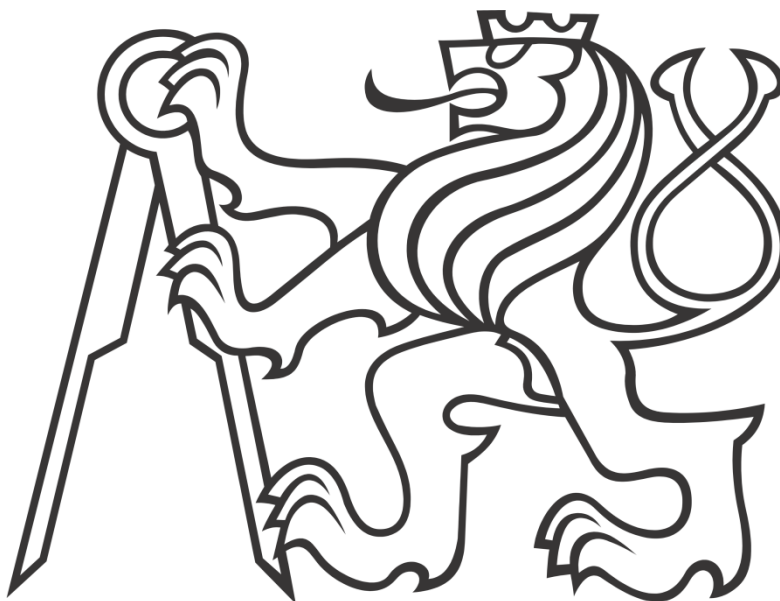


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie



Proudové zatížení polymerních tlustých vrstev

The current loading of polymer thick film layers

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Technologické systémy

Vedoucí práce: Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D.

Bc. Jan Kaltmeyer

Praha 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kaltmeyer** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **457240**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Proudové zatížení polymerních tlustých vrstev

Název diplomové práce anglicky:

The current loading of polymer thick film layers

Pokyny pro vypracování:

1. Stručný popis struktury tlustých vrstev a metod pro vytváření tlustovrstvých struktur.
2. Sledování vlivu jednotlivých parametrů vrstvy a chlazení na maximální proudové zatížení.
3. Návrh postupu měření a jeho vyhodnocení.
4. Návrh vhodných motivů pro měření.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Gupta, Tapan: Handbook of thick and thin film hybrid microelectronics. Hoboken: Wiley Interscience, 2003. ISBN 0-471-27229-9.
[2] Čejka, Marek: Experimentální zjišťování vlastností integrovaných tlustých vrstev. [Bakalářská práce]. VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012 [online 2020_1_30] Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=57426

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **31.01.2020** Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne:

.....
Bc. Jan Kaltmeyer

Poděkování

Děkuji vedoucí diplomové práce Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, připomínky a také za pomoc při zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval rodině za podporu v průběhu celého mého studia.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na proudové zatěžování polymerních tlustých vrstev. Jejím cílem je z provedených měření získat matematický model, ze kterého bude možné stanovit rozměry příčného průřezu vodivých drah polymerní vrstvy z požadovaných hodnot maximálního proudového zatížení a maximálního dosaženého oteplení polymerní vrstvy. První část práce je věnována popisu struktury těchto vrstev, používaných parametrů pro popis jejich vlastností a nejčastějších způsobů výroby těchto vrstev. Druhá část práce je zaměřena na návrh motivů vhodných pro měření proudové zatížitelnosti. Třetí část je věnována technické přípravě měření a popisu zvoleného řešení. V poslední části práce je popsána metodika zpracování naměřených hodnot, rovněž jsou zde prezentovány výsledky měření a je provedeno porovnání předpokládaných a skutečně naměřených hodnot.

Klíčová slova

Polymerní tlustá vrstva, proudové zatěžování, oteplení, geometrie vzoru

Abstract

This diploma thesis concerns with the topic of current loading of polymer thick film layers. The aim of the thesis is to gain mathematical model from carried out measurements which can be used for cross-section dimensions design from the required values of current carrying capacity and maximum permissible layer temperature rise of the polymer thick film layer. First part describes the structure of thick film layers, parameters generally used for description of electrical characteristics and most common production processes. Second part focuses on design of pattern geometry suitable for measuring of current loading. Third part deals with technical preparation of measurement and with description of used methods. The last part is focused on description of methodology used for data processing, presentation of measurement results and comparison of expected and obtained results.

Keywords

Polymer thick film layer, current loading, temperature rise, pattern geometry

Obsah

1. Úvod	1
2. Struktura tlusté vrstvy a metody pro vytváření tlustovrstvých struktur	2
2.1. Pasty používané pro tvorbu tlustých vrstev	3
2.1.1. Pasty pro anorganické tlusté vrstvy	3
2.1.2. Pasty pro organické tlusté vrstvy	4
2.2. Vlastnosti past pro tlusté vrstvy	4
2.3. Metody vytváření tlustovrstvých struktur	5
2.3.1. Sítotisk	5
2.3.2. Šablonový tisk	7
2.3.3. Válcový tisk	8
2.3.4. Micro-Screen	8
2.3.5. Technologie světlocitlivých vrstev	9
2.3.6. Odleptávaná vodivá vrstva	9
2.3.7. Dispensní nanášení pasty na podložku	9
2.3.8. Materiálové tiskárny	10
2.4. Aktivace natištěné tlusté vrstvy	11
2.5. Elektrické vlastnosti tlustých vrstev	13
2.5.1. Odpor na čtverec	13
2.5.2. Elektrický odpor a vodivost	13
2.5.3. Rezistivita	13
2.5.4. Teplotní koeficient elektrického odporu (TKR)	13
2.5.5. Proudová zatížitelnost	14
3. Návrh a realizace vzorků pro měření	15
3.1. Návrh vhodných motivů	15
3.2. Tvorba předlohy pro síto	17
3.3. Příprava vzorků	18
4. Postup měření a vyhodnocení	19
4.1. Schéma zapojení měřicího obvodu	19
4.2. Připojení vzorků do měřicího obvodu	20
4.3. Realizace měření pomocí programu LabView	21
4.3.1. Použité měřicí přístroje	21
4.3.2. Návrh ovládacího programu v NI LabView	23
4.3.2.1. Ovládání relé a měření času	23

