



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH TEMPEROVANÉHO STOLU PRO FDM 3D TISKÁRNU S VYUŽITÍM SIMULACE MKP

DESIGN OF HEATED PRINT BED FOR FDM 3D PRINTER WITH FEM
SIMULATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Radko BARTOŠ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Oskar ZEMČÍK, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské

technologie

Akademický rok:

2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Radko Bartoš

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh temperovaného stolu pro FDM 3D tiskárnu s využitím simulace MKP

v anglickém jazyce:

Design of heated print bed for FDM 3D printer with FEM simulation

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rešerše problematiky 3D FDM tisku, se zaměřením na vyhřívání tiskového prostoru. Návrh a konstrukce vyhřívajícího stolu 3D FDM tiskárny s využitím simulace šíření tepla metodou konečných prvků. Výroba tepelně vyhřívajícího stolu a jeho technicko-ekonomické zhodnocení.

Cíle diplomové práce:

- rešerše problematiky 3D FDM tisku
- návrh modelu vyhřívajícího stolu
- simulace šíření tepla ve vyhřívajícím stolu
- volba a výroba vyhřívajícího stolu
- testy a technicko-ekonomické zhodnocení

Seznam odborné literatury:

1. Heat flow fundamentals. Ansys Theory reference: v. 13 [online]. 2011. vyd. Southpointe: Ansys, Inc. [cit. 2011-07-14].
2. WANG, Wego. Reverse Engineering: Technology of Reinvention. 1. vyd. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2011, 322 s. ISBN 978-1-4398-0630-2.
3. CHOI, S.H. a S. SAMAVEDAM. Modelling and otimisation of Rapid Prototyping. Computers in industry. č. 47, s. 39-53. ISSN 166-3615.
4. HECHT, Jeff. Dawn of the self-replicating machine. The New Scientist. roč. 198, č. 2659, s. 28. ISSN 0262-4079.
5. FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. Autodesk Inventor. Brno: Computer Press, 2007, 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.
6. ZEMČÍK, Oskar a Jan DVORÁČEK. A Distribution of Temperature Field in the FDM Printhead. In: NEWTECH 2011: The International Conference NEWTECH 2011 on Advanced Manufacturing Engineering. Brno: Litera, 2011, s. 115-119. ISBN 978-80-214-4267-2.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 3.2.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem vyhřívaného stolu pro FDM 3D tiskárnu pomocí metody konečných prvků. Je stručně popsána historie RepRap tiskáren, konstrukce a části, ze kterých se skládá. Jsou diskutovány dva způsoby vyhřívání, vyhřívání pomocí PCB desky a pomocí výkonových rezistorů na které se práce blíže zaměřuje. Jsou uvedeny metody a postupy, které vedly k získání optimálního rozmístění tepelných tělísek na desce vyhřívaného stolu. V závěru práce jsou uvedeny výsledky z testování, které jsou porovnávány s výsledky simulací v programu ANSYS.

Klíčová slova

tepelně vyhřívaný stůl, ANSYS, RepRap, šíření tepla, FDM

ABSTRACT

Master's thesis deals with desing of a heated bed for FDM 3D printer using the finite element method. It is briefly described the history of RepRap printers, construction and mechanical parts. Are discussed two methods of heating, heated by PCB boards and using power resistors. Furthermore is work closely focused on power resistors. There are presented methods and procedures which leads to an optimal distribution of heated components on the board of heated bed. In conclusion are presented results of testing which are compared with the simulations in ANSYS.

Key words

thermally heated bed, ANSYS, RepRap, heat distribution, FDM

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BARTOŠ, Radko. *Návrh temperovaného stolu pro FDM 3D tiskárnu s využitím simulace MKP*. Brno 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 57 s. příloh. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh temperovaného stolu pro FDM 3D tiskárnu s využitím simulace MKP** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Radko Bartoš

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Oskaru Zemčikovi, Ph.D. za cenné rady při vypracování diplomové práce a poskytnutí pomůcek pro testování.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Adamu Cívínovi, Ph.D. za cenné rady a konzultace ohledně programu ANSYS, Ing. Janě Čollákové za cenné rady a typy v programu ImageJ, Ing. Michalu Paverovi, Bc. Ondřeji Michelemu, Aleně Bartošové, Ing. Petru Dvořákovi, za rady ohledně stylistiky.

Také bych chtěl poděkovat celé mé rodině, přítelkyni, spolužákům a všem, kteří mě podporovali.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 RepRap 3D tiskárny.....	10
1.1 Historie.....	10
1.1.1 Darwin	10
1.1.2 Mendel	11
1.1.3 Huxley.....	11
1.1.4 Prusa Mendel	12
1.2 Hlavní části RepRap tiskárny	13
1.2.1 Konstrukce tiskárny	14
1.2.2 Vyhřívání hlava.....	14
1.2.3 Vyhřívání stůl.....	15
1.2.4 Elektronika a řídicí prvky	15
1.2.5 Materiál tisku	16
2 Teoretická příprava	18
2.1 ANSYS	18
2.2 Metoda konečných prvků MKP	19
2.3 Teplo a teplota, základní pojmy.....	19
2.3.1 Teplota, teplo, přenos tepla.....	19
2.3.2 Přenos tepla vedením-kondukcí.....	20
2.3.3 Šíření tepla prouděním-konvekcí.....	23
2.3.4 Šíření tepla zářením-radiací.....	24
3 Vyhřívání stolek.....	26
3.1 PCB vyhřívání deska.....	26
3.1.1 Vlastní návrh PCB desky	27
3.2 Vyhřívání desky pomocí topných tělísek.....	30
3.2.1 Šíření tepla v desce	30
3.2.2 Topná tělíska a jejich rozmístění	33
3.2.3 Volba rezistorů a jejich porovnání	35
3.2.4 Návrh a volba rozmístění vyhřívání těles.....	38
4 Sestavení stolku a jeho testování	44

4.1 Sestavení stolku	44
4.2 Testování tepelného stolku	45
4.3 Naměřené hodnoty a porovnání s výsledky ze simulace v ANSYS	47
5 Technicko-ekonomické zhodnocení	49
5.1 Hliníkový stolek s drátovými rezistory, keramické	49
5.2 Hliníkový stolek s drátovými rezistory v kovovém pouzdře	50
5.3 Prusa PCB vyhřívaný stolek	51
ZÁVĚR	52
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	53
Seznam použitých symbolů a zkratek	56

ÚVOD

Tato práce pojednává o 3D RepRap tisku a řeší problematiku vyhřívaného stolku, který je jednou z nejdůležitějších částí 3D tiskárny. K návrhu řešení je použit program ANSYS, který využívá metody konečných prvků.

První RepRap tiskárna byla vyrobena v roce 2007 na univerzitě v Bath doktorem Adrianem Bowyerem. Tato tiskárna byla pojmenována Darwin. Od roku 2007 počet RepRap tiskáren dramaticky vzrostl a v současnosti se jejich počet odhaduje v řádu desetitisíců. Tento trend růstu lze i dále očekávat, neboť výroba tiskáren se z amatérské výroby jednotlivých kusů přenáší do komerční seriové výroby, proto lze předpokládat i postupné snižování pořizovací ceny a rozšíření tiskáren do běžných domácností.

Hlavním tématem této práce je tepelně vyhřívaný stůl. Ten je důležitý z hlediska kvality vytištěné součásti. Nanesením tiskového materiálu o teplotě 150 °C na chladný povrch, dochází k jeho smršťování. Aby se podobným deformacím zabránilo, je důležité přivést materiál na vyhřívaný stůl, který má dostatečně vysokou a stabilní teplotu. Pro správnou funkci stolku je potřeba, aby teplota stolku byla homogenní a izotropní, proto se v praxi stolky vyrábějí z kovů. Nejpoužívanějším výrobním materiálem je hliník, kvůli dobré tepelné vodivosti, snadné dostupnosti a nízké ceně.

Pro 3D RepRap tisk se nejčastěji využívají materiály ABS a PLA. Nejvíce náchylný na teplotní rozdíly je materiál ABS, u kterého je doporučená teplota desky stolu 100 °C. Dalším tiskovým materiálem je PLA, který má nižší teplotu tavení a v některých případech ho lze využít pro tisk i bez předehřevu desky.

V současnosti jsou používány dva typy vyhřívaného stolku - prvním je tzv. PCB a druhým je kovový stolek, vyhřívaný pomocí tepelných tělísek. Oba typy stolků jsou v předložené práci diskutovány a byly pro ně vytvořeny modely, které jsou ve výpočtovém prostředí ANSYS analyzovány a navzájem porovnány. Ve variantě stolku s vyhřívanými tělísky je také rozebrána vhodná volba tělísek a jejich rozmístění.

Dle výsledků simulací byl vyroben model s nejnižší tepelnou diferencí po celé ploše vyhřívané desky. Pomocí modelu byl vyroben prototyp vyhřívané desky a byly experimentálně ověřeny jeho parametry. Naměřené hodnoty vyrobeného stolku byly porovnány s hodnotami zjištěnými v simulaci programu ANSYS.

Výsledky vypočítaných hodnot a jejich porovnání se simulací jsou shrnuty v závěru této práce. Také je zhodnoceno technicko-ekonomické hledisko vyhřívaných stolků a jsou diskutovány optimalizace pro případnou výrobu dalších stolků vycházejících z představeného prototypu.

1 REPRAP 3D TISKÁRNÝ

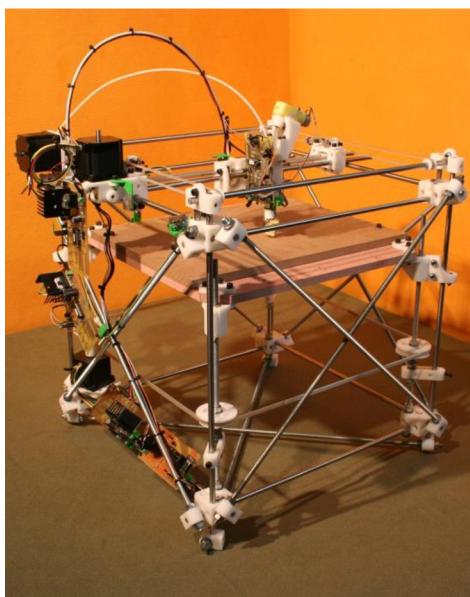
RepRap je zkratka, která vznikla z anglického názvu Replicating Rapid Prototyper. Právě díky své jedinečné schopnosti vytisknout prakticky jakýkoliv 3D předmět jsou tiskárny RepRap v poslední době velmi atraktivní a začínají být populární. RepRap označuje přístroj, který je schopen vytvářet součástky, nutné pro sestavení sebe samotného. To znamená, že většinu výrobních součástí je možné vytvořit právě pomocí tohoto stroje.

1.1 Historie

Technologie RepRap tisku je známá více jak třicet let. Bohužel byla natolik chráněna patenty, že nebylo možno se jí více zabývat. Po třiceti letech, když vypršelo patentové vlastnictví, se tato technologie začala komerčně využívat. Poprvé se jí zabýval Dr. Adrian Bowyer z univerzity Bath v roce 2005. V roce 2007 se mu podařilo sestavit první RepRap tiskárnu. RepRap tiskárny spadají pod takzvaný Open Source, který umožňuje lidem sdílet data a informace týkající se součástí a konstrukce tiskáren. Například je možné na internetu [1] vyhledat jakýkoliv druh tiskárny, stáhnout data pro tisk součástek a vytisknout je nebo nechat součástky vytisknout někomu, kdo již hotovou tiskárnu vlastní [2].

1.1.1 Darwin

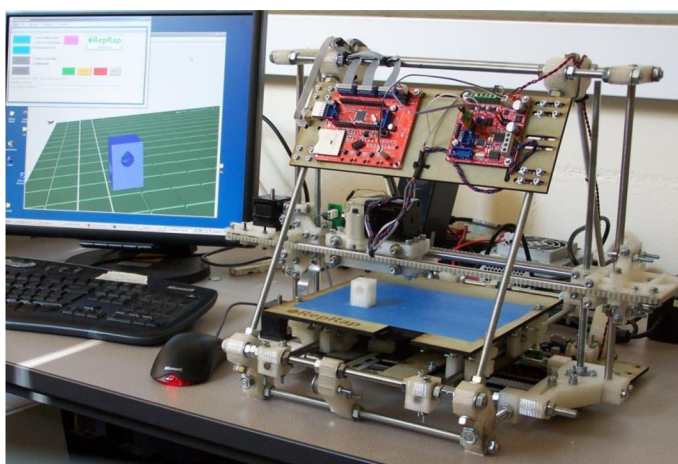
První tiskárna byla vyrobena v roce 2007. Nesla příznačné jméno Darwin po významném biologovi a zakladateli evoluční teorie. Darwin je sestaven z kovového rámu a umělohmotných částí. V horní části je vyhřívaný stůl, který se pohybuje ve svislé poloze a je ovládán dvěma krokovými motory. Dále je zde tepelná hlava, která vytváří modelovaný předmět vrstvu po vrstvě. Vyhřívaný stůl a hlava jsou vedeny pomocí závitových tyčí. Svislý pohyb stolu je závislý na rychlosti tisku tak, jak jsou vrstvy tisknuty na sebe vrstva po vrstvě. Darwin je velmi velký a robustní přístroj [3][4].



Obrázek 1.1: Model Darwin [5].

1.1.2 Mendel

Další přístroj byl pojmenován Mendel. Sestavil jej v roce 2009 student Ed Sells pod vedením Dr. Andriana Bowyera. Části této tiskárny byly vytištěny jejím předchůdcem Darwinem. Výhodou oproti předchozímu modelu byla její velikost. Byla menší s větší plochou pro tisk a s menším přesnějším krokem. Řídící elektronika byla oproti předchozímu modelu upevněna a nacházela se v horní části konstrukce [6]. Umístění elektroniky do této pozice se ukázalo jako nevhodné, protože při tisku vyšších součástí do ni zahříváná hlava naráží.



Obrázek 1.2: Model Mendel [7].

1.1.3 Huxley

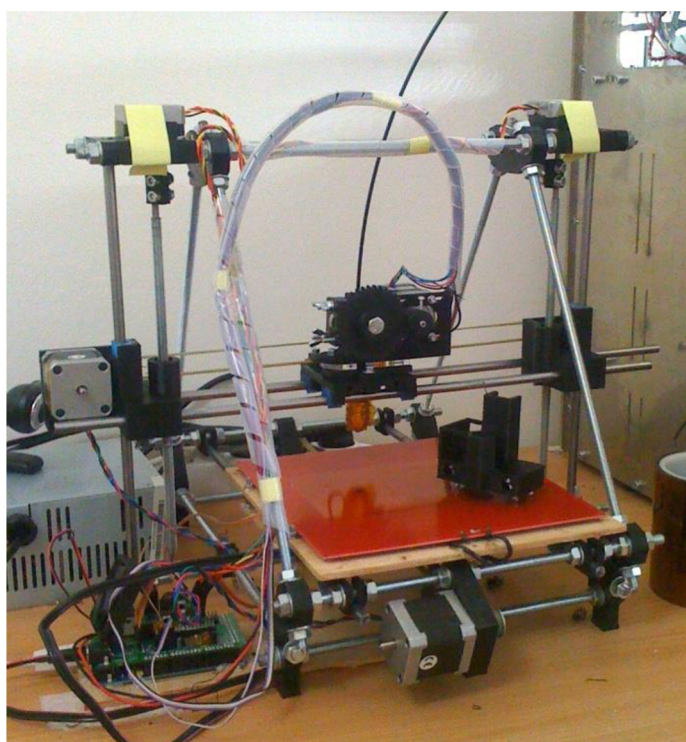
Třetí verze nesla název opět po známém biologovi Thomasu Henry Huxlym. Huxly je zmenšeninou předešlé verze Mendel. Kromě zmenšené konstrukce využívá pouze odlišnou elektroniku. Je o 30% rychlejší v seberekopování než verze Mendel. Je schopna vyrobit všechny součásti, jak pro svoji replikaci, tak pro verzi Mendel [8].



Obrázek 1.3: Model Huxley [9].

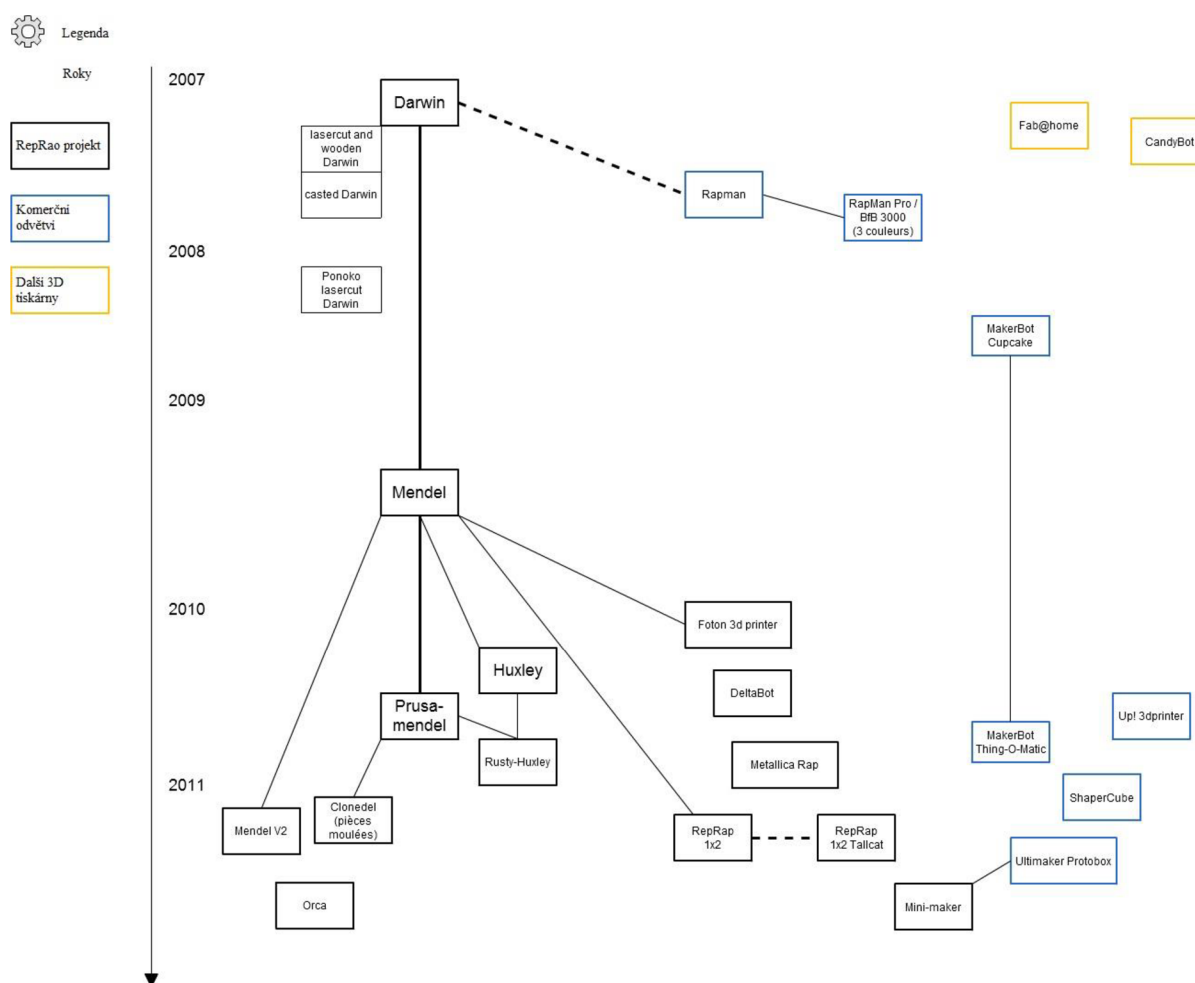
1.1.4 Prusa Mendel

Mezi nejznámější patří Prusa Mendel, kterou navrhl český student ekonomie Josef Průša. Tiskárna vychází z modelu Mendel, a proto je tento model označován jako Mendel-Prusa. Hlavním rozdílem oproti verzi Mendel je umístění ovládací elektroniky mimo konstrukci tiskárny a tím získal větší pracovní výšku. Průša zvýšil pevnost konstrukce, aby minimalizoval deviace vzniklou pohybem stolku a tiskové hlavy. Tato verze má čtyři svislá ramena, která jsou zpevněna tyčemi ve tvaru dvou trojúhelníků. Na svislá ramena je připojena hlava tiskárny, která se pohybuje ve vodorovné a svislé ose a pod ní je vyhřívaný stolek, který se pohybuje vodorovně.



