiál pro tisk v podobě tenké struny, též filament
Objekt	Tištěný výrobek, model, předmět
HotEnd	Tisková hlava
HotBed	Tisková podložka (vyhřívána)
Extruder	Komplet tiskové hlavy a podávání filamentu
FET	Polem řízený tranzistor – obecný (Field Effect Transistor)
MOSFET	Polem řízený tranzistor s konkrétní výrobní technologií (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
SMD	Součástka pro povrchovou montáž plošných spojů (Surface Mount Device)
PWM	Pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
PID	Proporcionálně integračně derivační regulace
Firmware	Program pro procesory bez operačního systému
Einsy-Rambo	Řídící deska pro 3D tiskárny
RepRap	první projekt open-source 3D tiskárny
ABS	Druh plastu (Akrylonitrilbutadienstyren)
PET	Druh plastu (Polyethylen)
PLA	Druh plastu (Polylactic acid)
FDM	Technologie 3D tisku (Fused Deposition Modeling)
FFF	Technologie 3D tisku (Fused Filament Fabrication)
SLA	Technologie 3D tisku (Stereolithography)
SLS	Technologie 3D tisku (Selective Laser Sintering)
DLP	Technologie 3D tisku (Digital Light Processing)
G-code	Příkaz pro ovládání tiskárny

6. Reference

- [1] 3D tisk. *Wikipedie* [online]. 2019 [cit. 2019]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk
- [2] *SLA 3D Printing: Difference in Laser and DLP Light Pattern Generation*. 2019. Dostupné také z: <https://www.kudo3d.com/sla-3d-printing-difference-in-laser-and-dlp-light-generation/>
- [3] PRŮŠA, Josef. *Představujeme Original Prusa SL1 – novou open-source SLA 3D tiskárnu*. b.r. Dostupné také z: <https://josefprusa.cz/original-prusa-sl1-nova-sla-3d-tiskarna/>
- [4] *Introduction: SLA and SLS technologies*. b.r. Dostupné také z: <https://www.sculpteo.com/blog/2019/08/07/3d-printing-technology-sla-vs-sls/>
- [5] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
- [6] *OnShape*. b.r. Dostupné také z: <https://www.onshape.com/sign-up>
- [7] *Prusa3D / Original-Prusa-i3 parts*. b.r. Dostupné také z: <https://github.com/prusa3d/Original-Prusa-i3/tree/MK3>
- [8] *ALQAL*. b.r. Dostupné také z: <http://hlinik.cz/alqal#>
- [9] *Tvarové řezání vodním paprskem*. b.r. Dostupné také z: <http://hlinik.cz/tvarove-rezani#seznam-produktu>
- [10] PRŮŠA, Josef. *Dva měsíce po uvedení Original Prusa i3 MK3*. b.r. Dostupné také z: <https://josefprusa.cz/dva-mesice-po-uvedeni-original-prusa-i3-mk3/>
- [11] PRŮŠA, Josef. *Vše o tryskách s různým průměrem*. b.r. Dostupné také z: <https://josefprusa.cz/vse-o-tryskach-s-ruznym-prumerem/>
- [12] ULTIMACHINE, . *Einsy-Rambo*. b.r. Dostupné také z: <https://github.com/ultimachine/Einsy-Rambo>
- [13] FRITZING, Friends. *Fritzing*. b.r. Dostupné také z: <https://fritzing.org/home/>
- [14] *Marlin Firmware*. b.r. Dostupné také z: <http://marlinfw.org/>

[15] *Prusa3D / Prusa-Firmware*. b.r. Dostupné také z: <https://github.com/prusa3d/Prusa-Firmware/tree/MK3>