4.3.2.2. Měření proudu protékajícího obvodem	24
4.3.2.3. Měření úbytku napětí na tlusté vrstvě	24
4.3.2.4. Měření teploty vrstvy	25
4.3.2.5. Výpočet odporu vrstvy	25
4.3.2.6. Uložení naměřených dat do souboru	26
4.4. Metodika měření a zpracování	27
5. Výsledky měření	31
5.1. Naměřená časová závislost teploty pro různá proudová zatížení vzorků	31
5.1.1. Šířka dráhy 0,5 mm (motiv č. 15)	32
5.1.2. Šířka dráhy 0,8 mm (motiv č. 18)	34
5.1.3. Šířka 1 mm (motiv č. 20).....	36
5.1.4. Šířka 1,2 mm (motiv č. 21).....	38
5.1.5. Shrnutí výsledků naměřených časových závislostí teploty.....	40
5.2. Parametry náhradního tepelného obvodu.....	41
5.3. Závislost odporu na teplotě.....	43
5.3.1. Šířka dráhy 0,5 mm (motiv 15)	43
5.3.2. Šířka dráhy 0,8 mm (motiv 18)	44
5.3.3. Šířka dráhy 1 mm (motiv20)	45
5.3.4. Šířka dráhy 1,2 mm (motiv 21)	46
5.4. Určení maximálního proudového zatížení dle IPC 2221.....	48
5.5. Vliv šířky vrstvy na velikost oteplení při různých hodnotách proudového zatížení	50
5.5.1. Bez chlazení	50
5.5.2. S chlazením	52
5.6. Porovnání naměřených hodnot a průběhu funkce dle IPC 2221	53
6. Závěr	55
7. Použité zdroje	56
8. Seznam obrázků.....	58
9. Seznam tabulek	59

1. Úvod

Tato diplomová práce se zabývá proudovým zatěžováním vzorků připravených z tlustovrstvých polymerních past.

První část práce popisuje struktury různých typů tlustých vrstev a rozdíly mezi nimi, uvádí parametry používané pro vyjádření vlastností tlustovrstvých struktur a blíže seznamuje s nejrozšířenějšími metodami výroby tlustovrstvých motivů.

V druhé části se diplomová práce zaměřuje na proces přípravy měřených vzorků, opatřených tištěnými tlustovrstvými motivy, zahrnující návrhy motivů vhodného tvaru a vlastností, přípravu podkladů pro výrobu síta a samotný proces výroby vzorků pomocí ručního sítotisku. Tato část rovněž popisuje aplikaci přípravku k měření IO na připojení měřených vzorků do obvodu.

Třetí část práce je věnována přípravě měření s použitím digitálních multimetrů připojených k měřicímu počítači. Při vypracování měřícího programu, zajišťujícího měření proudu procházejícího vzorkem, úbytku napětí na vzorku při dané velikosti procházejícího proudu a teplotu na povrchu vzorku, bylo využito prostředí software NI LabView. Časový úsek od sepnutí relé, tedy od počátku zatěžování vzorku, byl měřen mikrokontrolérem Arduino Uno. Sady vzorků byly jednotlivě zatěžovány konstantním proudem o čtyřech úrovních do ustálení teploty vzorku. Z naměřených hodnot proudu a úbytku napětí byl měřícím programem vypočten odpor měřených vzorků.

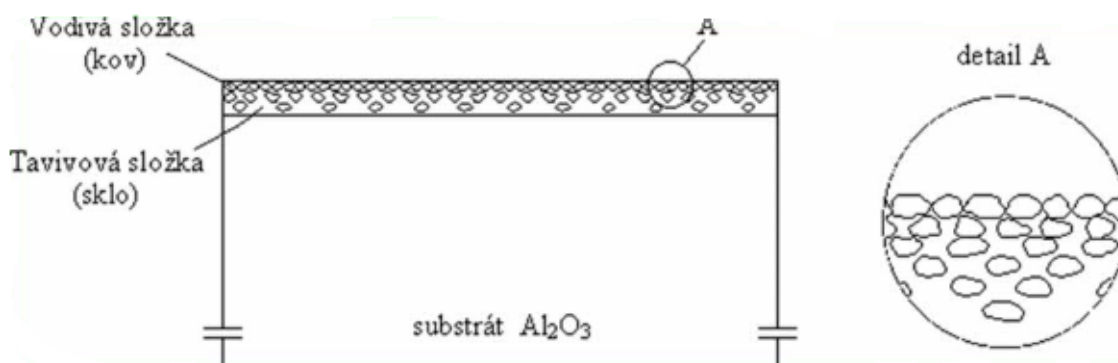
Čtvrtá část práce obsahuje vyhodnocení naměřených hodnot. Velký soubor naměřených hodnot byl zpracován programem Wolfram Mathematica, pomocí kterého byly vypočteny velikosti tepelného odporu a tepelné kapacity náhradního tepelného obvodu, dosažená oteplení vzorků, teplotní koeficienty odporu vzorků, koeficienty závislosti maximálního proudového zatížení na oteplení a příčném průřezu vodivé vrstvy dle standardu IPC 2221 a maximální hodnoty dovoleného proudového zatížení pro zvolenou hodnotu oteplení vrstvy pro různé šířky vodivých drah vzorků. Následně na některých z těchto vypočtených parametrů byl sledován vliv šířky vodivé dráhy a vliv chlazení realizovaného pasivním chladičem, a naměřené průběhy a závislosti byly porovnány s předpoklady.

2. Struktura tlusté vrstvy a metody pro vytváření tlustovrstvých struktur

Tlustá vrstva je vrstva, jejíž tloušťka je podstatně menší než ostatní rozměry vrstvy, řádově v jednotkách až desítkách mikrometrů, a je vytvářena pomocí nevakuových depozičních procesů, na rozdíl od tenkých vrstev, o tloušťkách v rozmezí jednotek nm až jednotek μm , vytvářených vakuovými depozičními procesy. Mezi příklady nevakuových depozičních procesů patří nanášení pasty na podložku pomocí sítotisku, šablonového tisku, dispenzního nanášení a případně další metody, které budou podrobněji rozebrány dále. [19]

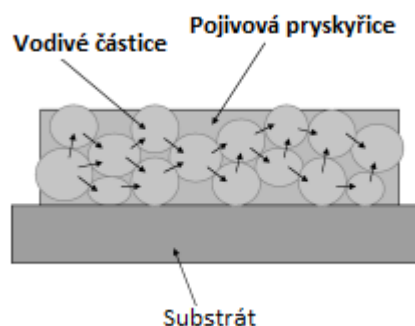
Struktura a vlastnosti tlusté vrstvy jsou závislé na složení použité pasty. Hlavními součástmi, tvořícími vrstvu, jsou pojivový materiál a vodivé (funkční) částice. Pojivo slouží k udržení částic pohromadě a k přichycení vodivých částic k substrátu, zatímco vodivé částice zprostředkovávají elektrické vlastnosti vrstvy. [6]

V případě anorganických tlustých vrstev, je struktura vrstvy tvořena tavivovou složkou, která se v důsledku teplot, dosahovaných při vypalování vrstvy, roztaví, a přemění v amorfní fázi, a funkční složkou, obvykle tvořenou částicemi kovu (např. stříbra), které při vypalování vrstvy nejsou zcela roztaveny, ale pouze sintrovány, dochází tedy ke spojení jednotlivých práškových částic. [9]



Obr. 1: Struktura vypálené anorganické tlusté vrstvy [11]