Obrázek 1.4: Model Prusa Mendel [10].

Od doby vzniku první tiskárny v roce 2007 bylo vyrobeno mnoho dalších typů. Některé vznikly jako OpenSource, další se prodávají komerčně. První verze tiskáren využívaly modelování pomocí nanášení jednotlivých vrstev tiskového materiálu na sebe. U dalších bylo využito 3D prototypování, tedy tvorby 3D modelů vyřezáváním laserovým svazkem, případně vytvrzováním. Na obrázku 1.5 je zobrazen vývojový strom RepRap od roku 2007 až do roku 2012.



Obrázek 1.5: Vývojový strom tiskáren [11].

1.2 Hlavní části RepRap tiskárny

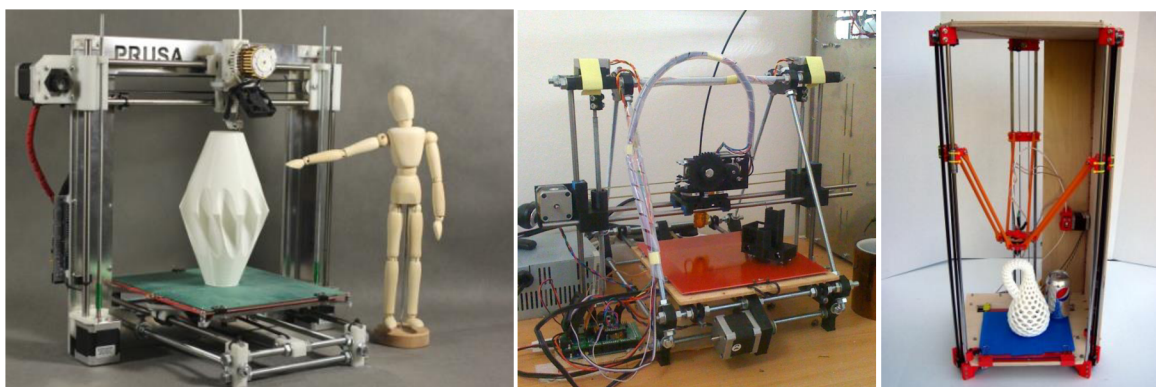
Každá verze tiskárny má odlišnou konstrukci, avšak díly, ze kterých je možno jednotlivé typy postavit jsou téměř totožné. Všechny části jsou dnes již běžně dostupné v obchodech nebo na internetu [1]. Tiskárny se skládají z mechanických a elektronických součástí. Umělohmotné součásti, je možno vytisknout přímo na RepRap tiskárně. Jedná se převážně o klouby, které zajišťují pevnější konstrukci tiskárny. Mezi další součásti patří závitové tyče, ložiska a spojovací materiál. Pohyb vyhřívaného stolku a vyhřívané hlavy zajišťují krokové motory, které jsou řízeny programovatelnými řídicími jednotkami. O vyhřívání stolku a tiskové hlavy se stará napěťový zdroj.

1.2.1 Konstrukce tiskárny

Výběrem typu tiskárny je volena její konstrukce. V dnešní době jsou nejčastěji realizovány 3 druhy tiskáren. První verzí je model Prusa [12]. Prusa má jednoduchou konstrukci, která využívá mostové konstrukce. V horní části je vyhřívaná hlava, která se pohybuje v ose z a y . Pod vyhřívanou hlavou je umístěn vyhřívaný stolek, který se pohybuje v ose x .

Konstrukce tiskárny Prusa Mendel připomíná pyramidu. V horní části je umístěna řídicí elektronika, která řídí vyhřívanou hlavu, umístěnou níže. Vyhřívaná hlava se pohybuje pouze v ose y narozdíl od vyhřívaného stolku, který se pohybuje ve vodorovné a svislé rovině.

Posledním typem konstrukce je tiskárna Rostock [13], která má tvar kvádrů. Tento typ má tři ramena, která jsou připevněna ke konstrukci a zajišťují pouze svislý pohyb. Na konci ramen je umístěna vyhřívaná hlava. Rozdílem výšek ramen se docílí pohybu hlavy ve všech částech vyhřívaného stolku. Nevýhoda tohoto konstrukčního řešení spočívá v tom, že v krajních bodech stolku je odlišná přesnost posuvu. Nepřesnosti posuvu jsou korigovány softwarově.

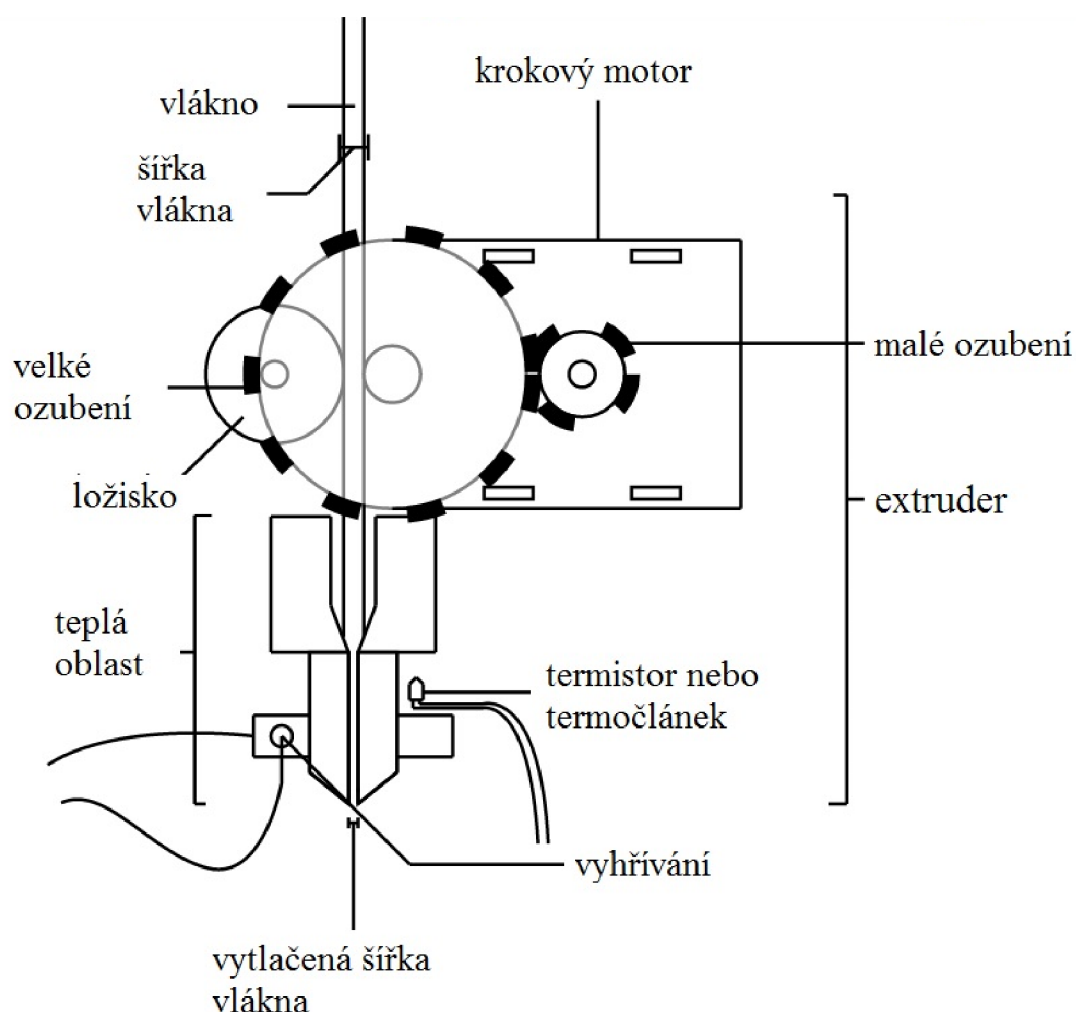


Obrázek 1.6: Vlevo – Prusa [12], uprostřed - Prusa Mendel [10], vpravo – Rostock [13].

1.2.2 Vyhřívaná hlava

Při výběru tiskárny a její konstrukce je volba podmíněná tvarem a umístěním vyhřívané hlavy. Vyhřívaná hlava má více sledovaných parametrů. Například je podmíněná materiálem, kterým tiskne a jeho teplotou, průměrem trysky nebo rychlostí průchodu materiálu.

Vyhřívaná hlava se dělí na studenou a teplou oblast. Ze studené oblasti se přivádí materiál do vyhřívané hlavy, pomocí krokového motoru přes ozubení ze zásobníku. Za zásobníkem se nachází vyhřívaná hlava a zde začíná teplá oblast. Tady se v trysce materiál stane plastickým. Tento plastický materiál se ukládá ve vrstvách na vyhřívaný stolek. Některé vyhřívané hlavy mají na konci trysky umístěný větrák, pro rychlejší ochlazení vytištěného materiálu [14]. Na obrázku 1.7 je zobrazena celá sestava.



Obrázek 1.7: Sestava vyhřívané hlavy [15].

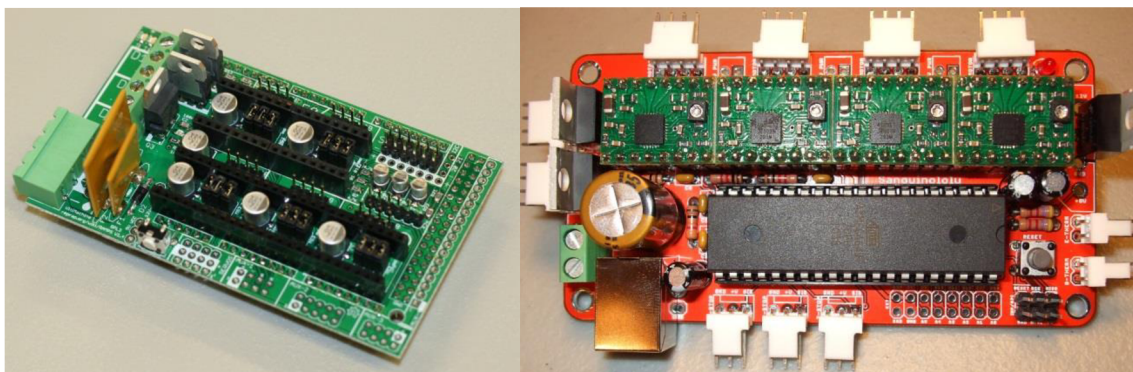
1.2.3 Vyhřívání stůl

Vyhřívání stůl je nejčastěji čtvercového tvaru. Jeho plocha definuje velikost základny tištěného předmětu, případně limituje plochu při tisku více předmětů najednou. Standardní velikost je $(210 \times 210) \text{ mm}^2$. Hlavním sledovaným parametrem vyhřívaného stolku je způsob vyhřívání. Teplota stolku musí být po celé ploše homogenní. Dalším parametrem je vhodná volba materiálu, kvůli teplotní roztažnosti a vlivu vnitřní deformace materiálu. Problematika šíření tepla, vhodná volba materiálu a způsob vyhřívání bude dále probírán v kapitole 3.

1.2.4 Elektronika a řídicí prvky

Pohyb stolku a vyhřívání hlavy je zajištěn krokovými motory, které jsou řízeny programovatelnou deskou s procesorem. Procesor plně řídí obsluhu motorů, hlídá správnou teplotu vyhřívání hlavy pomocí termostatů a nastavuje správnou teplotu vyhřívání stolku. V současnosti se nejvíce používají dvě základní řídicí elektroniky a to RAMPS 1.4 [16] a Sanguinololu [17]. RAMPS 1.4 slouží jako základní deska, na kterou si uživatel připojí další elektronické příslušenství. Sanguinololu, již funguje jako hotový

komponent a stačí jej naprogramovat. Obě elektroniky mají svá charakteristická specifika a uživatel vybírá dle své potřeby, například podle počtu vstupů a výstupů. Na komerčním trhu lze nalézt spoustu různých typů desek a k nim potřebné příslušenství. Příklady uvedených desek jsou znázorněny na obrázku 1.8.



Obrázek 1.8: Vlevo - RAMPS 1.4 [18], vpravo Sanguinololu [19].

Napájení je zajištěno komerčními 12 V případně 24 V zdroji napětí s výkonem zdroje mezi 100 – 300 W. Výběr zdroje je většinou stanoven potřebným výkonem vyhřívání stolku, extruderu a k zajištění chodu krokových motorů a elektroniky.

1.2.5 Materiál tisku

V případě RepRap tisku jsou používány veškeré materiály, které lze zpracovat do plastického stavu a následně ochlazením do stavu pevného. Nejčastějším tiskovým materiálem jsou téměř všechny druhy termoplastů. Lze také tisknout voskem. Ten se hojně využívá ve slévárenském průmyslu pro tisk voskových modelů určených k výrobě slévárenských forem. Dokonce je možné tisknout ze speciálně upraveného skla, nebo z betonu. Nejpoužívanějšími a nejdostupnějšími materiály pro běžné uživatele jsou však polymléčná kyselina (PLA) a Akrylonitrilbutadienstyren (ABS). Jejich nejdůležitějšími vlastnostmi je teplota tavení a pevnost [20].

PLA je plast na bázi přírodního cukru a škrobu, který je smíchaný s kyselinou mléčnou. Při sloučení těchto prvků vznikají makromolekuly polymeru PLA. Díky svému složení je materiál biologicky odbouratelný. Běžně se využívá v textilním průmyslu [21].

ABS je amorfní, velmi odolný termoplast. Díky své pevnosti se nejčastěji používá pro tisk dílů na RepRap tiskárny. Je možné jej lepit rozpouštědlovými lepidly na bázi toluenu a matylenchloridu. Je zdravotně nezávadný a v průmyslu se nejčastěji využívá na polepování hran u LTD desek, také se z něj vyrábějí součástky @LEGO [22].

Porovnání materiálu PLA a ABS [20] :

- PLA není náchylný k tepelným deformacím
- PLA má nižší energetické nároky (nižší teplotu tavení o cca 50 °C)
- PLA je ekologický materiál schopný biodegradace
- PLA neuvolňuje toxické výpary při tavení a nepáchne

- ABS je dostupnější na trhu
- ABS je levnější až o 1/4
- ABS obecně vykazuje lepší povrchovou strukturu modelu
- ABS má lepší průchodnost tryskou, je tedy třeba nižší podávací síla extruderu
- ABS má větší odolnost vůči vlivům prostředí

2 TEORETICKÁ PŘÍPRAVA

V první části kapitoly bude popsán program ANSYS, jakožto hlavní nástroj této práce pro stanovení nejvhodnějšího rozložení tepelných těles k získání homogenního tepelného pole a nejnižší tepelné diference. V návaznosti na to, zde budou rozebrány obecné principy výpočtů a metody konečných prvků, které ANSYS využívá. V další části lze nálezt obecné rovnice, které se týkají teploty, tepla a jeho přenosu do okolí.

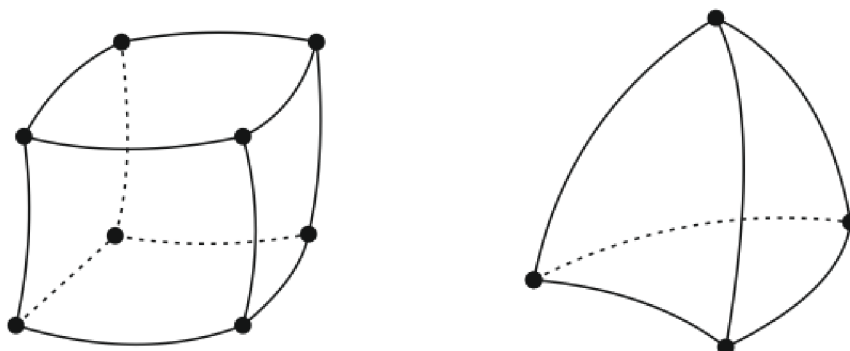
2.1 ANSYS

ANSYS je od začátku své existence jedním z nejpoužívanějších inženýrských systémů, který využívá metody konečných prvků (MKP). Software ANSYS je simulačním program, který obsahuje různé typy analýz, od strukturální a termodynamické, až po akustickou analýzu, nebo analýzu proudění kontinua. Stal se velkým průkopníkem multifyzikálních analýz v klasických oborech jakou je například strojírenství, energetika, dopravní a automobilová technika. Kvůli své všestrannosti se rozšiřuje i do dalších oblastí, jako je například stavebnictví či biomechanika. Všechny analýzy lze provádět jednotlivě nebo je lze sloučit do jediné komplexní analýzy. Výpočtové modely jsou parametrické, což jednoduše umožňuje řešit i citlivostní a optimalizační analýzy [23].

Prostředí ANSYS Workbench je nadstavba klasického APDL (ANSYS Parametric Design Language), které se ovládalo pomocí vlastních skriptů. ANSYS Workbench má grafické prostředí, kde lze daný model přímo vymodelovat a snadno zadat počáteční podmínky. Obě verze prostředí využívají k výpočtu stejný postup řešení a nabízejí širokou škálu analýz v jednotlivých modelech, které jsou součástí celé komplexní úlohy [23].

Je důležité podotknout, že výpočet probíhá v idealizovaném prostředí. Správnost řešení se odvíjí jednak od schopnosti uživatele správně převést konkrétní problém ze skutečného světa do matematického modelu, tak i od správného nastavení podmínek pro vlastní matematické řešení [23].

Analyzovaný model je rozložen na konečný počet bodů, takzvanou síť konečných prvků, ve kterých jsou prováděny matematické operace. U 3D objemových těles je síť tvořena objemovými prvky, které jsou znázorněny na obrázku 2.1



Obrázek 2.1: Ukázka objemových prvků [23].