7. Seznam obrázků

Obrázek 1 - 3D model tiskárny	18
Obrázek 2 - Části rámu tiskárny vyřiznuté vodním paprskem	20
Obrázek 3 - Detail místa pro usazení lineárního ložiska pojezdu podložky	21
Obrázek 4 - Tisk lampy a porovnání délky tisku	24
Obrázek 5 - Ventilátor přídavného zdroje	27
Obrázek 6 - Typické zapojení desky Einsy-Rambo	29
Obrázek 7 - Schéma části řídicí desky Einsy-Rambo.....	31
Obrázek 8 - Schéma prototypu modulu pro spínání druhé vyhřívané podložky	33
Obrázek 9 - Průběh napětí při spínání testovacího modulu a výstupní napětí zdroje	35
Obrázek 10 - Napětí obou tiskových podložek – zelená je z testovacího modulu	36
Obrázek 11 - Schéma modulu paralelního spínání dvou tiskových podložek.....	38
Obrázek 12 - Návrh plošného spoje v programu PADS Layout.....	39
Obrázek 13 - Osvětová maska pro výrobu plošného spoje	40
Obrázek 14 - Původní a nové uspořádání údajů LCD displeje	44
Obrázek 15 - Detail průběhu napětí náběžné hrany při spínání MOSFET	46
Obrázek 16 - Graf sledování teploty v programu OctoPrint	47
Obrázek 17 - Nastavení velikosti plochy tiskárny v programu PrusaSlicer	48
Obrázek 18 - Finální prototyp "Prusa i3 MK3 Dual Bed" během tisku	58
Obrázek 19 - Spojení hliníkových profilů pomocí mosazné hmoždinky	58
Obrázek 20 - Fotografie finální modifikované 3D tiskárny "Prusa i3 MK3 Dual Bed"	59

8. Seznam tabulek

Tabulka 1 - Přehled koeficientu lineární délkové roztažnosti vybraných materiálů	15
Tabulka 2 - Vlastnosti materiálů čirých desek pro zakrytování skříně.....	25

9. Přílohy

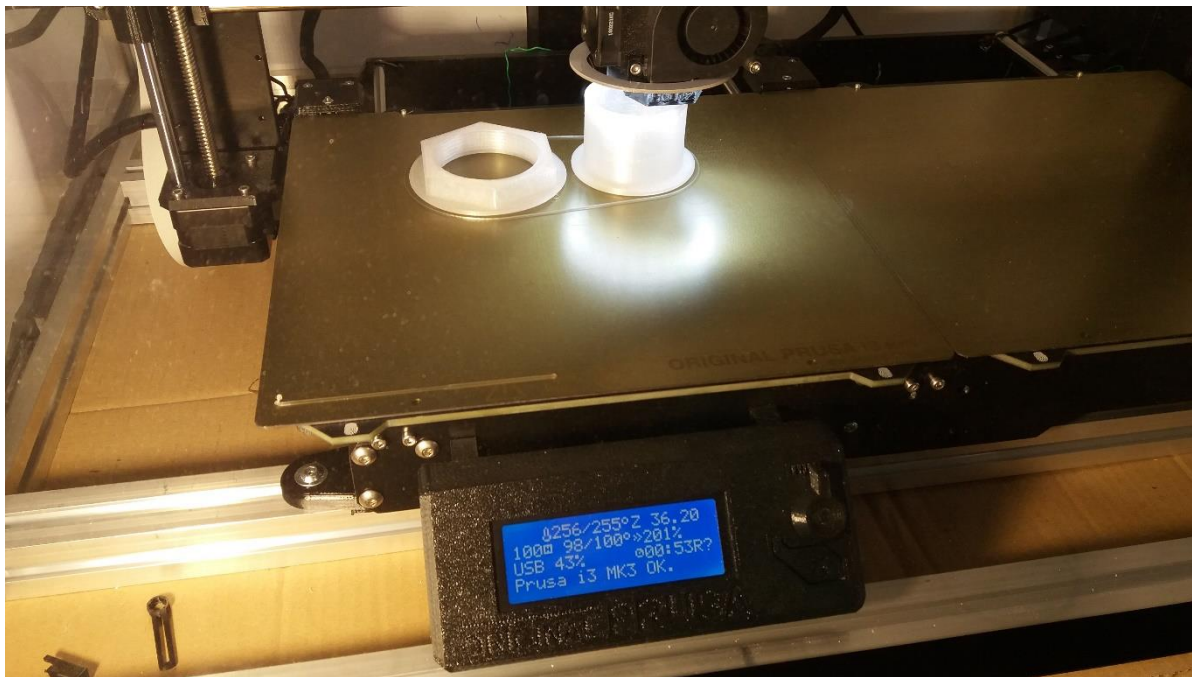
Seznam příloh:

- A) Soubory obsažené na přiloženém CD
- B) Obrázky
- C) Seznam změn ve zdrojových souborech firmware