U organických tlustých vrstev je struktura vrstvy tvořena vytvrzenou organickou složkou, například polymerní pryskyřicí, a funkční složkou, o stejném složení jako u anorganické tlusté vrstvy, avšak vzhledem k teplotě vytvrzování organických past zde nedochází k sintrování částic funkční složky, a to, že organická složka zůstává ve struktuře pasty i po provedení tepelné aktivace, vede ke snížení elektrické vodivosti dané pasty a zhoršení dalších elektrických parametrů. [19, 6, 8]



Obr. 2: Struktura vytvrzené organické tlusté vrstvy [7]

2.1. Pasty používané pro tvorbu tlustých vrstev

Pasty pro tvorbu tlustých vrstev dělíme podle toho, zda se jedná o pasty pro tvorbu anorganických tlustých vrstev či polymerních tlustých vrstev. Obecně se pasty skládají z několika složek, které se liší v závislosti na typu vytvářené vrstvy a případně mohou být i některé složky zcela vynechány. Tyto jednotlivé složky se vyznačují různými fyzikálními a chemickými vlastnostmi a v pastě plní různé účely.

Kromě *složky funkční*, na bázi vodivých částic, určující výsledný charakter pasty a její elektrické vlastnosti, a *složky pojivové*, zajišťující vzájemnou soudržnost vodivých částic a adhezi vrstvy k podložce, obsahuje pasta pro vytváření tlustých vrstev složku *modifikující*, která především upravuje viskozitu pasty, a rovněž *organickou* složku, sloužící jako nosič všech ostatních složek.

2.1.1. Pasty pro anorganické tlusté vrstvy

Funkční složka past pro anorganické tlusté vrstvy se skládá z malých částic kovů, oxidů kovů, skla nebo keramiky, v závislosti na požadovaných vlastnostech dané vrstvy. V případě vodivých vrstev je požadavek na co nejmenší rezistivitu pasty, proto je tvořena drobnými částicemi kovu. Nejčastěji se jedná o částice stříbra, a to z důvodu jeho vysoké objemové konduktivity, a také z toho důvodu, že oxidy stříbra zůstávají elektricky vodivé. Dále funkční složku mohou tvořit částice mědi, s rovněž vysokou objemovou konduktivitou, ale i nízkou cenou oproti stříbru. Nevýhodou měděných past je nutnost vypalování v inertní atmosféře nebo vakuu, jelikož oxidy mědi nejsou elektricky vodivé. Dalšími kovy, využívanými ve vodivých pastách, jsou zlato či platina, vyznačující se vysokou vodivostí, a také vysokou ušlechtilostí, díky níž nedochází při vypalování vrstvy k tvorbě oxidů, snižujících vodivost vrstvy. Pokud je naopak požadováno vytvoření vrstvy s co největším elektrickým odporem, potom funkční složku past tvoří oxidy kovů, jako je RuO_2 nebo IrO_2 . [6, 9]

Pojivová složka u past pro anorganické tlusté vrstvy je tvořena skleněnou fritou z jemného prášku z olovnatoboritokřemičitého, vizmutokřemičitého nebo hlinitokřemičitého skla. [9]

Organická složka, která slouží jako nosič ostatních složek, se skládá z polymerní části tvořené polymerními řetězci polyvinylacetátu nebo polyvinylalkoholu a z rozpustidlové části kterou tvoří rozpouštědlo, jako je například xylen nebo terpentýn. Organická složka se při sušení a výpalu pasty odpaří, takže ve výsledné vrstvě se již nenachází a nepodílí se tak na výsledných vlastnostech pasty. [9]

Dále se pasty pro anorganické tlusté vrstvy obsahují modifikující složku, jejímž úkolem je úprava viskozity pasty při nanášení na podložku. Obvykle je tvořena borovicovým olejem nebo terpineolem. Při vypalování vrstvy dojde i u této složky k jejímu odpaření, proto na výsledné parametry vrstvy rovněž nemá vliv. [9]

2.1.2. Pasty pro organické tlusté vrstvy

Pasty pro organické tlusté vrstvy se skládají pouze z organické a funkční složky, všechny ostatní složky jsou vynechány. Organickou složku tvoří polymerní pryskyřice. Funkční složka je tvořena částicemi kovů stejných jako u past pro anorganické tlusté vrstvy a jejich oxidů případně uhlíkem v závislosti na požadovaných elektrických parametrech výsledné vrstvy. [6,9]

Díky absenci pojivové složky, není nutné tyto pasty vypalovat při vysokých teplotách, nýbrž jsou pouze vytvrzovány při teplotách pod 200°C. Proto je možné organické tlusté vrstvy vytvářet i na substrátech, které nejsou příliš tepelně odolné, jako jsou například plastové fólie. Díky tomu se organické tlusté vrstvy vyznačují nižší cenou, mají však oproti anorganickým tlustým vrstvám mnohé nevýhody, jako vyšší odpor vodivých vrstev, omezení pracovní teploty a nižší tepelnou vodivost danou přítomností organické složky vrstvy, díky tomu nejsou vhodné k výkonovým aplikacím. Mezi další nevýhody organických tlustých vrstev se řadí špatná odolnost vůči vlhku a nemožnost tyto vrstvy pájet. [9, 11]

2.2. Vlastnosti past pro tlusté vrstvy

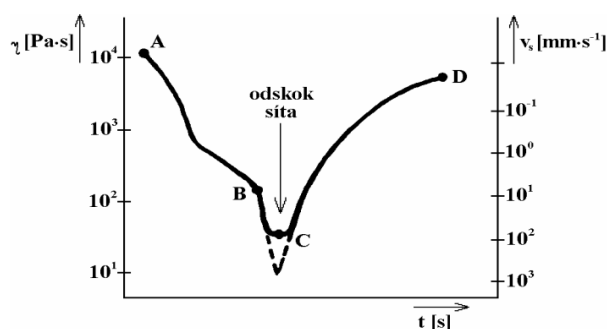
Pasty pro tlusté vrstvy lze popsat pomocí několika parametrů, ovlivňujících chování pasty během tiskového procesu i výsledné vlastnosti.