ANSYS je výkonný pomocník při modelování nelineálních problémů, např. plasticity, a umožňuje definovat vlastní materiál včetně jeho fyzikálních parametrů.

2.2 Metoda konečných prvků MKP

MKP je numerická metoda využívaná pro řešení a simulaci rozsáhlé třídy inženýrských problémů, jako jsou průběhy napětí, deformace, proudění tepla, elektromagnetismu, proudění tekutin atd. Vznikla přibližně v polovině 50. let minulého století ve výzkumném ústavu aeromacké a kosmické mechaniky v Ohio, USA. Výpočetní metoda vznikla kvůli potřebě řešit složité úlohy z pružnosti a strukturní analýzy. V civilním sektoru se metoda konečných prvků začala rozvíjet v letech 1965-1975. Pomocí MKP se dnes řeší celá řada úloh [24][25].

Název metody zdůrazňuje skutečnost, že základním stavebním kamenem je prvek konečných rozměrů, narozdíl od infinitesimálního pohledu klasické pružnosti, která vychází z představy rovnováhy na nekonečně malém elementu. MKP vyžaduje rozdělení řešené oblasti na konečný počet podoblastí, prvků. Tyto prvky jsou právě charakterizovány uzly sítě, kterou je nutno vytvořit na tělese. Pro každý typ prvku je kromě dimenze a tvaru charakteristický počet a poloha jeho uzlů. Uzly sítě jsou body, v nichž jsou hledány neznámé parametry řešení. To mohou být například posuvy a natočení, z kterých se dále počítá napětí atd. Hustota a topologie prvků sítě zásadně ovlivňuje kvalitu výsledků a potřebnou kapacitu pro řešení [24][25].

2.3 Teplo a teplota, základní pojmy

Všechny výpočty jsou provedeny v programu ANSYS a nejsou na první pohled zcela zřejmé, proto je nutné popsat, jaké děje probíhají vlivem rozdílu teploty uvnitř materiálu a mezi materiály navzájem. Proto budou v dalších kapitolách probírány základní veličiny a pojmy týkající se tepla a přenosu tepla mezi látkami.

2.3.1 Teplota, teplo, přenos tepla

Termodynamická teplota T je jednou ze sedmi základních veličin SI. Vyjadřuje se v Kelvinech. Teplotu t lze uvádět i v jiných jednotkách, podle různých přepočtů. V Evropě se přepočítává na stupně Celsia.

$$T[K] = t[^\circ C] + 273,15 \quad (2.1)$$

Každá látka obsahuje molekuly. Tyto molekuly se vlivem teploty pohybují, čím vyšší je teplota látky, tím vyšší je kinetická energie molekul uvnitř látky. Vnitřní energie látky se vypočítá pomocí vztahu

$$E = kT \quad (2.2)$$

kde konstanta k je tzv. Boltzmannova konstanta, nabývá hodnoty $k = 1,38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$.

Bude-li uvažován systém o teplotě T_1 a okolí o teplotě T_2 , tak rozdíl těchto teplot odpovídá velikosti energie přenesené mezi těmito systémy. Takto přenesená energie se nazývá teplo a značí se Q . Lze tedy napsat, že teplo je energie vyměněná mezi systémem a okolím jako důsledek teplotního rozdílu mezi nimi [26]. Způsoby přenosu tepla jsou rozlišovány podle fyzikální podstaty dějů, kterými jsou uskutečňovány. Ve skutečnosti existují tři druhy tepelného přenosu.

2.3.2 Přenos tepla vedením-kondukcí

Způsob přenosu tepla vedením probíhá ve spojitém látkovém prostředí tak, že částice s vyšší kinetickou energií vlivem srážek předávají část své kinetické energie částicím s nižší kinetickou energií, čímž dochází k přenosu tepla. Teplo samovolně přechází z míst s vyšší energií do míst s nižší energií. Tento jev trvá tak dlouho, dokud se energie nevyrovnejí. Rychlost přenosu tepla je vyjádřena tepelným tokem a je definována vztahem

$$\Phi = \frac{dQ}{d\tau} \quad (2.3)$$

kde Q je množství tepla, které projde určitou plochou za dobu τ .

Hustota tepelného toku je pak definována vztahem

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dS_n} = \frac{dQ}{d\tau dS_n} \quad (2.4)$$

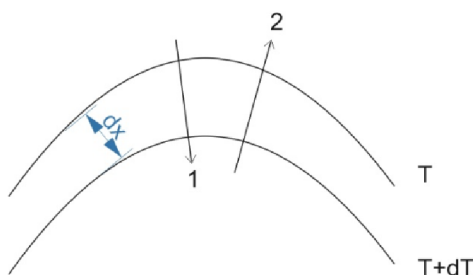
$$\vec{\varphi} = \frac{dQ}{d\tau dS_n} \vec{n} \quad (2.5)$$

Vzorec 2.5 udává množství tepla, které projde jednotkovou plochou kolmou ke směru šíření tepla.

Fourier pomocí experimentu přišel na to, že závislost mezi hustotou tepelného toku a gradientem teploty je lineární a definoval vztah, který se nazývá Fourierův zákon [27]

$$\varphi = -\lambda \text{ grad } T = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.6)$$

kde λ je tzv. součinitel tepelné vodivosti a vyjadřuje schopnost látky přenášet teplo vedením. Poměr dT/dx neboli *gradient* T (v tomto případě jednorozměrný) vyjadřuje velikost změny teploty dT ke vzdálenosti dx mezi izotermními plochami. Izotermní plocha je geometrické místo bodů o stejné teplotě [28]. Záporné znaménko v rovnici 2.6 značí, že tepelný tok proudí proti směru tepelného gradientu, také označovanému jako teplotní spád.



Obrázek 2.2: Izotermní plochy; 1-směr teplotního gradientu; 2-směr teplotního toku.

Fourierova rovnice se upravuje pro dva možné druhy vedení tepla. První je pro nestacionární vedení tepla. Nestacionární vedení tepla znamená, že se s časem mění teplota uvnitř materiálu, čímž se mění i součinitel tepelné vodivosti. Pro tento případ platí vztah

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.7)$$

kde ρ je hustota materiálu, c je tepelná kapacita daného materiálu. Poměr $\lambda/\rho c$ určuje rychlost vyrovnávání teplotních rozdílů v látce. Značí se a a nazývá se součinitelem teplotní vodivosti. Rovnice 2.7 lze vyjádřit pomocí Laplaceova operátoru a přechází do tvaru

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T \quad (2.8)$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.9)$$

Fourierova rovnice pro nestacionární proudění se zdrojem tepla je ve tvaru

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T + \frac{q_0}{\rho c} \quad (2.10)$$

kde q_0 je tepelný výkon zdroje.

Jednodušší je řešení Fourierovy rovnice pro stacionární šíření tepla. V tomto případě platí, že celkový tepelný tok vstupující do materiálu je roven toku, který materiál opustí [26]. Platí tedy podmínky

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0; \Delta T = 0 \quad (2.11)$$

Lze tedy odvodit vztah pro šíření tepla homogenní stěnou v jednom směru. Obecné řešení diferenciální rovnice 2.11 je rovnice

$$T(x) = C_1 x + C_2 \quad (2.12)$$

kde platí z okrajových podmínek

$$T = T_1 \text{ pro } x = 0 \quad (2.13)$$

$$T = T_2 \text{ pro } x = d \quad (2.14)$$

Určením integračních konstant získáme rovnici 2.17

$$T_1 = C_2 \quad (2.15)$$

$$T_2 = C_1 d + T_1 \Rightarrow C_1 = \frac{T_2 - T_1}{d} \quad (2.16)$$

$$T = T(x) = \frac{T_2 - T_1}{d} x + T_1 = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{d} x \quad (2.17)$$

Odtud lze vypočítat dosazením do rovnice 2.6 hustotu tepelného toku

$$\varphi = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{d} \quad (2.18)$$

Teplo prošlé rovinnou stěnou o ploše S za čas τ je pak dán vztahem

$$Q = \varphi S \tau = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{d} S \tau = \Lambda (T_1 - T_2) S \tau \quad (2.19)$$

kde poměr λ/d je definován jako tepelná propustnost stěny [27][29].

V tabulce 2.1. jsou uvedeny vybrané druhy materiálu s příslušným součinitelem tepelné vodivosti λ při teplotě 20°C.

Materiál	$\lambda_{20} [\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}]$	$\rho [\text{kg m}^{-3}]$
Stříbro 99,98 %	418	10500
Měď elektrolytická	395	8960
Hliník 99,75 %	229	2700
Wolfran	163	19300
Mosaz	106	8400-8750
Železo 99,92 %	73	7870
Ocel 0,2 % C	50	7850
Olovo	34,7	11340
Žula	2,9-4,0	2600-2900
Beton armanový	1,5	2300-2400
Cihly	0,28-1,2	1800-2400
Plexisklo	0,2	1180
Skelná vata	0,03-0,05	80

Tabulka 2.1: Tepelná a teplotní vodivost materiálů [30].

2.3.3 Šíření tepla prouděním-konvekcí

Šíření tepla prouděním lze uplatnit pouze u plynných nebo kapalných látek. Proudění nelze zavádět u látek pevných. Šíření tepla prouděním nejčastěji vzniká na rozhraní pevné látky a proudící kapaliny. Na povrchu pevné látky se vytvoří tenká mezní vrstva, která je ovlivňována obtékající kapalinou a její rozdílnou teplotou. Šíření tepla prouděním je závislé na rychlosti proudící kapaliny, viskozitě kapaliny a drsnosti povrchu.

Rozlišují se dva typy proudění a to volné proudění, které je způsobeno rozdílem hustoty látky vyvolané právě její rozdílnou teplotou a nucené proudění. Nucené proudění, které je vyvoláno uměle vytvořeným rozdílem tlaků, například ventilátorem nebo čerpadlem se využívá pro rychlejší vyrovnání teplotních rozdílů v tekutině [27].

Teoretický popis šíření tepla prouděním je velmi složitý, jelikož veličiny popisující proudění reálné tekutiny jsou funkcemi velkého počtu proměnných parametrů. Z tohoto důvodu se v technické praxi převážně určuje pomocí experimentů.

Pokud se teploty povrchu stěny a proudící kapaliny neliší o více než několik kelvinů, tak lze hustotu tepelného toku počítat z Newtonova empirického vztahu [29]

$$\varphi = \alpha \cdot (T'_1 - T_1) \quad (2.20)$$

kde α je součinitel přestupu tepla. Převrácená hodnota součinitele přestupu tepla α charakterizuje tepelný odpor přestupu tepla na rozhraní. Teplo přidané stěně se vypočítá

$$Q = \alpha \cdot S \cdot (T'_1 - T_1) \cdot \tau \quad (2.21)$$

V tabulce 2.2 je znázorněn součinitel prostupu tepla α pro různá prostředí.

Prostředí	α [W m ⁻² K ⁻¹]
volné proudění	
plyny	2-25
kapaliny	50-1000
nucené proudění	
plyny	25-250
kapaliny	50-20000
proudění při fázové změně	
var a kondenzace kapaliny	2500-100000

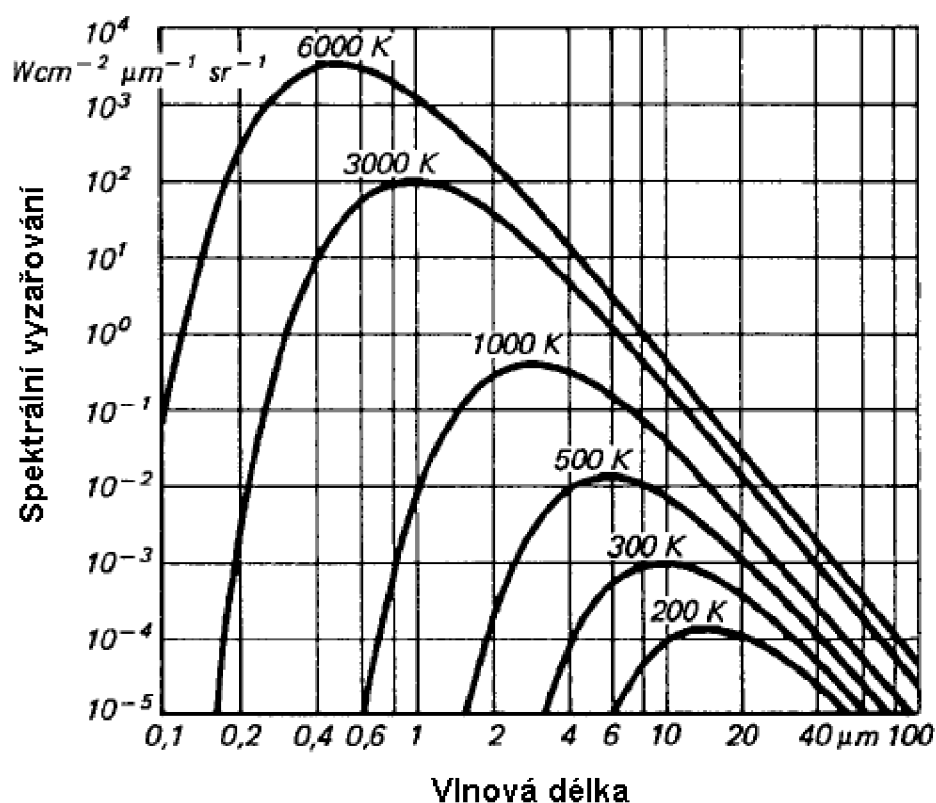
Tabulka 2.2: Součinitel prostupu tepla [29].

2.3.4 Šíření tepla zářením-radiací

Všechny látky v jakémkoliv skupenství, které mají alespoň minimální teplotu vyšší než 0 stupňů Kelvina, jsou zdroji elektromagnetického záření. Elektromagnetické záření vzniká fluktuací nabitých částic, které je vyvoláno tepelným pohybem v látce. Z toho vyplývá, že čím vyšší má látka teplotu, tím vyšší je intenzita tepelného záření. Přesněji řečeno, závisí na čtvrté mocnině teploty T . Výkon vyzařujícího předmětu je dán Stefanovým-Boltzmannovým zákonem

$$P_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot T^4 \quad (2.22)$$

kde $\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ a nazývá se Stefanova-Boltzmannova konstanta. K tomuto závěru experimentálně došel v roce 1879 Josef Stefan a krátce nato ji Ludwig Boltzmann teoreticky odvodil. Symbol ε označuje emisivitu povrchu a nabývá hodnot mezi 0 až 1 podle složení a provedení povrchu. Těleso, které nabývá hodnoty emisivity rovné jedné, nazýváme absolutně černé těleso a je to pouze teoretický model [26]. V opačném případě, tedy kdy emisivita tělesa je rovna nule, se tato tělesa nazývají absolutně bílá tělesa.



Obrázek 2.3: Vyzařovací charakteristiky černého tělesa v závislosti na jeho teplotě [31].

V tabulce 2.3 jsou znázorněny hodnoty emisivity pro určité druhy materiálu.

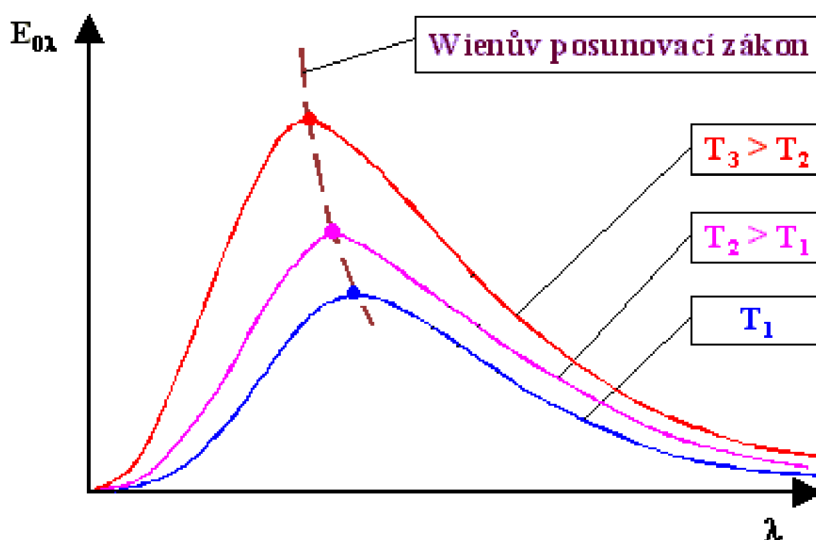
Materiál	Emisivita ϵ
Hliník, leštěný	0.05
Hliník, hrubý povrch	0.07
Mosaz, matná, zašlá	0.22
Měď, komerčně vyleštěná	0.07
Měď, zoxidovaná	0.65
Sklo	0.92
Porcelán	0.92
Bílá keramika Al ₂ O ₃	0.9
Voda	0.98

Tabulka 2.3: Emisivita vybraných materiálů [31].

Dalším důležitým poznatkem v oblasti šíření tepla zářením přispěl Wilhelm Wien. Ten dospěl k závěru, že čím vyšší teplotu těleso bude mít, tím se bude zkracovat jeho vlnová délka [26]. Přesněji to znamená, že rostoucí teplotou zářiče se posouvá maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku ke kratším vlnovým délkám. Matematicky vztah Wienova posunovacího zákona lze formulovat vztahem

$$\lambda_{max} \cdot T = b \quad (2.23)$$

kde λ_{max} je vlnová délka, při níž je hodnota spektrální hustoty zářivého toku při dané teplotě zářiče maximální. T je termodynamická teplota tělesa a b je konstanta, jejíž hodnota je $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$. Na obrázku 2.4 je znázorněna vyzařovací charakteristika.



Obrázek 2.4: Zobrazení Wienova posunovacího zákona v diagramu závislosti spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa na vlnové délce záření [32].

Wienova posunovacího zákona se například využívá při zjištění teploty u bezdotykových měřičů teploty [31].

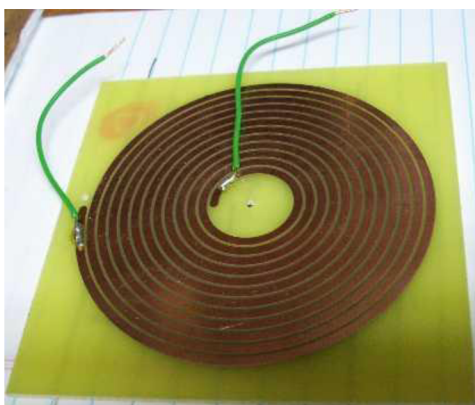
3 VYHŘÍVANÝ STOLEK

Vyhříváný stolek je jednou z nejdůležitějších částí RepRap tiskárny. Používá se především pro zlepšení kvality tisku tím, že pomáhá snížit deformace. Jak se roztavené vlákno ochlazuje, má tendenci se smršťovat. Jakmile při tomto procesu nedochází ke smršťování rovnoměrně v celé tištěné součásti, těleso chladne v různých částech odlišně, výsledkem je pokřivená součást. Deformace se projevuje zejména odlepením krajů součásti od plochy vyhříváné desky. Tisk na vyhřívánou desku umožňuje tištěnému materiálu zůstat po celou dobu tisku na konstantní teplotě a umožňuje rovnoměrnější tuhnutí plastu, které začíná teplotou nižší než je teplota tavení daného materiálu. Nejvhodnější je využití vyhřívání pro plasty jako je ABS. Pro PLA je požadovaná teplota stolku nižší a v některých případech je možné tisknout bez vyhřívání. Mezi faktory ovlivňující stabilitu a homogenitu teploty stolku patří druh materiálu vyhříváné desky, rozměry a způsob vyhřívání. V současné době existuje několik různých druhů vyhříváných stolků, níže budou uvedeny dva nejčastější typy.