Příloha A - Soubory obsažené na přiloženém CD

```
E:\Elektronika\PCB DUAL BED Parts.pdf
E:\Elektronika\PCB DUAL BED.pdf
E:\Elektronika\PSMN1R8-40YLC.pdf
E:\Elektronika\Schema Einsy Rambo.PDF
E:\Elektronika\TLP152.pdf
E:\Firmware\Příprava prostředí pro komplilaci firmware Prusa i3 MK3.pdf
E:\Firmware\Modified\config.h
E:\Firmware\Modified\Configuration.h
E:\Firmware\Modified\Marlin_main.cpp
E:\Firmware\Modified\mesh_bed_calibration.cpp
E:\Firmware\Modified\mesh_bed_calibration.h
E:\Firmware\Modified\temperature.cpp
E:\Firmware\Modified\temperature.h
E:\Firmware\Modified\ultralcd.cpp
E:\Firmware\Modified\variants\1_75mm_MK3-EINSy10a-E3Dv6full_BIG.h
E:\Firmware\Original\Prusa-Firmware-MK3 (3.8.0-RC2).zip
E:\TisteneDily\Civka filamentu - Matice civky filamentu.stl
E:\TisteneDily\Civka filamentu - Trubka do civky filamentu.stl
E:\TisteneDily\Drzak kamery.stl
E:\TisteneDily\Drzak trubky civek.stl
E:\TisteneDily\Hmozdinka pro matice M3 v drazce.stl
E:\TisteneDily\Kryt druhého zdroje.stl
E:\TisteneDily\Kryt LCD.stl
E:\TisteneDily\Mrizka testovací 504x210.stl
E:\TisteneDily\Uchyt nozicek.stl
E:\TisteneDily\Vymezovací krouzek do trubky.stl
E:\TisteneDily\ZadniDrzakEinsy - Bocni vyvod 1.stl
E:\TisteneDily\ZadniDrzakEinsy - Bocni vyvod 2.stl
E:\TisteneDily\ZadniDrzakEinsy - Drzak rohovy pro krabicku Einsy board.stl
E:\TisteneDily\ZadniDrzakEinsy - Horni vyvod kabelaze.stl
E:\TisteneDily\ZadniDrzakEinsy - Krabicka pro Einsy board.stl
E:\TisteneDily\ZadniDrzakEinsy - Objimka bocniho vyvodu 1.stl
E:\TisteneDily\ZadniDrzakEinsy - Objimka bocniho vyvodu 2.stl
E:\TisteneDily\ZadniDrzakEinsy - Objimka kabelove pruchodky k hotendu.stl
```