Nejčastěji používaným parametrem pro popis pasty je její *viskozita*. Jedná se o vnitřní tření způsobené relativním pohybem částic pasty. Koeficient viskozity pasty η se vyjadřuje jako podíl síly, která působí na pastu a způsobuje její pohyb, a rychlosti pohybu dvou paralelních vrstev měřené pasty. [3, 4] Viskozitu je tedy možné určit z rovnice:

$$\eta = \tau \cdot \frac{dy}{dv} = \frac{F_t}{S} \cdot \frac{dy}{dv} = [Pa \cdot s]$$

Kde τ je tečné napětí [$\frac{N}{m^2}$], F_t [N] je tečná síla působící na plochu S [m^2], dy/dv [s^{-1}] je převrácená hodnota rychlostního gradientu mezi jednotlivými vrstvami. [4]

Dalším parametrem popisujícím chování pasty při toku je *tixotropní index* (TI), kdy tixotropní index je určen z podílu zjištěných hodnot viskozity při dvou různých rychlostech. Zejména při sítotisku a šablonovém tisku se využívá tixotropních vlastností pasty, tedy závislosti viskozity na velikosti působícího mechanického tlaku, přičemž nejnižší viskozity pasta dosahuje v okamžiku jeho nevyšší velikosti, což je při odskoku síta od podložky. [3, 4, 9]



Obr. 3: Časová závislost viskozity pasty v průběhu tiskového procesu realizovaného sítotiskem [9]

2.3. Metody vytváření tlustovrstvých struktur

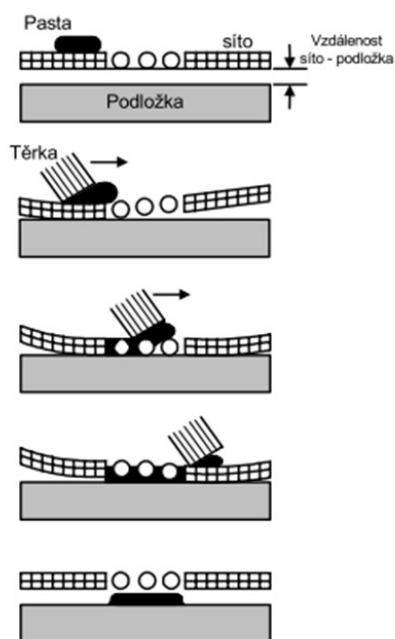
Po výběru vhodného substrátu a pasty pro dané použití tlustovrstvé struktury následuje samotné nanesení motivu na podložku. V porovnání s tvorbou tenkých vrstev či subtraktivní metodou tvorby plošných spojů jsou metody tvorby tlustovrstvých struktur, založené na principu grafických metod, poměrně jednoduché. Metod pro vytváření tlustovrstvých struktur je velké množství, patří mezi ně například sítotisk, šablonový tisk, ale také micro-screen, dávkovací nanášení dispenserem, tisk vodivého inkoustu materiálovými tiskárnami, technologie světlocitlivých vrstev a technologie odleptávání vodivé vrstvy. Všechny metody nemusí být navzájem zaměnitelné, jelikož každá z metod může vyžadovat různou viskozitu pasty, která je dána např. podílem a velikostí částic pasty. [6]

2.3.1. Sítotisk

Sítotisk je nejvíce zavedenou metodou tvorby tlustých vrstev. Principem sítotisku je protlačení pasty pomocí třerky oky síta. Motiv je na sítu vytvořen fotolitografickými metodami podobně jako při výrobě plošných spojů. Síto je umístěno v určité vzdálenosti od podložky, na níž je nanášen motiv, tato vzdálenost se nazývá odtrh. Pohybem třerky po sítu dochází k napnutí síta a k jeho přitisknutí k podložce po celé šířce nanášeného motivu. Pro správný tisk je důležitá dostatečně velká adheze mezi pastou a podložkou, která zajistí, že pasta ulpí na podložce a nezůstane ve struktuře síta. [5]

Síto je zhotoveno z ocelových, umělých či textilních vláken napnutých na dřevěném nebo ocelovém rámu definovanou silou. Síta vyrobená z textilních vláken jsou vhodná pro použití spíše v low-cost aplikacích a prototypové výrobě, zatímco síta z nerezových nebo umělých vláken jsou vhodná pro velkosériovou výrobu vzhledem k jejich vyšší trvanlivosti. Životnost síta z nerezových vláken se pohybuje přibližně do 5 tis. tisků, u polyesterových vláken je díky jejich vyšší pružnosti životnost ještě vyšší. Nejvyšší životnost vykazují nylonová síta, u nichž se životnost pohybuje dokonce mezi 50 až 100 tisíci tisků, avšak pro vysokou absorpci vzdušné vlhkosti, jsou nylonová síta rozměrově nestálá, čímž je omezeno dosahované maximální rozlišení motivu. Naopak nejlepšího rozlišení tisku je dosahováno při použití síta z nerezových vláken, nejlepšího kompromisu mezi rozměrovou stálostí a životností dosahují síta vyrobená z polyesteru. [5, 6]

Míra napnutí síta v rámu je velice důležitým parametrem, který určuje výsledek tiskového procesu, z měření průhybu síta při určité zátěži uprostřed síta lze určit jeho opotřebení, jelikož po určitém čase dojde vlivem mechanického namáhání, způsobeného pohybem třerky, k prodloužení vláken síta a ke snížení jeho napnutí. [5, 6]



Obr. 4: Princip sítotisku [19]

Za účelem zajištění správné pozice motivu na substrátu sítotiskové stroje umožňují přesné nastavení polohy síta a upínací plochy, ke které se substrát připevňuje zpravidla pomocí podtlaku vytvářeného vakuovou pumpou. Pohyb těrky je zajišťován u jednoduchých přístrojů ručně, v případě automatických zařízení pomocí pneumatických či hydraulických systémů. Pro zajištění lepšího výsledku tiskového procesu a opakovatelnosti je samozřejmě výhodnější použití automatických zařízení vzhledem k možnosti přesného nastavení jednotlivých parametrů tisku a jejich udržování na konstantní hodnotě. [5]

Parametry, jimiž je možné řídit tloušťku nanesené vrstvy, jsou: velikost síly působící na těrku, rychlost jejího pohybu, tvrdost těrky, sklon těrky, velikost odtrhu, viskozita pasty, okolní teplota a vlhkost, síla napnutí síta, velikost ok a tloušťka vláken síta. Přehled, jak tyto jednotlivé parametry tisku ovlivňují tloušťku nanášené vrstvy, je udává Tab. 1. [4]

Skupina	Parametr tisku	Výsledná tloušťka vrstvy	
		Malý	Velký
Tiskový stroj	Tlak těrky	Nižší	Vyšší
	Rychlost pohybu těrky	Vyšší	Nižší
	Úhel sklonu těrky	Nižší	Vyšší
	Tvrdost těrky	Nižší	Vyšší
	Vzdálenost síto-podložka	Vyšší	Nižší
	Spodní zarážka těrky	Vyšší	Nižší
Tiskový proces	Teoretický objem pasty	Vyšší	Nižší
	Tloušťka fotosenzitivní emulze na sítu	Vyšší	Nižší
	Viskozita pasty	Vyšší	Nižší
Ostatní	Teplota	Nižší	Vyšší
	Opotřebení těrky	Vyšší	Nižší
	Napnutí síta	Vyšší	Nižší

Tab. 1: Vliv parametrů sítotiskového procesu na tloušťku vrstvy [4, přeloženo]