3.1 PCB vyhříváná deska

Mezi nejrozšířenější způsoby vyhřívání stolku patří tzv. PCB deska. Její oblíbenost je ovlivněna několika faktory. Především poměrně nízkou cenou a snadnou montáží. PCB deska je pokryta měděnou folií o tloušťce 35 μm a její dráhy vedou po celé ploše desky. Je velmi důležité dodržení konstrukčních parametrů měděné desky jako jsou například rozměry desky a tloušťka měděné vrstvy. Při nedodržení parametrů by mohlo docházet k přehřívání, případně nehomogennímu prohřátí desky.

PCB desku poprvé navrhl Josef Průša, ten se nechal inspirovat Keithem Neufeldem [33], který přišel s nápadem nechat vyhřívát desku pomocí spirály určené k ohřevu vody. Jeho návrh PCB desky je znázorněn na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Prototyp PCB vyhříváného stolku [33].

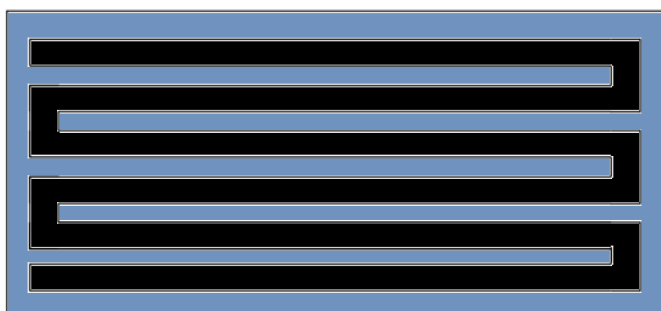
Josefu Průšovi se podařilo vyleptat a nanést mikrovrstvy do PCB desky. Tu připevnil ke sklu o tloušťce 3mm pomocí lepidla a korku. V současnosti se PCB deska přichycuje pomocí svorek přímo ke sklu, aby byl kontakt co nejtěsnější.

3.1.1 Vlastní návrh PCB desky

V případě vlastního návrhu PCB desky je potřeba nejdříve vypočítat rozměry měděné dráhy, která se bude klikatit po celé ploše desky a bude jej vyhřívat. V prvním kroku je důležité vypočítat celkový odpor desky. Použitý zdroj má následující parametry - napětí 12 V a výkon 300 W. Vzhledem k tomu, že tímto zdrojem je napájena tryska, řídicí elektronika a krokové motory, bude uvažovaná hodnota výkonu nižší a to 120 W. Celkový odpor tedy odpovídá

$$P = U \cdot I; R = \frac{U}{I} \quad (3.1)$$

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{12^2}{120} = 1,2\Omega \quad (3.2)$$



Obrázek 3.2: Ilustrační znázornění vodivé dráhy na PCB desce. Černě znázorněna měděná dráha.

kde P je výkon zdroje, U je napětí zdroje a R je celkový odpor. V případě, že se dráha bude klikatit po celé desce, tak jak je znázorněno na obrázku 3.2, vypočítá se její celková délka pomocí vztahu

$$l_{tr} = l_b \cdot n_{tr} \quad (3.3)$$

kde l_{tr} je délka dráhy, l_b je délka desky a n_{tr} je počet paralelních drah na desce. Počet paralelních drah na desce se stanoví

$$n_{tr} = \frac{w_b}{w_{tr} + w_i} \quad (3.4)$$

kde w_b je šířka desky, w_{tr} je šířka dráhy a w_i je šířka izolačního pásu mezi dvěma drahami. Šířka jedné dráhy je dána vztahem

$$w_{tr} = \frac{-w_i + \sqrt{w_i^2 + 4 \cdot \frac{R_{S,Cu} \cdot l_b \cdot w_b}{R \cdot t_{Cu}}}}{2} \quad (3.5)$$

kde $R_{S,Cu}$ je specifický odpor mědi a t_{Cu} je tloušťka měděné vrstvy.

Znamé hodnoty:

$$R = 1,2 \Omega$$

$$R_{S,Cu} = 1,68 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot mm^2/m = 1,68 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot mm$$

$$t_{Cu} = 35 \mu m = 0,035 mm$$

$$l_b = 200 mm$$

$$w_b = 200 mm$$

$$w_i = 0,5 mm$$

Dosažením známých hodnot do rovnice 3.5 získáme šířku jedné dráhy, tedy

$$w_{tr} = \frac{-0,5 + \sqrt{0,5^2 + 4 \cdot \frac{1,68 \cdot 10^{-5} \cdot 200 \cdot 200}{1,2 \cdot 0,035}}}{2} = 3,7578 mm$$

Nyní lze vypočítat počet paralelních drah dosažením do rovnice 3.4, tedy

$$n_{tr} = \frac{200}{3,7578 + 0,5} = 46,97$$

Výsledek musí být zaokrouhlen směrem dolů, takže výsledný počet drah bude 46. Nyní lze vypočítat hodnotu odporu na metr dráhy. Ten se stanoví

$$R_m = \frac{R_{S,Cu}}{t_{Cu} \cdot w_{tr}} = \frac{1,68 \cdot 10^{-2}}{0,035 \cdot 3,7578} = 0,1277 \Omega \cdot m^{-1} \quad (3.6)$$

Celkový odpor je

$$R_c = R_m \cdot l_{tr} = 0,1277 \cdot 46 \cdot 0,2 = 1,175 \Omega \quad (3.7)$$

S využitím vypočítaných hodnot byl navržen model vyhřívané desky v programu Unigraphics. Ten byl následně importován do programu ANSYS a analyzován.

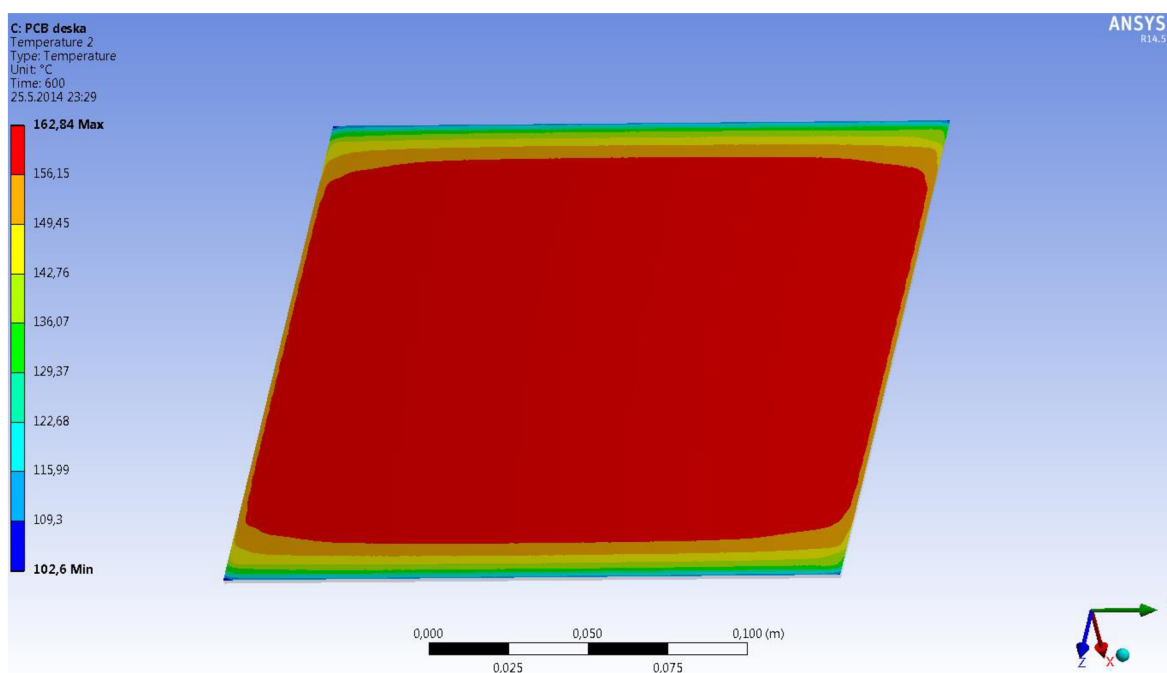
Po importování modelu do programu ANSYS, je nutné zadat správné počáteční podmínky, které budou odpovídat reálným hodnotám. U všech modelů se uvažuje počáteční teplota okolí 20 °C a doba ohřevu 600 s. Parametr, který ovlivňuje ochlazování desky a tím rozložení teploty na jejím povrchu, je přirozená konvekce vzduchu. Její hodnota byla pro všechny modely nastavena na 10 W.m⁻².K pro všechny vnější plochy. Tato hodnota odpovídá cirkulaci vzduchu za pokojových podmínek, tedy stálé teplotě 22 °C a bez

vnějších vlivů prostředí. Tabulka 3.1 znázorňuje součinitel převodu tepla konvekcí pro různá media.

Medium	Součinitel převodu tepla konvekcí [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]
Vzduch (přirozená konvekce)	5-25
Vzduch/přehřátá pára (nucená konvekce)	20-300
Olej (nucená konvekce)	60-1800
Voda (nucená konvekce)	300-6000
Voda (vařící)	3000-60000
Pára (kondenzující)	6000-120000

Tabulka 3.1: Součinitel převodu tepla konvekcí pro různá media [34].

Pro případ PCB desky je uvažována její velikost (200×200) mm² a tloušťka 1,5 mm. Do té je vyleptána vodivá dráha, jejíž rozměry byly vypočítány výše. Pro desku byl nastaven materiál FR-4 Epoxy, který se při výrobě PCB desek používá nejčastěji, a pro vodivou dráhu byla nastavena na měď. Výsledný model s rozložením teplot je znázorněn na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Teplotní rozložení PCB desky.

Nejvíce je vyhřátý střed desky. Kraje desky mají až o 60 °C nižší teplotu. Na krajích, kde jsou dráhy vedeny příčně není takový rozdíl teplot, jako u krajů s podélným vedením drah. Tento model je nevhodný, neboť teplota desky není po celé ploše homogenní. Dalším

důvodem je, že červená barva, která charakterizuje rozmezí teplot $162,84\text{ °C}$ - $156,15\text{ °C}$ má velmi velké teplotní diference.

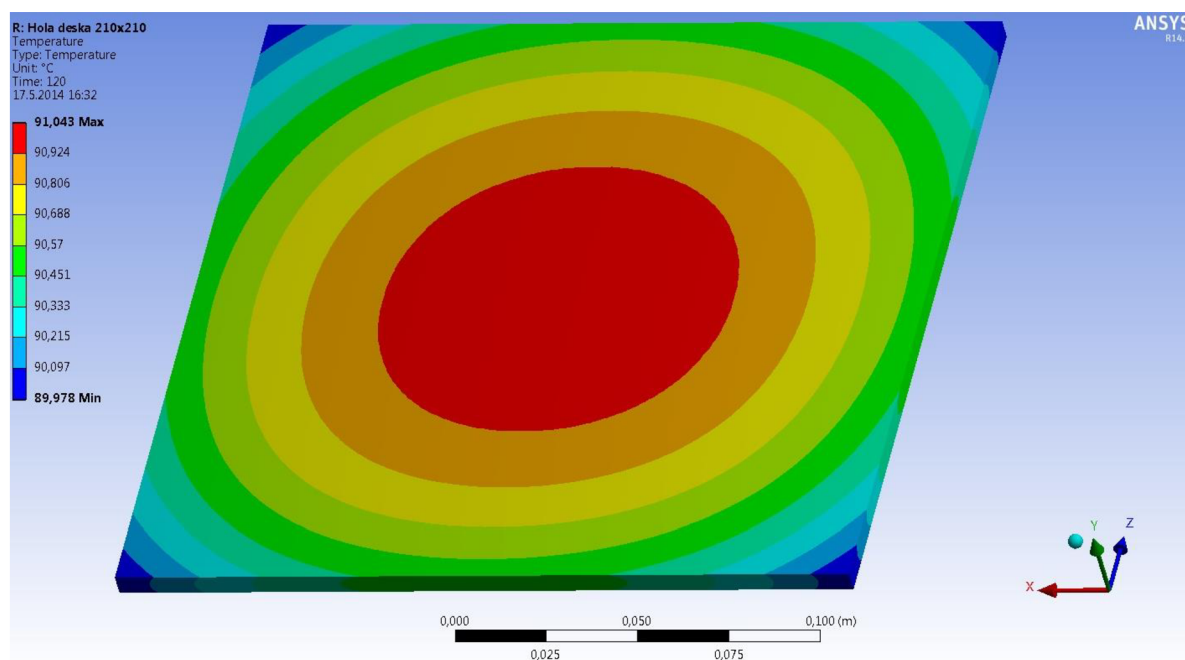
Ve skutečnosti se PCB deska využívá pouze u materiálů, které nepotřebují povrch vyhřátý na více než 100 °C , jelikož je velmi obtížné vyhřát desku na vyšší teploty kvůli rychlému ochlazování vlivem okolí. Pro dosažení vyšších teplot je zapotřebí izolovat desku od vnějších vlivů, nebo je třeba okolí desky vyhřát na vyšší teplotu. To se v praxi dělá tak, že se celá tiskárna uzavře do izolované soustavy, například do izolované krabice.

3.2 Vyhřívání desky pomocí topných tělísek

V případě vyhřívání desky pomocí topných tělísek je problém o něco komplexnější. Nejdříve je důležité si uvědomit, jak se teplo v desce šíří a jak je rozloženo. Z toho lze odhadnout, jaké by měly být jejich parametry a rozložení.

3.2.1 Šíření tepla v desce

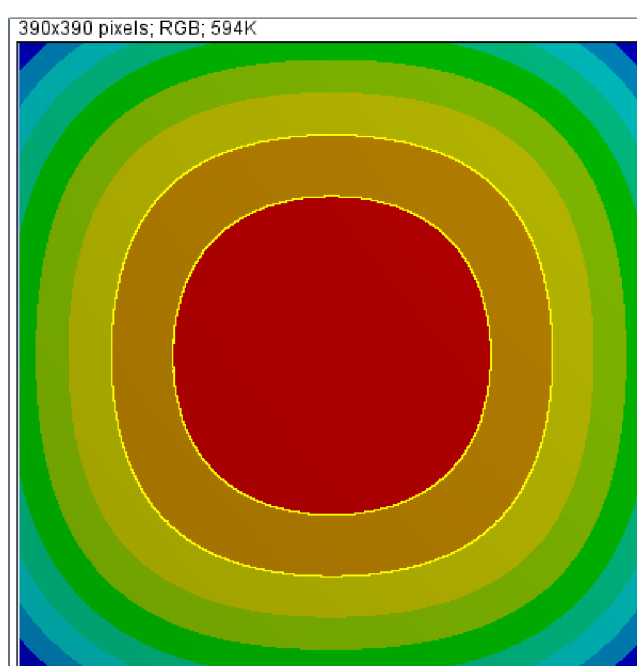
Abychom zjistili, jaké je správné množství rezistorů na desce, je třeba nejdříve zjistit, kolik tepla je potřebné do desky dodat aby nechladla. To bylo provedeno tak, že se vymodelovala deska čtvercového tvaru, která odpovídala skutečným rozměrům. Materiál desky bude uvažován hliník právě kvůli svým dobrým tepelným vlastnostem. Model byl převeden do programu ANSYS. Zde se deska nechala ochlazovat okolní teplotou 20 °C z počáteční teploty 100 °C po dobu 120 sekund. Výsledné rozložení teplot je znázorněno na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Teplotní rozložení desky. Červená barva značí oblast s nejvyšší teplotou ($91,043\text{ °C}$), modrá barva značí oblast s nejnižší teplotou ($89,978\text{ °C}$). Barevná škála optimalizována pro výpočet.

Z obrázku 3.3 je patrné, že deska nejrychleji chladne v rozích a okrajích, naopak nejpomaleji chladne ve středu. Výpočet odvodu tepla z desky lze provést následovně, musí být určeny velikosti ploch daných barev, vypočítat jejich hmotnost a poté vypočítat odvod tepla pro každou barvu zvlášť. Součtem dílčích odvodů tepla je získáno celkové odvedené teplo.

Velikosti ploch je možné zjistit pomocí programu ImageJ [35]. Zde je obrázek 3.4 transformován do bitmapy a oříznut. Ze získané vybrané oblasti je možné vybrat oblast dané barvy tak, jak je znázorněno na obrázku 3.5. Obrázek modelu o velikosti $(210 \times 210) \text{ mm}^2$ je tvořen (390×390) pixely. Vybráním oblasti stejné barvy lze zjistit počet pixelů, kterými je oblast tvořena a zpětně převést na obsah povrchu.



Obrázek 3.5: Vybraná tmavě oranžová oblast v programu ImageJ. V levém horním rohu je velikost celé desky v pixelech.

Hmotnost vybrané plochy lze vypočítat z velikosti naměřené plochy, tloušťky použité desky a hustoty materiálu

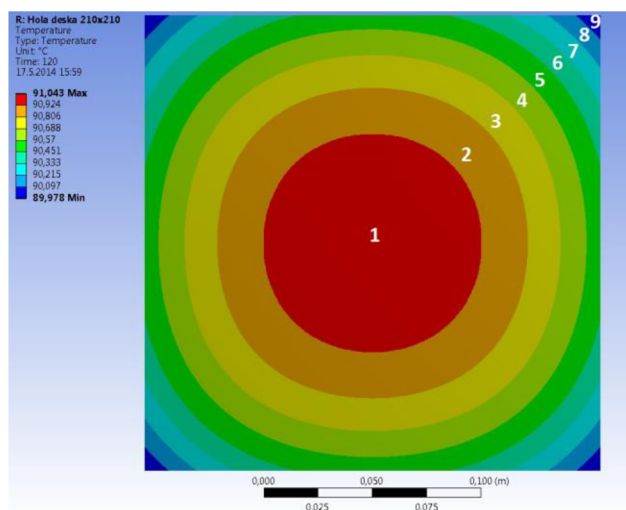
$$m_i = S_i \cdot t \cdot \rho \quad (3.8)$$

kde m_i je hmotnost i -té oblasti, S_i je plocha i -té oblasti, t je tloušťka desky (6mm) a ρ je hustota hliníku ($2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Odebrané teplo Q pro každou barvu plochy lze vypočítat dle vzorce

$$Q_i = m_i \cdot c \cdot (T_i - T_1) \quad (3.9)$$

kde Q_i je teplo i -té oblasti, m_i je hmotnost i -té oblasti, c je měrná tepelná kapacita hliníku ($896 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T_i je teplota i -té oblasti a T_1 počáteční teplota ($100 \text{ }^\circ\text{C}$).