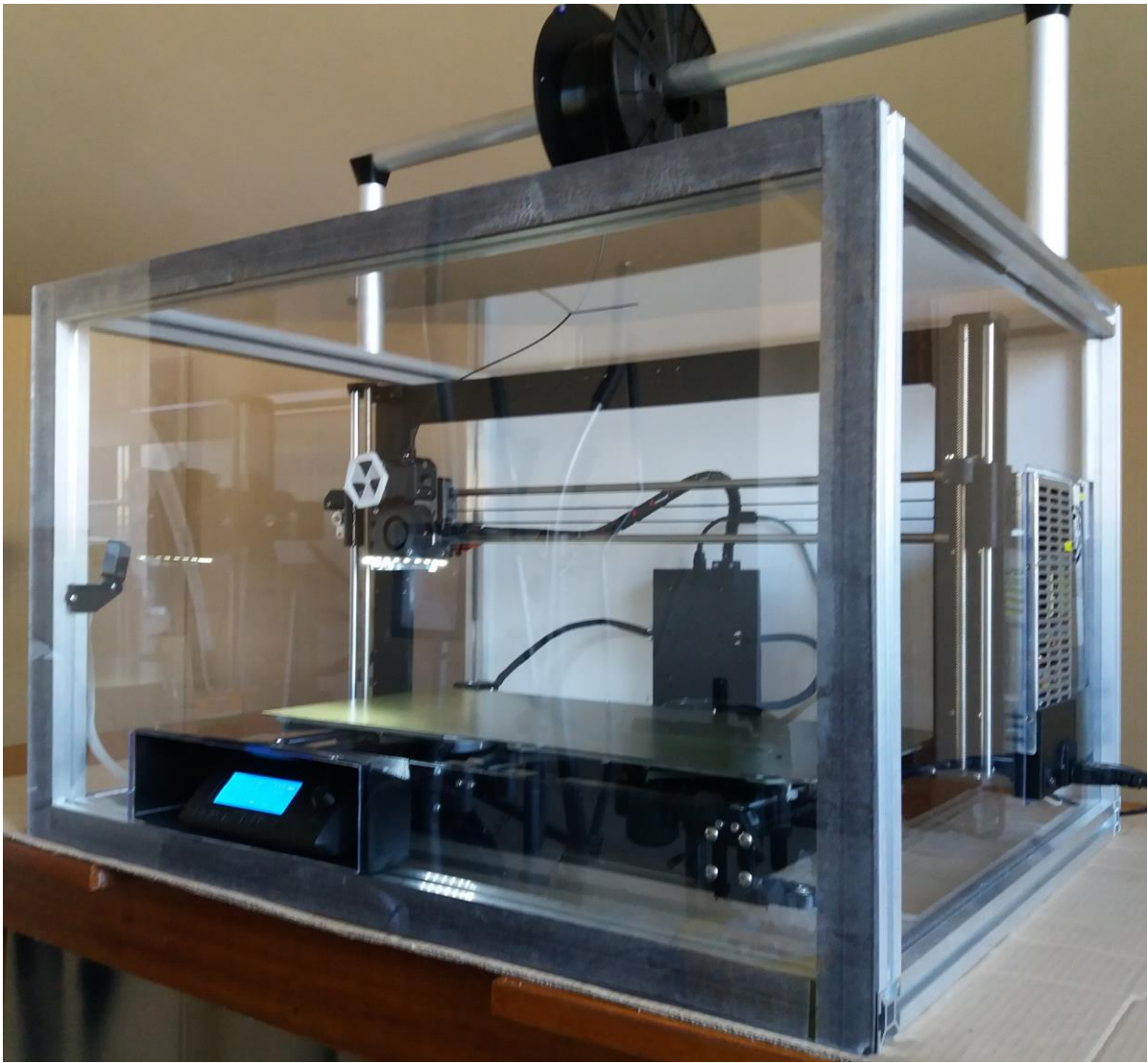
Příloha B – Obrázky



Obrázek 18 - Finální prototyp "Prusa i3 MK3 Dual Bed" během tisku



Obrázek 19 - Spojení hliníkových profilů pomocí mosazné hmoždinky



Obrázek 20 - Fotografie finální modifikované 3D tiskárny "Prusa i3 MK3 Dual Bed"

Příloha C - Seznam změn ve zdrojových souborech firmware

E:\Firmware\Modified\Configuration.h

```
Line 73: // uprava jmena autora zmen firmware
Line 103: // uprava na pocet termistoru, nahrazuje v urcitych
pripadech hodnotu EXTRUDERS
Line 105: // nova hodnota EXTRUDERS_TEMP nahrazuje EXTRUDERS
Line 154: // odermovano SLOW_PWM_HEATERS a byly tam chyby v
prekladu....
```

E:\Firmware\Modified\Marlin_main.cpp

```
Line 5934: // Zobrazeni teploty druhe podlozky v prikazu M105
(pro Octoprint jako teplota druheho extruderu)
Line 5943: // end KABE_SECOND_THERMISTOR
```

E:\Firmware\Modified\mesh_bed_calibration.cpp (1 hit)

```
Line 77: // upraveny hodnoty X pro rohy rozmeru kalibracni
plochy - umistení magnetu
```

E:\Firmware\Modified\mesh_bed_calibration.h

```
Line 11: // uprava rozmeru pro mesh bed leveling v ose x BED_Xn
(206.f - BED_ZERO_REF_X)
```

E:\Firmware\Modified\temperature.cpp

```
Line 55: // uprava velikosti pole pro dva termistory
Line 918: // uprava pro mereni teploty EXTRUDERS_TEMP
Line 1043: // uprava pro druhy termistor
Line 1643: // read termistor - uprava cteni skutecne hodnoty
druheho termistoru a ulozeni do pole
Line 1645: // read termistor - konec
```

E:\Firmware\Modified\temperature.h

```
Line 50: // deklarace pole teplot se spravnym poctem (zameneno
EXTRUDERS za EXTRUDERS_TEMP)
Line 57: // end deklarace pole teplot
```

E:\Firmware\Modified\ultralcd.cpp

```
Line 559: // - nova funkce tisk teploty hotend na lcd - pridany
mezery pred text
Line 567: // - nova funkce tisk teploty dual bed - pridany
mezery pred text a obe teploty v jedne radce
Line 896: // pridana funkce s tremi mezerami na zacatku, aby
byly zarovnane symboly a lomitka hotendu a hotbedu
Line 900: // zruseni tisku mezery
Line 908: // Zobrazeni teploty obou podložek
```

E:\Firmware\Modified\variants\1_75mm_MK3-EINSy10a-E3Dv6full_BIG.h

```
Line 10: // pridano pro mereni druheho termistoru
Line 12: // rozmer o ktery je rozsirena cela tiskarna v ose X
Line 70: // upraveno X_MAX_POS 255+254
Line 416: // upraveno MESH_MAX_X 228+254
```