Rychlost pohybu těrky ovlivňuje tloušťku vrstvy, což se projevuje změnou velikosti odporu vrstvy, kdy například při zvýšení rychlosti pohybu těrky z 50 mm/s na 200 mm/s má za důsledek zvýšení velikosti odporu o 8 % vlivem snížení tloušťky nanášené vrstvy [6]. Pro zajištění dobré opakovatelnosti a vyšší tloušťky vrstvy je tedy potřeba snížit rychlost pohybu těrky. [4]

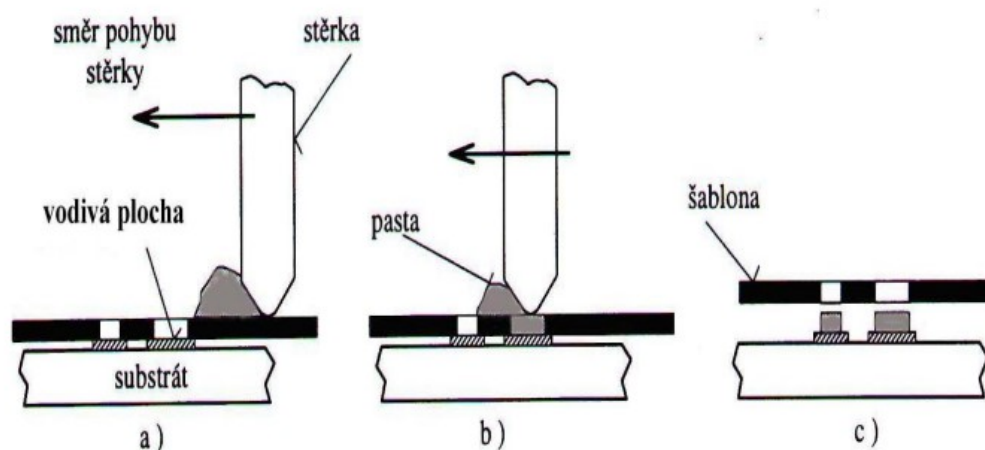
Dalším z důležitých parametrů je tlak působící na těrku; pro rovnoměrnost nanesené vrstvy, je důležité, aby byl tlak konstantní po celou délku tisku. Zvýšením tlaku na těrku je možné dosáhnout větší stejnoměrnosti tloušťky nanášené vrstvy, ale dojde ke snížení tloušťky vrstvy. [4]

Tloušťka vrstvy je rovněž ovlivněna úhlem sklonu mezi rovinou síta a těrkou. Čím je úhel více kolmý, tím více se snižuje tloušťka nanášené vrstvy, avšak při malých úhlech sklonu dochází ke zhoršení kvality nanášeného motivu. [4]

Správné nastavení vzdálenosti síta od podložky rovněž ovlivňuje tloušťku nanášené vrstvy, přičemž vhodnou velikost odtrhu se přibližně určuje z šířky nanášeného motivu. Pro síta z nerezové oceli je vhodná velikost odtrhu rovna 0,004 násobku šířky nanášeného motivu, pro polyesterová síta 0,006 násobku šířky a pro nylonová síta je rovna 0,01 násobku šířky nanášeného motivu.[4,6, 9, 10]

2.3.2. Šablonový tisk

Šablonový tisk je principiálně podobný sítotisku, avšak místo síta je pro nanášení motivu na substrát použita pevná nerezová šablona. Tato šablona se při tisku přikládá přímo na substrát, protože je výrazně pevnější než síta používaná u sítotisku a na její prohnutí by bylo potřeba větší síly působící na těrku. Proto je samotný odtrh proveden až po dokončení pohybu těrky, která protlačí pastu otvory v šabloně na podložku. Otvory v šabloně jsou vytvářeny proleptáním nebo laserem. [11, 12]



Obr. 5: Princip šablonového tisku [11]

Zatímco u sítotisku je rychlost odskoku síta nastavována velikostí vzdálenosti síto – podložka a jeho napnutím, u šablonového tisku musí být odskok šablony proveden mechanicky. Rychlost odskoku musí být dostatečně vysoká, aby došlo ke zmenšení viskozity pasty a bylo tak zajištěno, že veškerá nanesená pasta zůstane na podložce a neulpí v otvorech šablony [11].

Šablona je rovněž upevněna v rámu, zpravidla se zabudovaným napínacím mechanismem. Napnutí šablony je také důležité, protože omezuje prohnutí šablony při jejím odskoku od podložky.

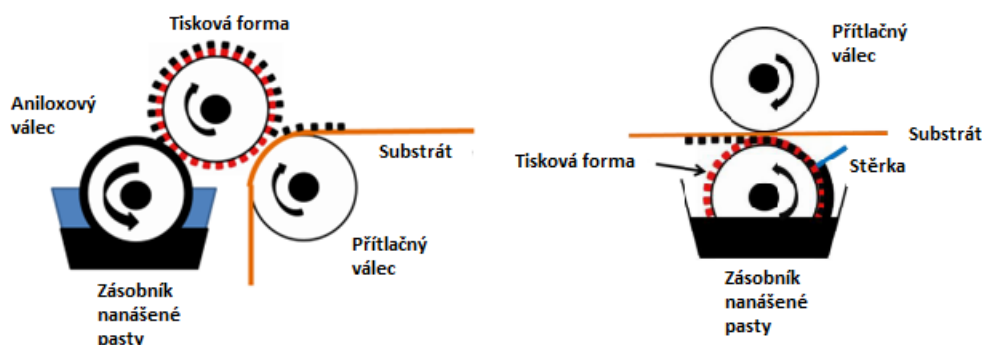
Na rozdíl od síta, jsou možnosti vytvářených motivů u šablonového tisku omezenější. Motiv na šabloně musí být přizpůsoben tomu, aby nebyla například příliš velkými otvory narušena pevnost šablony, což by při odskoku tvořilo problémy. Dalším omezením je to, že šablonovým tiskem je možné provést pouze tisk motivu, který obsahuje plné tvary, není tedy například možné pomocí šablonového tisku realizovat motiv ve tvaru mezikruží. Dále je šablonový tisk nevhodný pro tisk linií, které jsou blízko u sebe. [11, 12]

Naopak mezi výhody oproti sítotisku se řadí lepší rozměrová stabilita a přesnost šablony, její vyšší životnost a jednodušší čištění od zbytků pasty. [12]

2.3.3. Válcový tisk

Pro tisk na organické substráty je možné využít klasické válcové tiskařské stroje. Výhodou tohoto postupu tisku je vysoká rychlost nanášení, která může dosahovat od 30 do 100 m/min. [6]

K metodám válcového tisku patří postup, nazývaný *Flexotisk*, což je technika tisku z výšky, kdy je pasta nanášena na substrát pomocí válcové tiskové formy zhotovené technikou fotolitografie nebo laserového gravírování. Množství pasty nanášené na substrát je řízeno hloubkou a hustotou rastru na aniloxovém válci, který zajišťuje přenos inkoustu ze zásobníku na tiskovou formu. Tento typ tisku je široce využíván na potisk rovných neporézních materiálů, jako jsou obaly od potravin apod. [6, 14]