Teplotou T_i bude uvažována hodnota, která odpovídá aritmetickému průměru maximální a minimální teploty vybrané oblasti. Na obrázku 3.6 jsou číslovány jednotlivé barevné oblasti a v tabulce 3.2 jsou k nim uvedeny odpovídající hodnoty.



Obrázek 3.6: Barevné oblasti s číselným označením.

Barevná oblast	Teplota T_i [°C]	Plocha S [mm ²]	Hmotnost m_i [kg]	Teplo Q_i [J]
1	90,984	8068,8	0,131	-1084,3
2	90,865	8465,1	0,137	-1152,5
3	90,747	7865,2	0,127	-1084,7
4	90,629	7371,3	0,119	-1029,5
5	90,511	6344,0	0,103	-897,2
6	90,392	3020,2	0,049	-432,5
7	90,274	1626,7	0,026	-235,8
8	90,156	794,6	0,013	-116,6
9	90,038	231,7	0,004	-34,4

Tabulka 3.2: Naměřené a vypočítané hodnoty barevných oblastí.

Znaménko mínus u tepla Q značí, že teplo desky bylo okolím odebráno. Součtem všech hodnot Q_i lze získat celkové odebrané teplo Q_c , tedy

$$Q_c = \sum_{i=1}^{i=9} Q_i = -6067,5 \text{ J} \quad (3.10)$$

Vydělením celkového tepla Q_c časem t , který odpovídá době ochlazování desky, se získá hodnota celkového tepelného toku Φ , tedy

$$\phi = \frac{Q_c}{t} = \frac{-6067,5}{120} = -50,6 \text{ W} \quad (3.11)$$

Z výsledku vyplývá, že nejnižší dodávaný výkon při teplotě 100 °C musí být 50,6 W, aby deska zůstala na konstantní teplotě a neochlazovala se vlivem okolí.

3.2.2 Topná tělíska a jejich rozmístění

V předchozí kapitole bylo vypočítáno, že nejmenší hodnota dodávaného výkonu musí být 50,6 W pro 100 °C. To platí v případě, že není požadováno desku vyhřívat na vyšší teploty. Jelikož cílem vyhřívání stolku je dosahovat vyšších teplot, musí být dodávaný výkon vyšší, než je vypočítaná hodnota. Dostatečný tepelný výkon je zajištěn tak, že se na desku připevní tepelná tělíska. Ty jsou zastoupeny v podobě rezistorů. Průchodem proudem se rezistory ohřívají, a tím poskytují dostatečné množství tepla. Požadavkem návrhu je homogenní rozložení tepla a nízká tepelná diference na desce, proto je potřeba navrhnout rozložení rezistorů s přihlédnutím k výsledkům v tabulce 3.2.

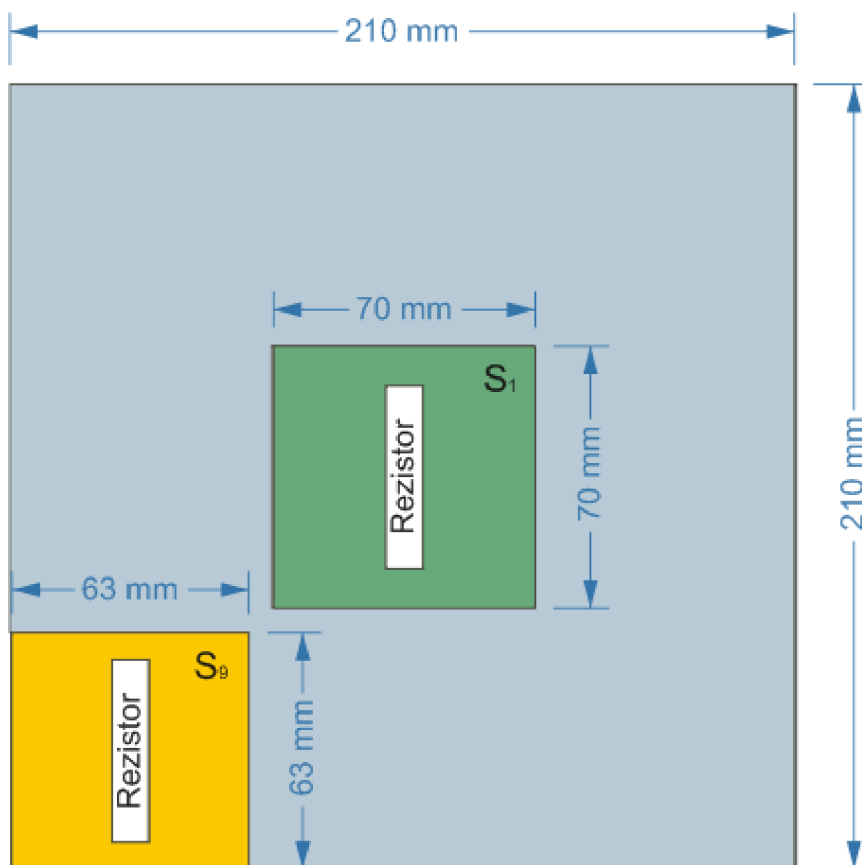
Barevná oblast	Teplota T_i [°C]	Plocha S [mm ²]	Teplo Q_i [J]	Tepelný tok φ [W]	Hustota tepelného toku φ [W.m ⁻²]
1	90,984	8068,8	-1084,3	-9,036	-1119,849
2	90,865	8465,1	-1152,5	-9,604	-1134,567
3	90,747	7865,2	-1084,7	-9,039	-1149,223
4	90,629	7371,3	-1029,5	-8,579	-1163,878
5	90,511	6344,0	-897,2	-7,477	-1178,596
6	90,392	3020,2	-432,5	-3,604	-1193,314
7	90,274	1626,7	-235,8	-1,965	-1207,969
8	90,156	794,6	-116,6	-0,972	-1222,625
9	90,038	231,7	-34,4	-0,287	-1237,343

Tabulka 3.3: Naměřené a vypočítané hodnoty doplněno o tepelný tok a hustotu tepelného toku.

Z tabulky 3.3 je patrné, že hustota tepelného toku v chladnější oblasti, která odpovídá kraji desky, je vyšší než ve středu desky. To znamená, že na krajích desky je potřeba dodávat vyšší tepelný výkon než ve středu desky. Poměrem hustoty tepelného toku na krajích desky a ve středu desky je získána hodnota odpovídající poměru rozložení, tedy

$$\frac{\varphi_1}{\varphi_9} \cdot 100 = \frac{-1119,85}{-1237,34} \cdot 100 = 90,5 \% \quad (3.12)$$

Výslednou hodnotu lze interpretovat na obrázku 3.7. Zde jsou znázorněny dva totožné rezistory umístěné ve středu a na kraji desky. Pro každý rezistor je barevně vyznačena oblast kterou musí vyhřívat. Zelená plocha S_1 je téměř o 10 % větší než žlutá plocha S_9 .



Obrázek 3.7: Deska s rezistory umístěnými ve středu a na kraji. Barevně vyznačené oblasti S_1 a S_9 , přičemž plocha S_1 je o téměř 10% větší než plocha S_9 .

Výsledek z rovnice 3.12 lze vysvětlit i opačně. Ve středu desky je potřeba 90 % tepelného výkonu rezistoru než na kraji desky. Z toho vyplývá, že rozmístění rezistorů bude hustější na krajích desky.

3.2.3 Volba rezistorů a jejich porovnání

V této kapitole jsou rozebrány typy rezistorů a jejich uložení pro požadavek homogenního vyhřátí desky. Pro porovnání jsou zde uvažovány pouze metaloxidový rezistor tvaru válce a drátový rezistor ve tvaru hranolu. Oba rezistory mají stejné charakteristiky, tedy odpor rezistoru je $0,22 \Omega$, povolené zatížení je 10 W a izolační vrstva je z keramiky. Metaloxidový rezistor je 51 mm dlouhý a jeho průměr je 8 mm . Drátový rezistor má rozměry $(49 \times 10 \times 9) \text{ mm}^3$. Na obrázku 3.8 jsou ilustračně znázorněny oba typy rezistorů.



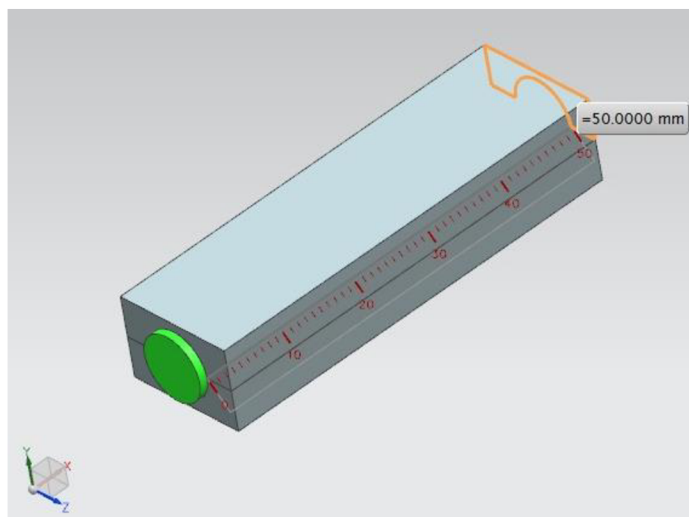
Obrázek 3.8: Vlevo drátový rezistor [36]. Vpravo metaloxidový rezistor [37].

Rezistor hranolovitého tvaru lze připevnit například pomocí lepidla přímo na desku. U válcového rezistoru je potřeba vyrobit pouzdro, do kterého je rezistor vložen a to se musí připevnit na desku stolu. Pouzdro přináší další komplikace, jak s výrobou, tak s přenosem tepelné energie. Problém s výrobou pouzdra se dá vyřešit poměrně snadno koupí rezistoru, který je již v pouzdře usazen viz. obrázek 3.9. Je potřeba počítat s velkými tepelnými ztrátami, protože teplo neprochází přímo do desky, ale musí nejdříve projít materiálem chladiče a poté až do materiálu desky.



Obrázek 3.9: Drátový rezistor v kovovém pouzdře [38].

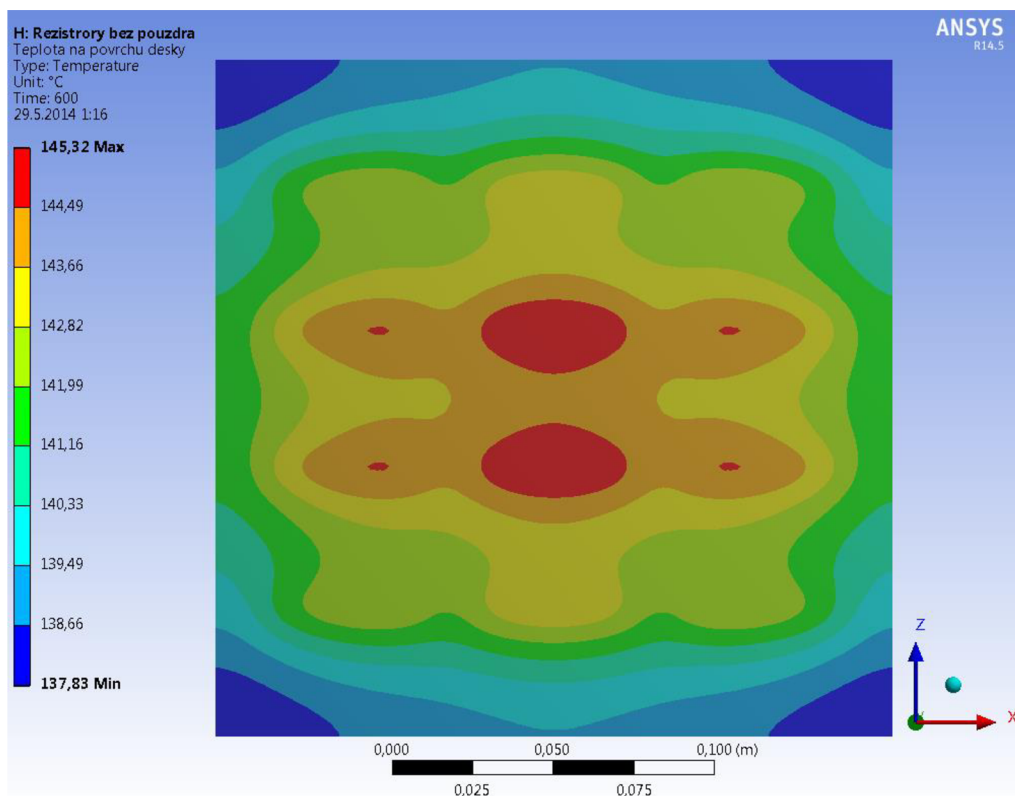
Z důvodu porovnání obou rezistorů byly vytvořeny dva modely. Sestava s rezistorem v pouzdře se skládala ze dvou totožných částí. Délka pouzdra je 50 mm, šířka pouzdra je 15 mm a výška je 5 mm, přičemž ve středu pouzdra je podélná drážka poloměru 4 mm pro vložení válcového rezistoru. Na obrázku 3.10 je znázorněna sestava přípravku a válcového rezistoru.



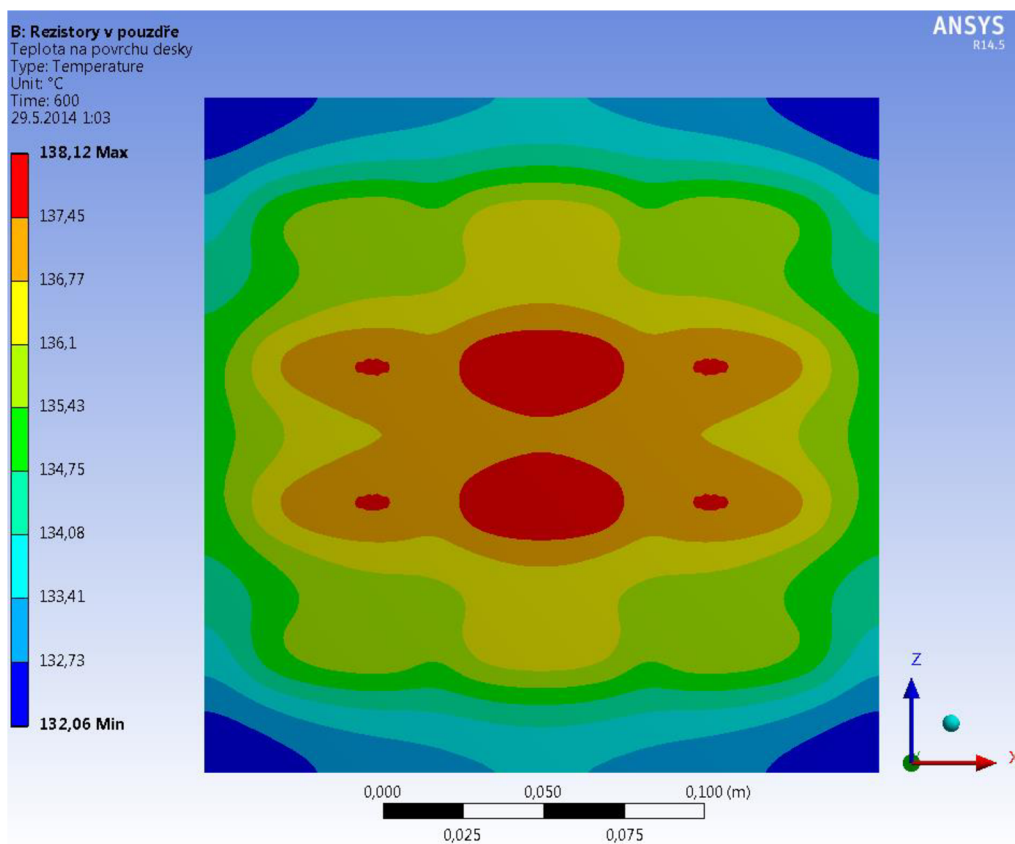
Obrázek 3.10: Sestava přípravků a válcového rezistoru.

Na obrázku 3.11 a 3.12 jsou znázorněny simulace teplotního rozložení na desce pro oba případy, tedy porovnání vedení tepla při uložení metaloxidového odporu v pouzdře a přímo nalepeného drátového rezistoru.

Počátečními podmínkami simulací byla délka ohřevu 600 s, počáteční teplota a teplota okolí 20 °C, tepelný výkon rezistorů 20 W a přirozená konvekce prostředí 10 W.m⁻².K⁻¹ pro všechny vnější plochy desky. Počet rezistorů byl zvolen 12. Rezistory byly rozmístěny rovnoměrně po třech ve čtyřech řadách po celé ploše desky.



Obrázek 3.11: Teplota na povrchu desky. Deska vyhřívána rezistory bez pouzdra.



Obrázek 3.12: Teplota na povrchu desky. Deska vyhřívána rezistory v pouzdře.

Porovnáním teplot na obrázku 3.11 a 3.12 lze určit, že vyhřívání pomocí drátového rezistoru připevněného přímo na desku stolu je tepelně výhodnější, než vyhřívání pomocí rezistoru umístěného uvnitř pouzdra. Výsledek odpovídá předpokladu, že vedením tepla přes pouzdro bude docházet k tepelným ztrátám. Další nevýhodou tohoto typu umístění rezistoru do pouzdra je jeho plocha, která je mnohem větší, než samotného rezistoru. Podle vzorce 2.21 platí, že čím větší je plocha, tím více tepla se vyzáří do okolí. Zlepšení tepelné vodivosti by mohlo být docíleno zvětšením styčných ploch mezi válcovým rezistorem a vyhřívanou deskou.

3.2.4 Návrh a volba rozmístění vyhřívaných těles

Před simulací je nutné určit skutečnou hodnotu výkonu, který bude do obvodu dodáván. Ten lze vypočítat pomocí celkového odporu, který je v obvodu. V předchozí simulaci bylo uvažováno o maximálním počtu 12 rezistorů. Celkový počet je dán konstrukčními důvody, neboť zvolené rezistory jsou poměrně veliké. V modelu nejsou znázorněny vodiče, které z rezistorů vedou. Úvaha nebude zahrnovat odpor vodiče. Byl zvolen rezistor s hodnotou odporu $0,22 \Omega$.

Nyní je možné vypočítat celkový odpor v obvodu. Jelikož jsou uvažovány rezistory se stejnou hodnotou odporu, obecné vzorce se ještě více zjednoduší. První možnost zapojení vodičů je zapojení rezistorů do série, kde se celkový odpor vypočítá

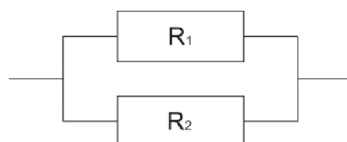
$$R_s = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i \Rightarrow R_s = n \cdot R_1 \quad (3.12)$$



Obrázek 3.13: Seriové zapojení rezistorů.

Další možností je zapojení rezistoru paralelně

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \Rightarrow R_p = \frac{R_1}{n} \quad (3.13)$$



Obrázek 3.14: Paralelní zapojení rezistorů.