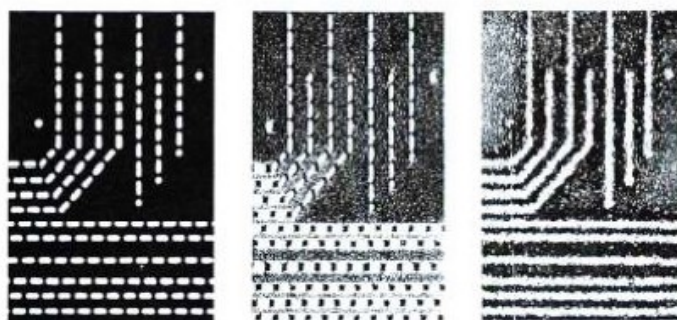


Obr. 6: Princip flexotisku (vlevo) a hlubotisku (vpravo) [6]

Další metodou válcového tisku je *hlubotisk*, který funguje na principu přenosu pasty na substrát pomocí reliéfní tiskové formy ve tvaru válce, kde tištěné prvky jsou zahlobeny pod úroveň prvků netištěných. Pasta je tedy přenášena v reliéfu tiskové formy, její množství je řízeno hloubkou reliéfu tiskového válce, nadbytečné množství pasty je odstraněno pomocí stěrky. [6]

2.3.4. Micro-Screen

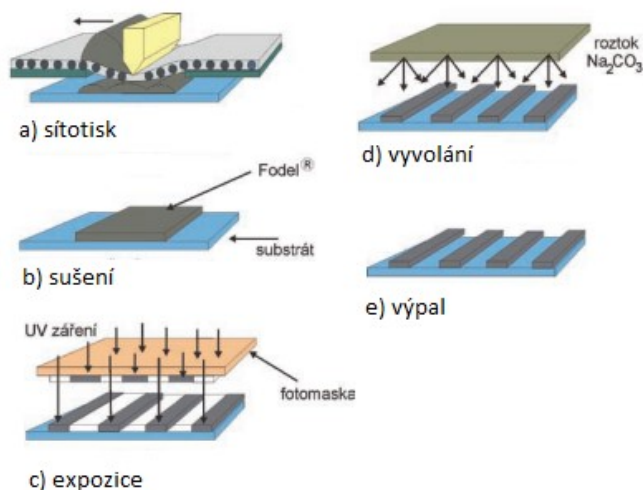
Micro-Screen je metoda, která vychází z šablonového tisku. Tato metoda je pro dosažení většího rozlišení v případě tvorby mikroelektronických a mikrovlnných obvodů doplněna o použití organické těsnící vrstvy, která usměrňuje tečení pasty po šabloně a tím zabraňuje jejímu rozlití. Výhodou této metody je vyšší rozlišení výsledného motivu dosahující až 50 μm a přitom je μ -Screen kompatibilní se standardně používanými zařízeními na šablonový tisk. [13]



Obr. 7: Princip technologie Micro-Screen: vlevo šablona, uprostřed organická těsnící vrstva, vpravo výsledný motiv [13]

2.3.5. Technologie světlocitlivých vrstev

Technologie světlocitlivých vrstev funguje na principu nanášení fotocitlivé pasty na podložku, která je následně vysušena a ozářena ultrafialovým zářením přes šablonu. Pasty, která nebyla UV zářením vyexponována je při následném vyvolání v roztoku Na_2CO_3 selektivně odstraněna. Vytvořený motiv je následně vytvrzen v peci. Výhodou této technologie je možnost tisku v souvislé vrstvě bez nutnosti použití síta či šablony, nevýhodou je větší spotřeba pasty. [9]



Obr. 8: Princip technologie světlocitlivých vrstev [15]

2.3.6. Odleptávaná vodivá vrstva

Tato metoda tvorby motivu na substrátu funguje na stejném principu jako technologie světlocitlivých vrstev, s tím rozdílem, že je vrstva nejdříve vypálena a až poté je fotolitograficky vyvolána. Výhodou tohoto postupu oproti technologii světlocitlivých vrstev, je, že je motiv vytvářen na již rozměrově stabilní vrstvě, díky čemuž je možné dosáhnout vyšší přesnosti výsledného motivu. [9]

2.3.7. Dispensní nanášení pasty na podložku

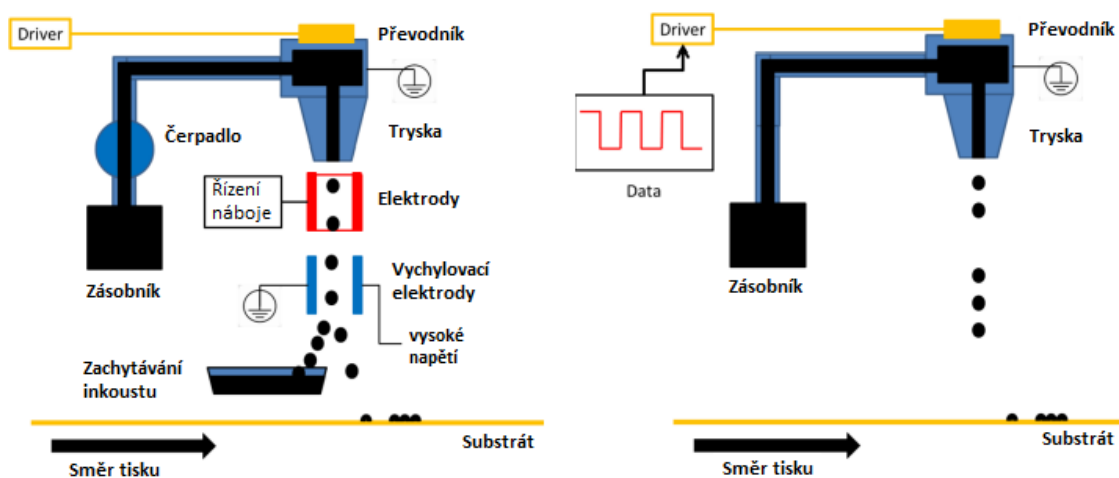
Na rozdíl od výše zmíněných metod je motiv na podložce vytvářen bez použití šablony či síta. Pasty je nanášena na povrch podložky dávkováním přesného množství pasty ze zásobníku pomocí plných či dutých jehel. [13]

V případě použití plných jehel, je jehla (nebo i více jehel najednou) ponořena do zásobníku a následným dotykem povrchu substrátu dojde k přenosu pasty na podložku, touto metodou není dávkování pasty zcela přesné, proto se hodí spíše pro nenáročné aplikace. [13]

Při použití dutých jehel je možné nastavit přesné množství vytlačené pasty na podložku. Pro tvorbu motivu je zpravidla používán programově řízený dispenser. Výhodou této technologie je, že není nutné vytvářet šablonu či síto, čímž se tato metoda stává vhodnou pro prototypovou výrobu, pro výrobu motivů ve velkém množství není vzhledem k své nízké rychlosti tvorby motivu příliš vhodná. [13]

2.3.8. Materiálové tiskárny

V poslední době se k tvorbě vodivých motivů především při výrobě prototypů využívají materiálové tiskárny, které fungují na principu jettingu, tedy usměrnění proudu kapek vodivého inkoustu pomocí elektrického pole vychylovacích elektrod. Metody tisku můžeme rozdělit na dvě hlavní kategorie – *kontinuální nanášení* se zachytáváním nepotřebného inkoustu a tzv. „*Drop on Demand*“, kdy je proud kapek vodivého inkoustu přerušován podle požadavků nanášeného motivu a není tedy nutné zachytávat nadbytečný inkoust. Jak je vidět na obr. č. 9, tak uspořádání v případě systému DOD je výrazně jednodušší, jelikož není nutné nabíjet letící kapičky inkoustu nábojem za účelem jejich vychýlení a také není nutné recirkulace zachyceného inkoustu. Případně tisk může fungovat na principu unášení aerosolu vodivého inkoustu nosným plynem a jeho zaostření pomocí proudu vzduchu. [6]



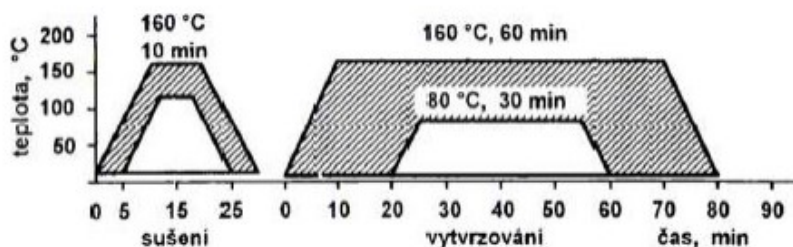
Obr. 9: Princip kontinuálního nanášení se zachytáváním inkoustu (vlevo) a Drop on Demand (vpravo) [6]

Výhodou nanášení vodivého inkoustu tiskárnami je vysoká variabilita, jelikož je možné okamžitě změnit nanášený motiv na podložku. Mezi nevýhody patří vysoká cena materiálových tiskáren (například cena tiskárny Fujifilm Dimatix může dosahovat i několika desítek tisíc dolarů), a nižší rychlost tvorby motivu. V případě použití speciálního inkoustu, který není nutné vytvrzovat, jsou vytvořené motivy použitelné okamžitě po vytvoření, v opačném případě je nutné nanášený motiv aktivovat vytvrzením či jiným způsobem, aby se stal vodivým. [6, 16]

2.4. Aktivace natištěné tlusté vrstvy

Po nanesení materiálu vrstvy na podložku některou z výše popsaných metod následuje aktivace této vrstvy většinou pomocí tepelného zpracování, některé vodivé inkousty je rovněž možné aktivovat chemicky nebo i pomocí UV záření. Teprve při aktivaci natištěné pasty se vytváří spojení tlusté vrstvy se substrátem a vlastní struktura vrstvy. A tedy až po provedení aktivace vrstvy dosahuje vrstva požadovaných mechanických a elektrických vlastností. [10, 11]

Způsob tepelného zpracování pasty závisí na tom, zda se jedná o pastu organickou či anorganickou. Organické pasty jsou vytvrzovány při teplotách okolo 150 °C, přičemž teplotní profil vytvrzování se u jednotlivých past liší a je specifikován výrobcem pasty, v některých případech teplotní profil není specifikován, a je udávána pouze teplota a doba vytvrzování. Rovněž proces sušení není v některých případech specifikován a není tedy nutné jej provádět. Teplota, při které probíhá vytvrzování pasty má významný vliv na výsledné elektrické vlastnosti pasty, snížením teploty vytvrzení dojde ke zvýšení odporu vrstvy. [17] V případě past se sníženou teplotou vytvrzování se teplota vytvrzování obvykle pohybuje v rozmezí 80-120 °C. [4]



Obr. 10: Příklad teplotního profilu sušení a vytvrzování organické pasty [13]

V případě anorganických past bývá tepelné zpracování náročnější, zde je nutné přesně dodržet předepsaný teplotní profil pro danou pastu. Teplota vypalování anorganických past se pohybuje v rozmezí 800-1200 °C, díky čemuž je zpracování anorganických past energeticky náročnější, přičemž je nutné dodržet teplotní limit, při jehož překročení dochází k úplnému roztavení částic kovu přítomných v pastě. Při vypalování pasty by mělo dojít pouze k natavení povrchu jednotlivých částic kovu a jejich spojení. Složení anorganické pasty určuje nejen teplotu vypalování, ale také složení atmosféry, při které probíhá výpal. U past z ušlechtilých kovů (Ag, Au, Ag-Pd) je možné provádět výpal v oxidační atmosféře, v případě např. měděných past je nutné výpal provádět v inertní atmosféře nebo ve vakuu, aby bylo v průběhu vypalování zabráněno vzniku oxidů mědi, které by negativně ovlivnily výsledné elektrické vlastnosti vrstvy. [10, 18]

Teplotní profil výpalu anorganických past dle [10] zahrnuje několik definovaných úseků:

1. *Sušení*

Sušení probíhá při teplotě 70-150°C po dobu 15-30 minut, kdy dojde k vyparchání těkavých složek pasty, díky čemuž získá pasta lepší mechanické vlastnosti. [13]

2. *Předehřev*

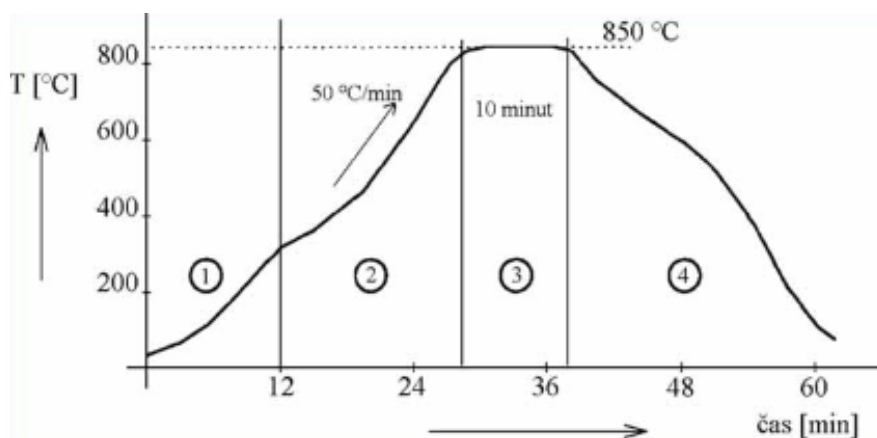
Při předehřevu dochází k postupnému nárůstu teploty na vypalovací teplotu. Při předehřevu je nutné dodržet maximální hodnotu nárůstu teploty. V opačném případě by mohlo dojít ke vzniku pnutí vlivem různě rychlého ohřevu pasty a substrátu.