Pro testování byl poskytnut 24 V zdroj s výkonem 300 W. Ze známých hodnot zdroje lze pomocí rovnice 3.2 vypočítat nejnížší možnou hodnotu odporu, která bude odpovídat nejvyššímu možnému výkonu. Tedy

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{24^2}{300} = 1,92 \Omega \quad (3.14)$$

Vzhledem k tomu, že jakákoliv kombinace použitých rezistorů v paralelním zapojení je nižší než $1,92 \Omega$ a kombinace paralelního a sériového zapojení není možná, jelikož by se proud v paralelním zapojení rozdělil a tím by na rezistorech byl poloviční výkon, musí být výsledné zapojení sériové. Výpočet celkového odporu je dle rovnice 3.12

$$R_S = n \cdot R_1 = 12 \cdot 0,22 = 2,64 \Omega \quad (3.15)$$

Tedy dle rovnice 3.1 celkový výkon v obvodu bude

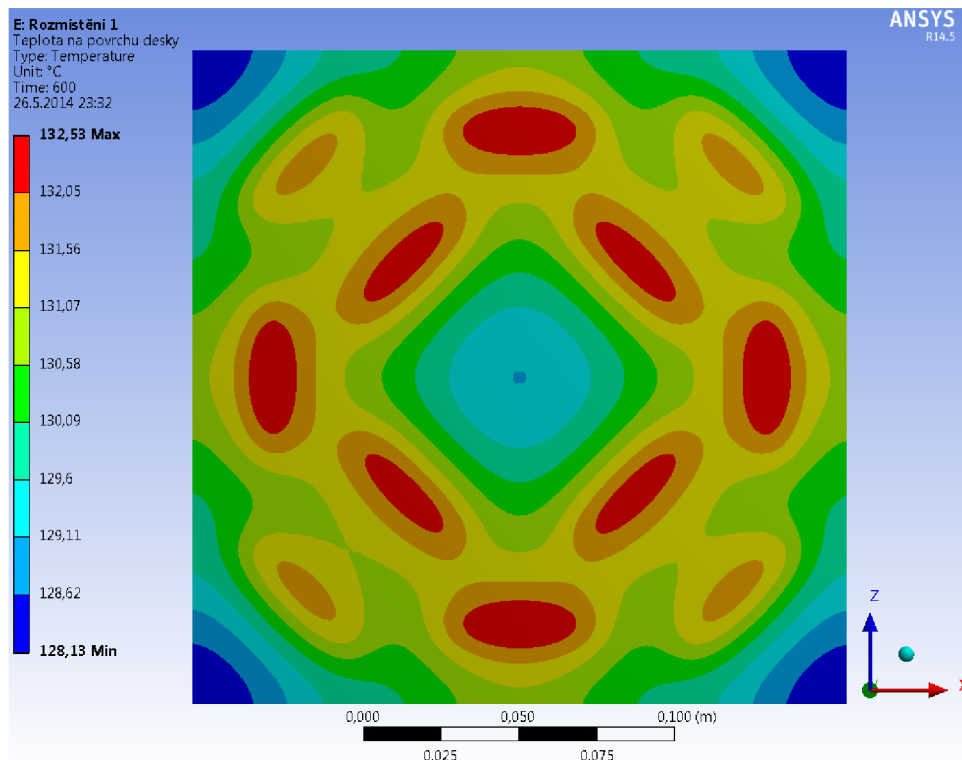
$$P_C = \frac{U^2}{R} = \frac{24^2}{2,64} = 218,2 W \quad (3.16)$$

Výkon jednoho rezistoru se vypočítá z hodnoty celkového výkonu vydělený počtem rezistorů, tedy

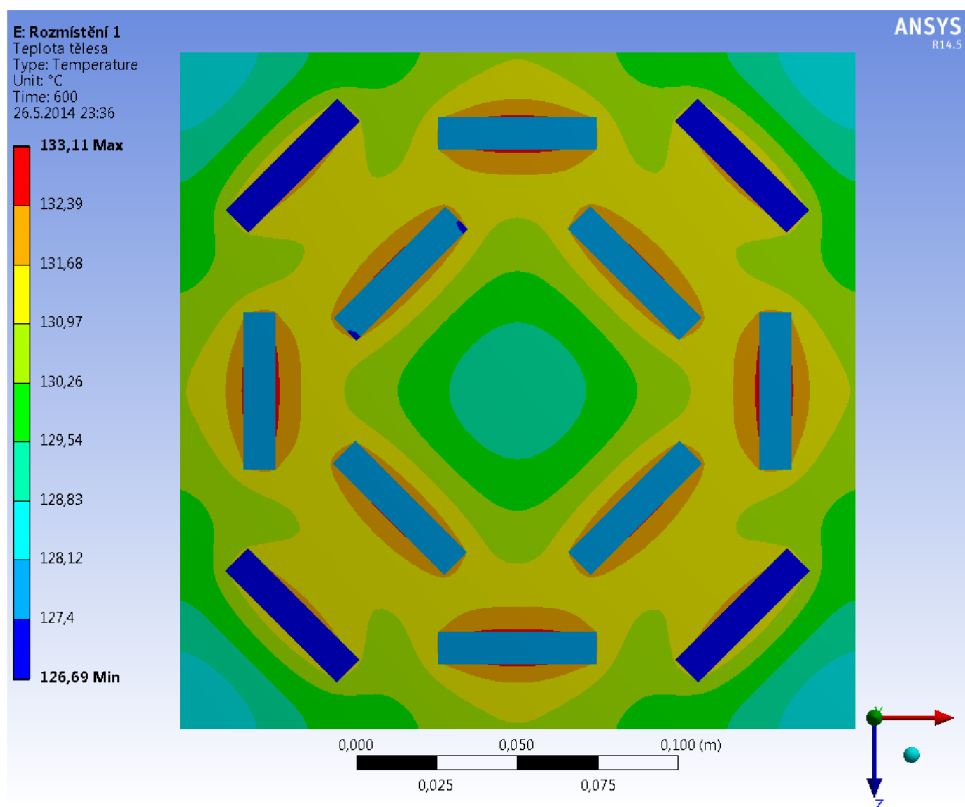
$$P_R = \frac{P_C}{12} = \frac{218,2}{12} = 18,2 W \quad (3.17)$$

Výsledky byly použity pro nastavení skutečných počátečních podmínek v simulaci ANSYS. Hodnota celkového výkonu rezistorů z rovnice 3.16 odpovídá podmínce celkového dodávaného výkonu z rovnice 3.11. Celkový výkon je přibližně čtyřikrát vyšší než je výkon desky při ochlazování ze $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Také bylo zjištěno, jaké by mělo být přibližné rozmístění rezistorů, aby se zachovala homogenita tepelného pole a byla dodržena co nejnižší tepelná diference. Po několika simulacích rozmístění rezistorů od sebe vyplynulo, že nejlepe podmínku rovnoměrného ohřevu desky splňuje rozmístění rezistorů do pomyslných kružnic.

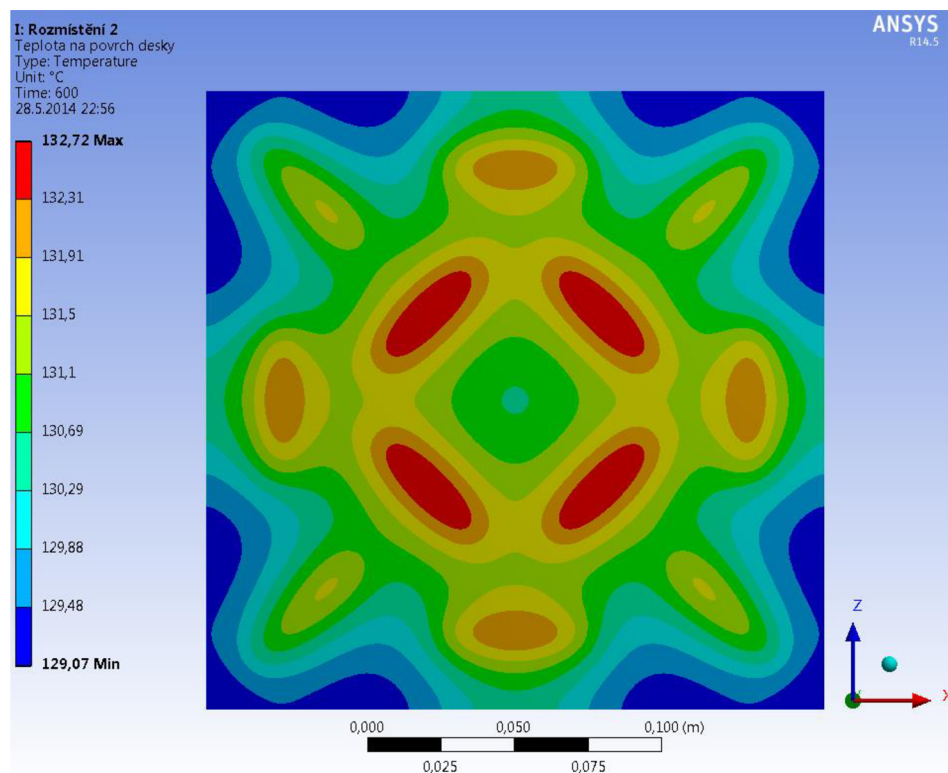
Aby bylo možné určit poloměry kružnic s využitím výsledku z kapitoly 3.2.2 byla celková plocha desky rozdělena na tři plochy stejných obsahů. Obsah první plochy byl zvětšen o 10%, druhé zmenšen o 10% a třetí zůstal nezměněn. Z těchto obsahů byly určeny poloměry pro každou plochu s tím, že z prvního nejmenšího obsahu plochy byl aproximací vypočítán poloměr z plochy kruhu a další poloměry se získaly aproximací z výpočtu plochy mezikruží. V případě mezikruží, kde byl získán vnější poloměr kružnice byla pomyslná kružnice vybrána uprostřed vnitřní a vnější kružnice. Pro případ kruhu byla pomyslná kružnice zvolena na vypočítaném poloměru kružnice. Tato úvaha nebyla správná a proto byla pomyslná kružnice posunuta do $2/3$ poloměru. Výsledné rozmístění rezistorů je na obrázku 3.20.



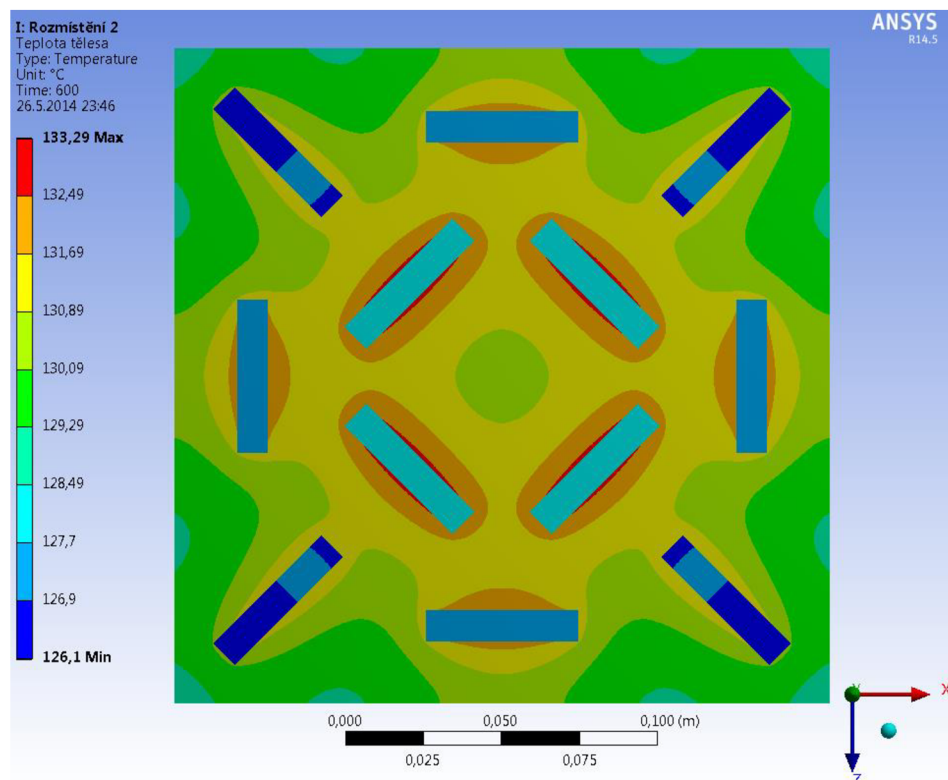
Obrázek 3.15: Teplotní rozložení rezistorů umístěných do kružnice. Teplota na povrchu desky.



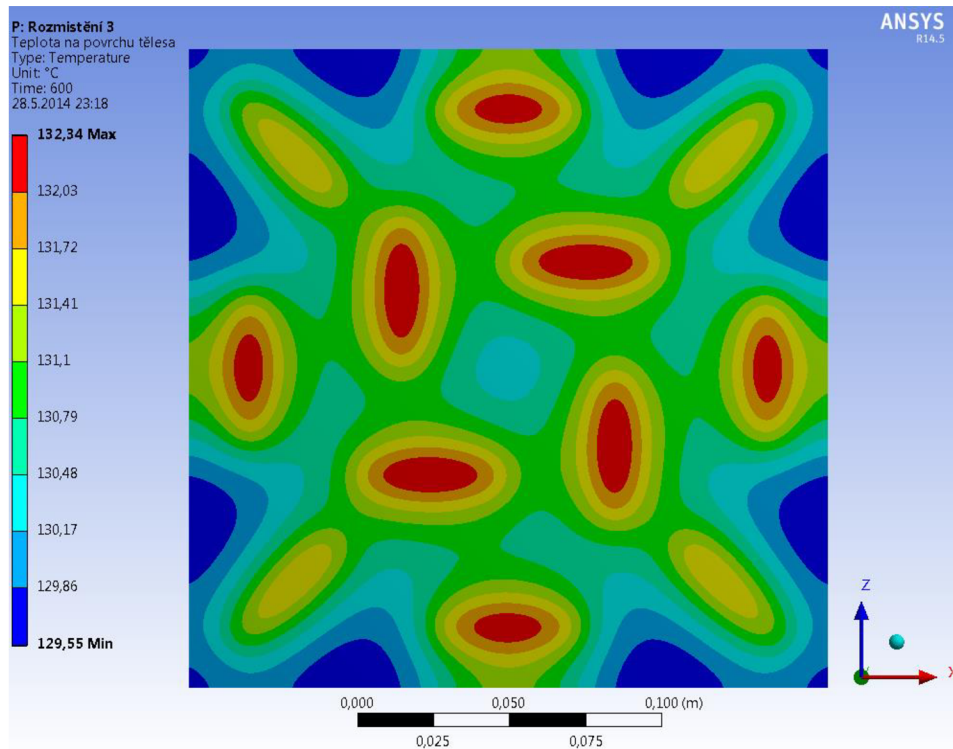
Obrázek 3.16: Teplotní rozložení rezistorů umístěných do kružnice. Teplota celého tělesa.



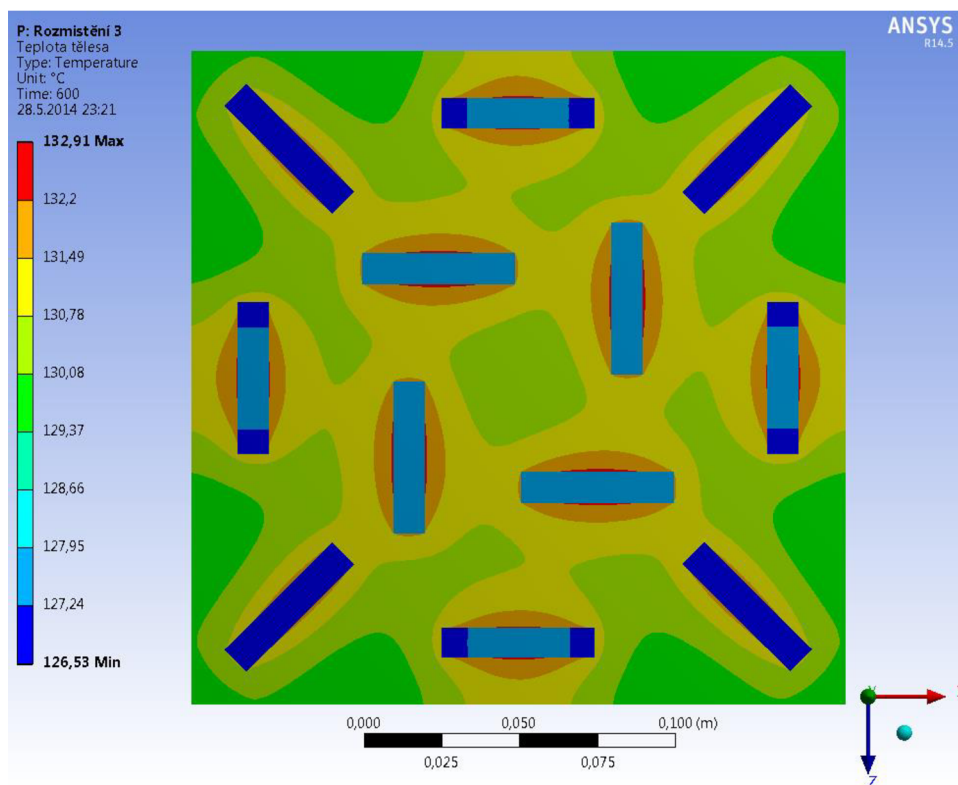
Obrázek 3.17: Teplotní rozložení rezistorů umístěných do kružnice. Teplota na povrchu desky. Vnitřní kružnice posunuta do $2/3$ poloměru původní kružnice. Rezistory umístěny v rozích pootočený.



Obrázek 3.18: Teplotní rozložení rezistorů umístěných do kružnice. Teplota celého tělesa. Vnitřní kružnice posunuta do $2/3$ poloměru původní kružnice. Rezistory umístěny v rozích pootočený.



Obrázek 3.19: Teplotní rozložení rezistorů umístěných do kružnice. Teplota na povrchu desky. Rezistory umístěné ve středu desky pootočený.



Obrázek 3.20: Teplotní rozložení rezistorů umístěných do kružnice. Teplota celého tělesa. Rezistory umístěné ve středu desky pootočený.

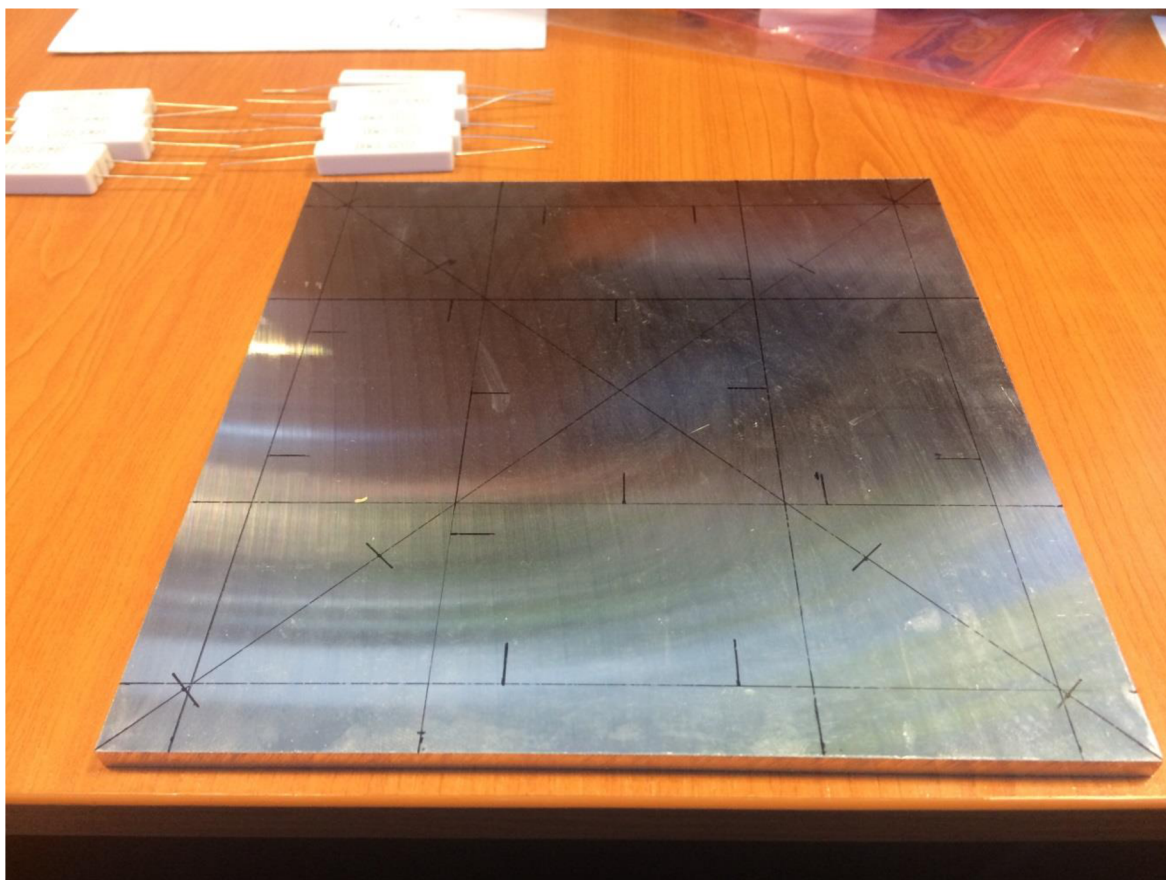
Z výsledků je patrné, že úvaha o rozmístění rezistorů do kružnic je správná a vede ke vhodnému řešení úlohy. Důležitým faktorem ovlivňující tepelné pole je pootočení rezistorů. To vedlo ke zlepšení tepelné difference na povrchu desky. V posledním případě, na obrázku 3.19 a 3.20, je teplotní difference pouhé 2,8 °C. Deska má nejvyšší teploty na uhlopříčkách. To je značná výhoda při tisku velkých součástí, kdy je využíváno i krajních poloh desky. Jako nejvhodnější rozmístění rezistorů bylo vybráno uložení z obrázku 3.20.

4 SESTAVENÍ STOLKU A JEHO TESTOVÁNÍ

V této kapitole bude rozebrán postup sestavení stolku a jeho otestování. Budou zde uvedeny naměřené hodnoty teplot, které budou porovnány s hodnotami ze simulace v programu ANSYS.

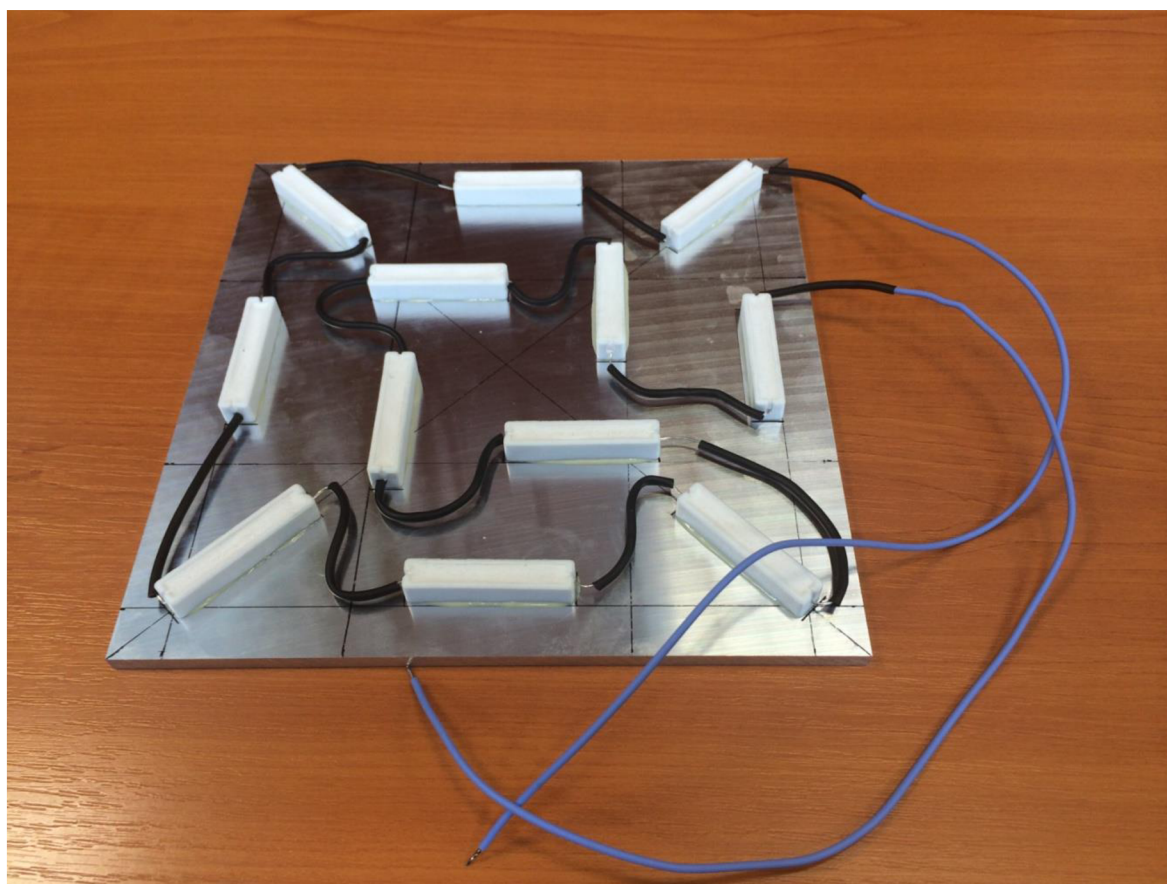
4.1 Sestavení stolku

Dle výsledků simulací byl navržen a následně vyroben prototyp desky. Na obrázku 4.1 je fotografie desky s vyznačenými místy pro umístění rezistorů.



Obrázek 4.1: Deska s vyznačenými místy pro umístění rezistorů

Do těchto míst byly nalepeny rezistory pomocí dvousložkového epoxidu EP21TCHT-1 od firmy Master Bond [39]. Tento epoxid má dobrou tepelnou vodivost a je odolný vůči vysokým teplotám. Po vytvrnutí lepidla bylo možné rezistory zapojit do série a spoje zakrýt ochrannou izolací. Na konce rezistorů se připojily dva vodiče, které byly připojeny ke zdroji. Výsledná deska se zapojenými rezistory je zobrazena na obrázku 4.2.

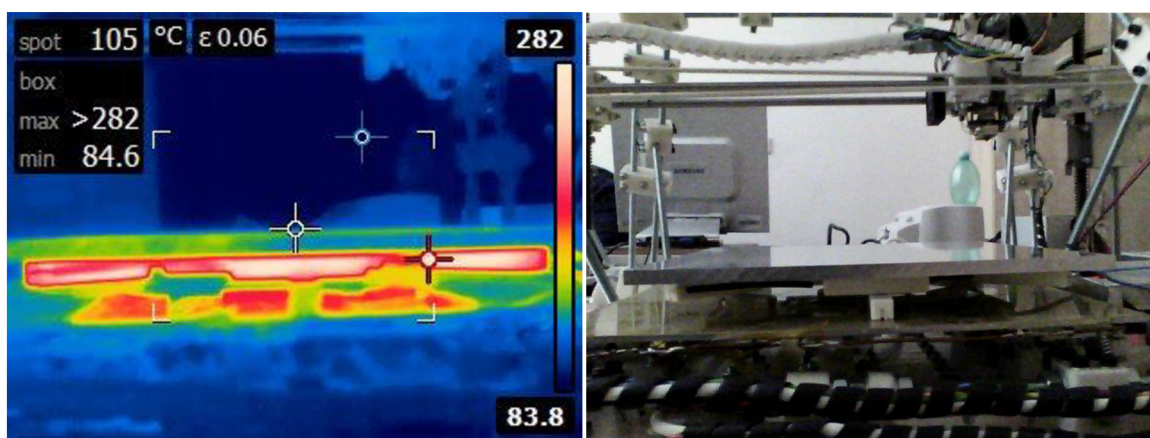


Obrázek 4.2: Výsledný vyhřívaný stůl pomocí drátových rezistorů

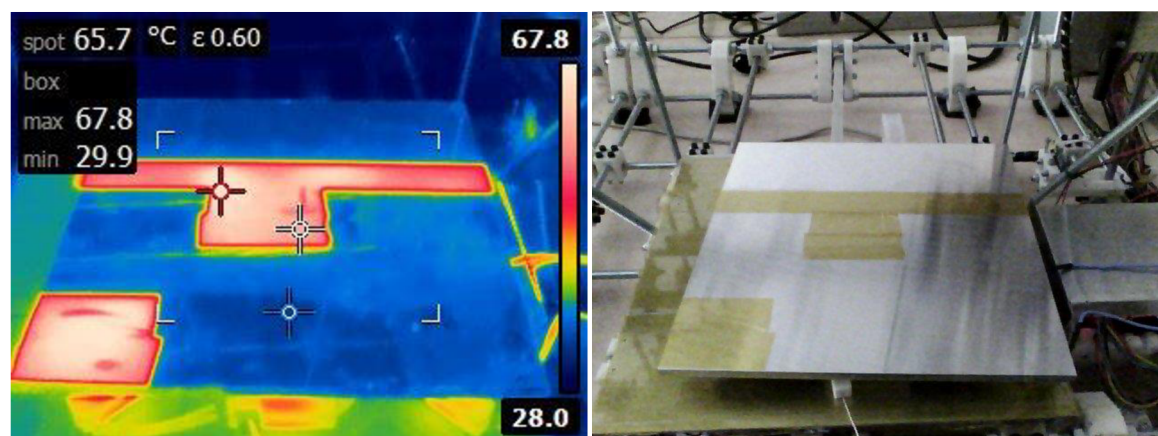
4.2 Testování tepelného stolku

Vyhřívaný stolek byl umístěn do prostoru tiskárny na keramické bloky, viz obrázek 4.3, aby se minimalizoval přenos tepla do podstavce. Po připojení stolku ke zdroji a kontrole všech částí se prostřednictvím programu Repsnapper [40] spustilo vyhřívání stolku. Po uplynutí přibližně pěti minut, kdy bezdotykový snímač ukazoval stále stejnou teplotu okolo 35 °C, bylo fyzickým kontaktem otestováno, zda vyhřívání stolku funguje. Pocitová teplota stolku však byla mnohem vyšší, a proto se měření ukončilo. Problém v měření teploty termokamerou byl ten, že emisivita hliníku je velmi nízká, v rozmezí mezi $\varepsilon = 0,05 \div 0,07$. I když byla hodnota emisivity snímání pro termokameru nastavena na nejnižší možnou hodnotu tj. $\varepsilon = 0,06$ nebyla kamera schopná změřit teplotu desky. Což je znázorněno na obrázku 4.3.

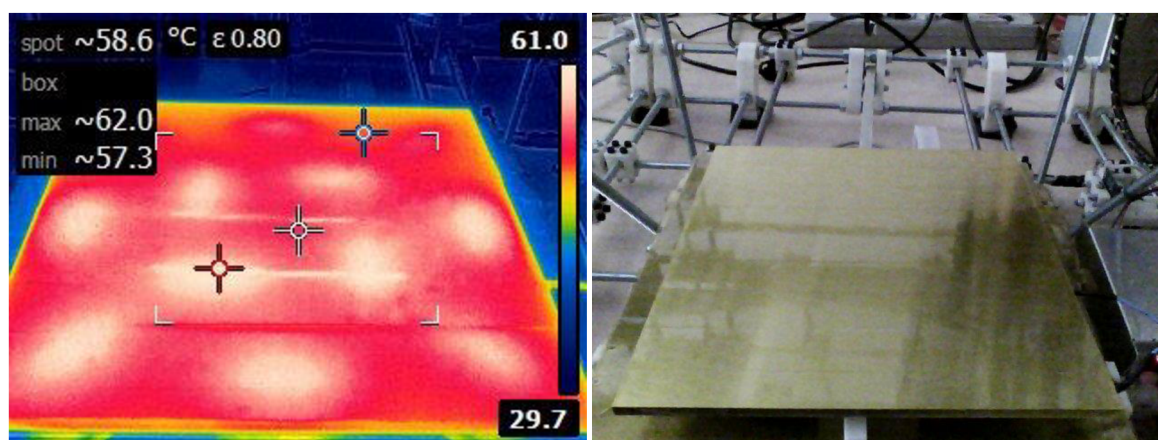
Pro zvýšení emisivity byla po vychladnutí stolku na horní povrch desky nalepena páska Kapton [41], která se kvůli své vysoké tepelné odolnosti často používá v elektroprůmyslu na ochranu kontaktů při pájení elektronických desek a dalších vysokoteplotních aplikacích [41]. Nejprve byly na desku nalepeny dva čtverce. Jeden ve středu desky a druhý v rohu desky. Pro zjištění, jestli bude možné pomocí termokamery zaznamenat rozdílné teploty, se ještě po celé délce desky nalepil pruh pásky, tak jak je zobrazeno na obrázku 4.4. Po kladném výsledku testování, byla celá horní plocha desky pokryta páskou Kapton. Na obrázku 4.5 je znázorněn snímek pořízený během měření.



Obrázek 4.3: Na obrázku je v levo snímek v infračerveném spektru, nastavená emisivita snímání $\varepsilon = 0,06$. Povrch desky nevykazuje žádnou zvýšenou teplotu. Teplota rezistorů je přibližně 180°C . Hodnoty teploty na obrázku vlevo jsou zkrácené, právě nastavenou hodnotou emisivity. Na obrázku vpravo stejný snímek ve viditelném spektru.



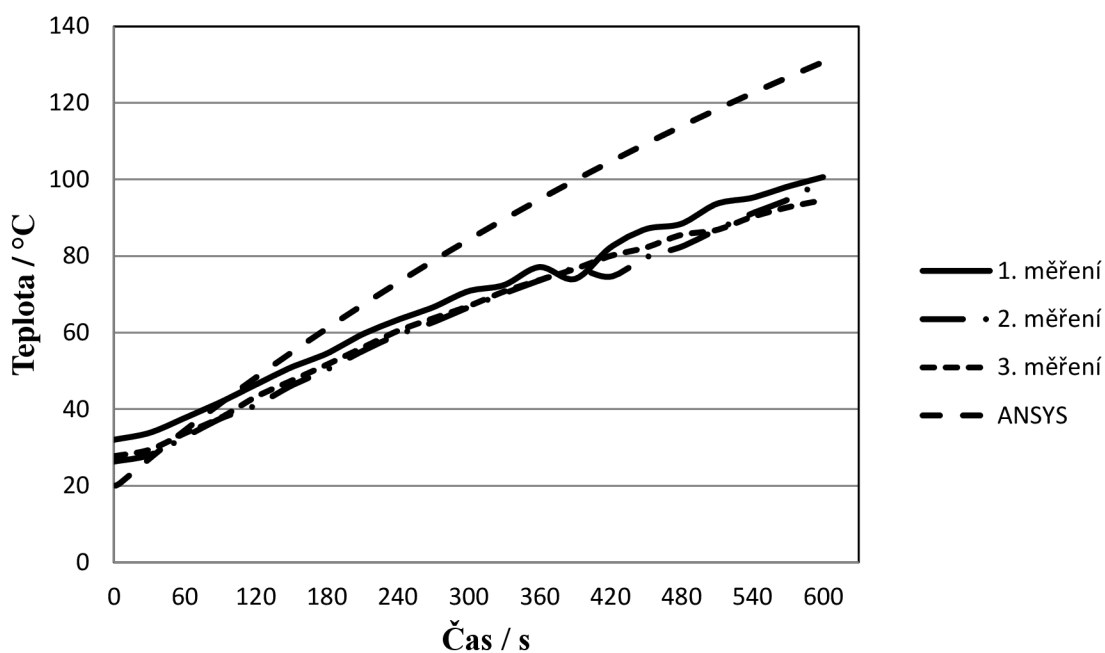
Obrázek 4.4: Na obrázku je vlevo snímek v infračerveném spektru, nastavená emisivita snímání $\varepsilon = 0,60$. Je zde patrné, že teplota desky se projevuje pouze na polepené ploše. Na obrázku vpravo stejný snímek ve viditelném spektru. Ve středu desky a v rohu jsou polepeny plochy, jako kontrolní body pro odečítání hodnoty teploty.



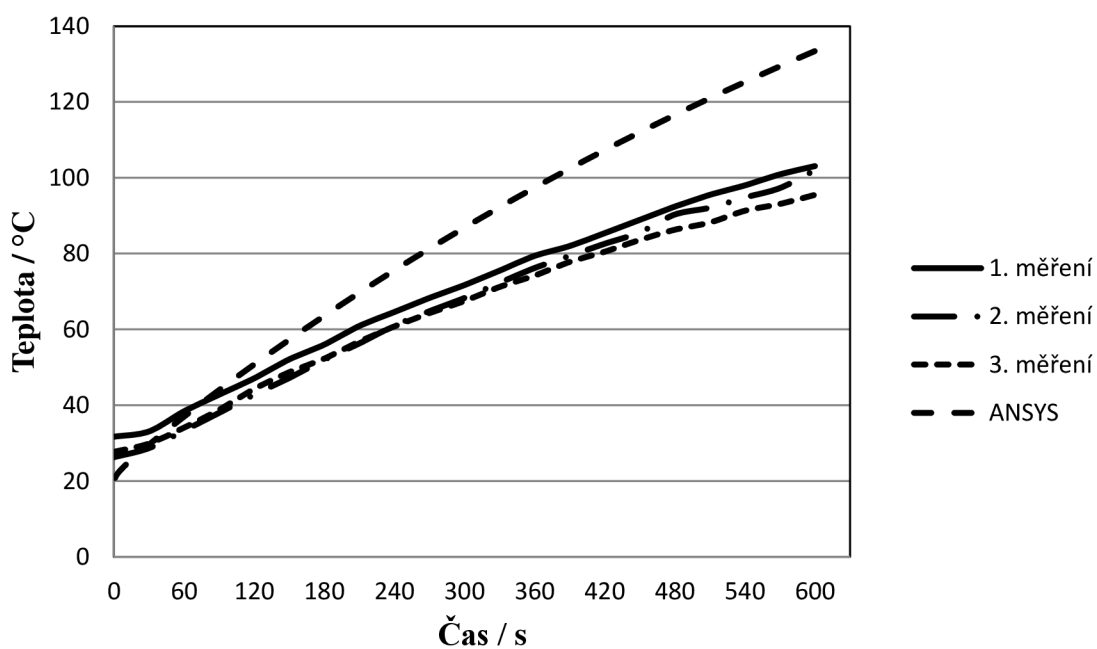
Obrázek 4.5: Na obrázku je vlevo snímek v infračerveném spektru, nastavená emisivita snímání $\varepsilon = 0,80$. Na desce jsou viditelné teplejší a chladnější oblasti. Je zde patrné rozmístění rezistorů. Na obrázku vpravo stejný snímek ve viditelném spektru. Celá plocha desky polepená páskou Kapton.

4.3 Naměřené hodnoty a porovnání s výsledky ze simulace v ANSYS

Byla provedena tři měření. U každého měření se teploty odečítaly ve středu desky a na jednom z rohů desky. První dvě probíhala pouze na vybraných čtvercích viz. obrázek 4.4. Třetí měření probíhalo na celé polepené desce, avšak místa snímání teploty byla stejná, jako v předcházejících měřeních. Před každým měřením byla deska ochlazena proudem tekoucí vody. Počáteční teplota je odlišná z důvodu nedostatečného schlazení desky před začátkem jednotlivých měření. V grafech jsou znázorněny výsledky z programu ANSYS.



Graf 4.1: Teplota desky v závislosti na čase. Teplota měření v rohu desky.



Graf 4.2: Teplota desky v závislosti na čase. Teplota měření ve středu desky.

Z obou grafů je patrné, že výpočetní model během stejného času má vyšší teplotu, než skutečně naměřené hodnoty. Za dobu 10 minut skutečný model dosáhl teploty 100°C a v simulaci bylo teploty dosaženo přibližně za 7 minut. To, že se teploty takto liší mohlo být ovlivněno několika faktory. Jednou z možností je, že v teoretickém modelu je uvažován prostup tepla mezi deskou a vyhříváním tělesem jako přímý kontakt a není zde přihlédnuto k vlivu pojiva mezi těmito prvky. Další nepřesnost mohla vzniknout vlivem Kapton pásky, která je na povrchu desky a měla by být uvažována jako tepelný izolant. Drobné odlišnosti také mohly být zapříčiněny nepřesností měřidla. Pro přesnější odečítání teploty mělo být použito termistoru, který by byl umístěn v měřených lokacích. Při testování však nebyl k dispozici a vyžadovalo by to složitou demontáž původního zařízení.

V grafu 4.1 jsou patrné výchylky u naměřených hodnot. Ty vznikly vlivem smímání teploty v oblasti, kde se nacházel rezistor. Malé odchylky od místa odečítání teploty měly poměrně velký vliv na naměřenou teplotu. V grafu 4.2 se již tyto výchylky téměř nevyskytují. V tabulce 4.1. jsou uvedeny hodnoty teploty stolku na konci měření. Odečtením teploty ve středu desky a v rohu desky je získána teplotní diference. Pro naměřené hodnoty je maximální rozdíl 2,5 °C a pro simulaci odpovídá rozdíl teplot hodnotě 2,9 °C. Prototyp stolku je tedy tepelně stabilnější než bylo vypočítáno v simulaci.

Čas 600s	Teplota v rohu [° C]	Teplota ve středu [° C]
1. měření	100,6	103,1
2. měření	99,6	102
3. měření	94,6	95,5
ANSYS	130,6	133,5

Tabulka 4.1: Teploty po a na konci měření

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Cílem práce bylo navrhnout optimální rozmístění topných těles za pomoci metody konečných prvků. Výsledkem je tepelně vyhřívaný stůl, na kterém je rozmístěno 12 topných tělísek v podobě rezistorů. Tato tělesa byla umístěna podle výsledku simulací provedených v programu ANSYS. Tato část práce se zabývá analýzou vyhřívaných stolků z technicko-ekonomického hlediska.

5.1 Hliníkový stůlek s drátovými rezistory, keramické

Technické parametry:

- rozměry stolku: 210 x 210 x 15mm (šířka x délka x výška)
- hmotnost: 0,8 kg
- rovinnost: $\pm 0,2\text{mm}$ na 1m délky
- maximální telota: $250^{\circ}\text{C} \div 500^{\circ}\text{C}$ (v závislosti na komponentech)
- celkový odpor: $2,64 \Omega$ (zanedbaný odpor vodičů)

Technicko-ekonomické ukazatele:

- pořizovací cena dílů: 920 Kč (v závislosti na komponentech)
- náklady na sestavení: 300 Kč (1-2 hodiny při mzdě 150Kč/h)
- náklady na údržbu: 8 Kč \div 72 Kč (v závislosti na počtu rezistru)

Z výčtu nákladů vyplývá celková pořizovací cena vyhřívaného stolku 1220 Kč. Reálná cena stolku byla nižší o náklady na sestavení. Při výrobě více kusů by se cena značně snížila, jelikož do pořizovací ceny dílů byla započítána pořizovací cena epoxidu, z kterého je možné sestavit až 4 stolky. Celkové náklady na jeden vyhřívaný stůlek tak vycházejí přibližně na 770 Kč. Náklady na údržbu jsou zanedbatelné.

5.2 Hliníkový stolek s drátovými rezistory v kovovém pouzdře

Technické parametry:

- rozměry stolku: 210 x 210 x 21mm (šířka x délka x výška)
- hmotnost: 1 kg
- rovinnost: $\pm 0,2$ mm na 1m délky
- maximální teplota: 250°C ÷ 500°C (v závislosti na komponentech)
- celkový odpor: 2,64 Ω (zanedbaný odpor vodičů)

Technicko-ekonomické ukazatele:

- pořizovací cena dílů: 1680 Kč (v závislosti na komponentech)
- náklady na sestavení: 300 Kč (1-2 hodiny při mzdě 150Kč/h)
- náklady na údržbu: 75 Kč ÷ 840 Kč (v závislosti na počtu rezistru)

Z výčtu nákladů vyplývá celková pořizovací cena vyhřívaného stolku 1980 Kč. Při výrobě více kusů by se cena snížila o náklady za nákup epoxidu, tak jako v případě vyhřívaného stolku s keramickými rezistory. Poměrně vysoké náklady zde představují rezistory v kovovém pouzdře. Při výrobě vlastních pouzder by se cena jednoho rezistoru pohybovala okolo 50 Kč, čímž by se výsledná cena stolku snížila na 1340 Kč.

5.3 Prusa PCB vyhříváný stolek

Technické parametry:

- rozměry stolku: 214 x 214 x 1,6 mm (šířka x délka x výška)
- hmotnost: 0,3 kg
- rovinnost: 0,015mm na 1mm úhlopříčky
- maximální teplota: 150°C
- celkový odpor: 1,2 Ω

Technicko-ekonomické ukazatele:

- pořizovací cena dílů: 900 Kč (dle kurzu a dodavatele)

V případě Prusa PCB desky si uživatel zakoupí za 900 Kč hotový výrobek, který stačí pouze zapojit ke zdroji. Další možné výdaje by mohly vzniknout dokoupením skleněné desky v hodnotě 100 Kč, která by sloužila jako podpora.

Shrnutí:

Z ekonomického hlediska, pro jeden tepelně vyhříváný stolek, se jeví jako nejvhodnější varianta nákup Prusa PCB desky. V případě sériové výroby by byla výhodnější výroba tepelně vyhříváných stolků s keramickými rezistory bez pouzdra. Pro případ poruchy je výhodnější hliníková deska, zde pouze stačí vyměnit vadný rezistor. U PCB desky je nutné zakoupit celý nový kus.

Z technického hlediska, je samotná PCB deska nevyhovující. Vlivem vlastní váhy se deska značně prohýbá, což znemožňuje správnou funkčnost tiskárny. Další nevýhodou PCB desky je nehomogenita tepelného pole. Z technického hlediska je tedy více vyhovující hliníková deska vyhřívána pomocí výkonových rezistorů.

ZÁVĚR

V předkládané diplomové práci byl řešen návrh a výroba vyhřívaného stolu pro RepRap 3D tiskárnu. Jsou diskutovány dva nejčastější typy vyhřívání vyhřívaného stolu. První typ vyhřívání je založen na desce plošného spoje (PCB), ve které je vyleptaná měděná struktura požadovaného tvaru. Vodiči prochází proud, který je zahřívá a dochází tak k vyhřívání celé desky. Druhý typ je založen na přímém zahřívání kovové desky prostřednictvím výkonových rezistorů.

Pomocí metody konečných prvků, která je implementovaná ve výpočetním prostředí ANSYS, byly modely obou typů vyhřívání simulovány. V simulaci byly uvažovány počáteční podmínky, které odpovídají reálnému provoznímu prostředí.

Pro PCB desku byla nejdříve navržena struktura drah měděného vodiče odpovídající požadovanému tepelnému výkonu. V návrhu se vycházelo z požadavku na velikost desky a z výkonu použitého zdroje. Tento model byl simulován v prostředí ANSYS s parametrem odpovídajícím hodnotě tepelného výkonu. Také bylo uvažováno reálné ochlazování prostřednictvím proudění vzduchu. Z výsledků pro PCB desku vyplývá, že není příliš teplotně homogenní. Výsledné teplotní difference nejteplejší a nejstudenější části odpovídaly rozmezí do 60 °C. Další nevýhodou je prohnutí desky, které je silně závislé na její celkové velikosti. Pro řešenou desku o velikosti (214 × 214) mm² prohnutí odpovídalo 4,5 mm. Proto se v praxi tato deska musí podpírat nebo se pokládá na jiné rovinné plochy, například sklo. V tomto případě je ovšem potřeba uvažovat úbytek tepelného výkonu na rozhraní použitých materiálů.

Další část práce řeší vyhřívání pomocí vhodných výkonových rezistorů. Požadavkem na rezistory byl dostatečný tepelný výkon určený k vyhřívání kovového stolku. Jsou diskutovány dva typy rezistorů stejných výkonových parametrů a rozdílných tvarů. První typ je rezistor válcového tvaru umístěný v kovovém pouzdře a druhý obdélníkový bez pouzdra. Z výsledků simulací je patrné, že z hlediska rychlosti vyhřívání desky jsou výhodnější rezistory bez pouzdra. U rezistorů v pouzdře dochází k tepelným ztrátám vlivem větší plochy pouzdra a také díky nepřímému kontaktu mezi deskou a rezistorem přes materiál pouzdra.

Dále bylo řešeno vhodné rozmístění rezistorů na kovové desce odpovídající rozdílnému ochlazování různých částí desky. Z výsledku simulace vyplývá, že na krajích desky je potřeba o 10 % vyšší tepelný výkon než ve středu desky. Byly navrženy tři polohy rozmístění rezistorů a porovnáním simulací byl vybrán model s nejhomogennějším tepelným rozložením. Tento model byl vyroben a otestován. Výsledky testování byly porovnány s výsledky ze simulací.

Naměřená tepelná difference prototypu byla maximálně 2,5 °C, teoretický model má tepelnou diferenci 2,9 °C. Prototyp je tedy teplotně stabilnější než teoretický model. Naopak rychlost ohřevu teoretického modelu byla vyšší než prototypu. Za čas 600 s teoretický model dosáhl teploty 133,5 °C, což bylo přibližně o 30 °C více než naměřené hodnoty prototypu. To je částečně dáno tím, že v teoretickém modelu nebyl uvažován vliv pojiva, ale přímý kontakt mezi rezistorem a deskou.

Pro budoucí řešení teoretického modelu vyhřívaného stolku by neměl být zanedbán vliv pojiva mezi deskou a rezistorem. Rovněž by bylo vhodné využít rezistorů menších rozměrů. Jejich použití a variabilnější rozmístění, by mělo vést k rychlejšímu a homogennějšímu prohřátí desky.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] RepRap. *RepRap* [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/RepRap>
- [2] BOOTHROYD, David. Replication revolutionary. *New electronics* [online]. 2006 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://fplreflib.findlay.co.uk/articles/8217%5CRevolutionary.pdf>
- [3] RepRap history. *RepRap* [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/RepRap_history
- [4] RepRapOneDarwin. SMITH, Zach. *RepRap* [online]. 2007 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/RepRapOneDarwin>
- [5] Darwin. BAILARD. *RepRap* [online]. 2008 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://reprap.org/mediawiki/images/archive/d/d8/20120131132659!All_3_axes_fd_md_sml.jpg
- [6] Mendel. *RepRap* [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Mendel>
- [7] Mendel. BOWYER, Adrian. *RepRap* [online]. 2009 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://reprap.org/mediawiki/images/1/1f/Mendel.jpg>
- [8] Huxley. *RepRap* [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Huxley>
- [9] Huxley. BRUIJN, Erik. *RepRap* [online]. 2010 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/File:Mini-Mendel2.jpg>
- [10] Prusa Mendel. *RepRap* [online]. 2010 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/File:Assembled-prusa-mendel.jpg>
- [11] RepRap Family Tree. *RepRap* [online]. 2011 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://reprap.org/mediawiki/images/5/5c/Reprap_family_tree_v0.1.png
- [12] Prusa. *RepRap* [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Prusa>
- [13] Rostock. *RepRap* [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Rostock>
- [14] Extruder. *RepRap* [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Extruder>
- [15] Extruder lemio. *RepRap* [online]. 2011 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/File:Extruder_lemio.svg
- [16] RAMPS 1.4 Electronics. *Nextdayreprap* [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://www.nextdayreprap.co.uk/reprap-ramps-1-4-electronics/>
- [17] Sanguinololu. *Reprapworld* [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://reprapworld.com/?products_details&products_id=157
- [18] RAMPS. *RepRap* [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Ramps>

- [19] Sanguilolou. *RepRap* [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Sanguilolou>
- [20] KYSEL, K. *Návrh a zefektivnění parametrů FDM tisku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 85 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
- [21] Polylaktidová vlákna. *Wikipedia* [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Polylaktidov%C3%A1_vl%C3%A1kna
- [22] Akrylonitrilbutadienstyren. *Wikipedia* [online]. 2014 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Akrylonitrilbutadienstyren>
- [23] DROZDA, Jiří. *Příručka ANSYS Workbench* [online]. 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2012 [cit. 2014-05-28]. 105 s. ISBN 978-80-01-05175-7.
- [24] PETRUSKA, Jindřich, *MKP v inženýrských výpočtech*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 112 s. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/RIV/MKP2011.pdf>
- [25] Metoda konečných prvků. In: VRBKA, Martin a Michal VAVERKA. *MKP: 1.přednáška-Úvod* [online]. 2006. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf
- [26] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: Prometheus, 2006, vii, 1034-1198, [30]. ISBN 80-214-1868-0.
- [27] Šíření tepla. *Nanotechnologie* [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://nanotechnologie.vsb.cz/Studiumbc/fyzika_I/sireni_tepla_MMF.pdf
- [28] POKORNÝ, Marek. Vedení tepla. *Pozarní odolnosti* [online]. 2006 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/e-text/specialiste/1/1-2_Vedeni_tepla.pdf
- [29] Přenos tepla. *Katedra fyziky* [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/FYSV/PrenosTepla.pdf>
- [30] MIZERA, David. Součinitel tepelné vodivosti materiálů. *Mizici* [online]. 2009 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.mizici.com/article.php?aid=575>
- [31] Princip bezdotykového měření teploty. *Qtest* [online]. 2013 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.qtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>
- [32] PAVELEK, M., E. JANOUTKOVÁ a J. ŠTĚTINA. Vizualizační a optické měřicí metody. *Optika* [online]. 2007 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/>
- [33] Keith's Electronics Blog. *Neufeld Newton Electronics* [online]. 2010 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.neufeld.newton.ks.us/electronics/?p=864>
- [34] Součinitel konvekce tepla. *Dassault systemes* [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://help.solidworks.com/2011/Czech/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulatio>

n/analysisBackground/ThermalAnalysis/Convection_Topics/Convection_Heat_Coefficient.htm

- [35] ImageJ: Image Processing and Analysis in Java. *Imagej* [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://imagej.nih.gov/ij/>
- [36] RR W10-0.22R. *GM Electronic* [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/rr-w10-0-22r-p114-181>
- [37] MOX 10 0.22 OHMS. *Wilaudio* [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.wilaudio.com/en/mox-10/19-mox-10-022-ohms.html>
- [38] WIRE-WOUND RESISTORS: Aluminium Housed Big Power Style RX24, RXG24. *EPSC: Súčiastky a komponenty pre elektroniku* [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.epcs.sk/epcsdatasheet/3300000101_dsh.114-318.1.pdf
- [39] Technical Data Sheet: MASTER BOND POLYMER SYSTEM EP21TCHT-1. *Masterbond* [online]. 2002 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.pei-france.com/uploads/tx_etim/19347.pdf
- [40] RepSnapper. *RepSnapper software informer* [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://repsnapper.software.informer.com/>
- [41] Kaptonová páska. *Europack* [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.europack.cz/deploy/files/m41_kaptonova_paska.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
ABS	[-]	Akrylonitrilbutadienstyren
ANSYS	[-]	Analysis Systems
APDL	[-]	ANSYS Parametric Design Language
FDM	[-]	Focus Depositinon Modeling
LTD	[-]	Laminát
MKP	[-]	Metoda konečných prvků
PCB	[-]	Printed Circuit Board
PLA	[-]	Polymléčná kyselina
RepRap	[-]	Replicating Rapid

Symbol	Jednotka	Popis
E	[J]	Vnitřní energie
I	[A]	Proud
P	[W]	Výkon
Q	[J]	Teplo
R	[Ω]	Elektrický odpor
R_c	[Ω]	Elektrický odpor paralelního zapojení
R_s	[Ω]	Elektrický odpor seriového zapojení
R_{s, cu}	[Ω]	Specifický odpor mědi
S	[m ²]	Plocha
T	[K]	Termodinamická teplota
U	[V]	Napětí
b	[m.K]	
c	[J.K ⁻¹]	Tepelná kapacita
k	[J.K ⁻¹]	Boltzmannova konstanta
l_b	[mm]	Délka desky
l_{tr}	[mm]	Délka dráhy

m	[kg]	Hmotnost
n_{tr}	[1]	Počet paralelních drah
t	[s]	Čas
t_{Cu}	[mm]	Tloušťka mědi
w_b	[mm]	Šířka dráhy
w_{tr}	[mm]	Šířka jedné dráhy
w_i	[mm]	Šířka izolačního pásu mezi dvěma drahami
σ	[W. m ⁻² .K ⁻⁴]	Stefanova-Boltzmannova konstanta
Φ	[W]	Tepelný tok
α	[W. m ⁻² .K ⁻¹]	Sočinitel přestupu tepla
ε	[1]	Emisivita
λ	[W. m ⁻¹ .K ⁻¹]	Součinitel tepelné vodivosti
ρ	[kg.m ⁻³]	Hustota materiálu
ϕ	[W.m ⁻²]	Hustota tepelného toku