3. *Vypalování*

Při vypalování je po určitou dobu udržována konstantní teplota, dochází k roztavení pojivové složky pasty a k sintrování funkčních částic pasty. Rovněž dochází ke spálení organické složky pasty.

4. *Chlazení*

Po provedení výpalu je ze stejných důvodů jako u předehřevu nutné zajistit pozvolné ochlazení, strmost poklesu teploty by neměla přesáhnout kritickou hodnotu (cca 50°C/min).



Obr. 11: Příklad teplotního profilu pro výpal anorganických tlustých vrstev [11]

2.5. Elektrické vlastnosti tlustých vrstev

Pro použití tlustých vrstev v elektronických zařízeních jsou tlusté vrstvy za účelem posouzení jejich kvality a určení vhodnosti pro danou aplikaci popisovány pomocí několika elektrických parametrů, mezi něž patří: odpor na čtverec, rezistivita (příp. vodivost), teplotní koeficient odporu (TKR), proudová zatížitelnost a vrstvosvá kapacita.

2.5.1. Odpor na čtverec

Z elektrických vlastností tlustých vrstev se nejčastěji udává odpor na čtverec, který vyjadřuje velikost odporu vrstvy čtvercového tvaru. Poměr l/w udává počet čtverců, obsažených ve vodivé dráze. Odpor na čtverec tedy závisí pouze na rezistivitě pasty a její tloušťce. Odpor na čtverec je používán pro porovnávání jednotlivých vzorků jak tlustých, tak i tenkých vrstev, ale také polovodičových materiálů vzhledem k tomu, že jejich výsledné vlastnosti závisí na celkových rozměrech. Odpor na čtverec je možné vypočítat ze vztahu:

$$R = R_{sq} \frac{l}{w} = \frac{\rho}{t} \frac{l}{w} [\Omega], \quad (1)$$

kde R_{sq} je odpor na čtverec [Ω], l je délka vodivé dráhy [m], w je šířka vodivé dráhy [m], ρ je objemová rezistivita [$\Omega \cdot m$] a t je tloušťka vrstvy [m].

2.5.2. Elektrický odpor a vodivost

Pro popis celkových vlastností vrstvy je používán elektrický odpor příp. jeho převrácená hodnota – vodivost. Velikost elektrického odporu příp. vodivosti se stanovuje z Ohmova zákona ze znalosti velikosti proudu procházejícího vrstvou a úbytku napětí. Elektrická vodivost označuje schopnost látky vést elektrický proud.

2.5.3. Rezistivita

Rezistivita je materiálová konstanta, která vyjadřuje, jakou velikost elektrického odporu má vodič jednotkové délky a jednotkového průřezu. Rezistivitu je možné určit ze vztahu:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} [\Omega \cdot m], \quad (2)$$

kde R je elektrický odpor [Ω], S je obsah kolmého průřezu vodiče [m^2] a l je délka vodiče [m].

2.5.4. Teplotní koeficient elektrického odporu (TKR)

Teplotní koeficient elektrického odporu udává relativní změnu elektrického odporu daného materiálu při změně jeho teploty o $1^\circ C$. Vztah pro určení TKR předpokládá lineární závislost odporu na teplotě, to však platí pouze v určitém omezeném rozmezí teplot.

$$TKR = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta T} [K^{-1}], \quad (3)$$

kde ΔR je změna velikosti odporu [Ω] při změně teploty ΔT [K] a R_0 je počáteční velikost odporu [Ω].

2.5.5. Proudová zatížitelnost

Proudová zatížitelnost udává maximální hodnotu proudu, který může danou proudovou dráhou protékat, aby nebyla překročena dovolená pracovní teplota vodiče ani při trvalém provozu. Na velikost proudové zatížitelnosti mají vliv kromě materiálu vodiče rovněž podmínky, při kterých je vodič provozován, jako je okolní teplota či rychlost proudění vzduchu.

Ztrátový výkon, který vzniká ve vodiči v důsledku jeho proudového zatížení, lze vypočítat ze vztahu:

$$P = RI^2, \quad (4)$$

kde P je ztrátový výkon [W], R je odpor vodiče [Ω] a I je proud procházející vodičem [A].

Teplota vodiče se při daném proudovém zatížení ustálí na takové teplotě, pro kterou bude platit, že dodané teplo je rovno teplu odvedenému. V ustáleném stavu tedy bude platit:

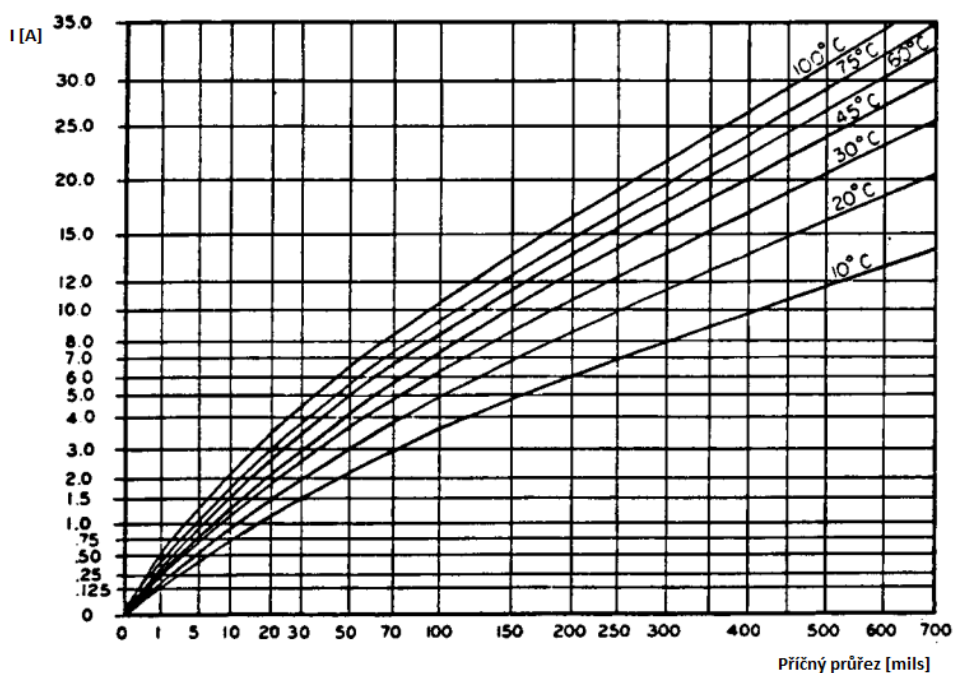
$$RI^2 = \frac{\Delta\vartheta}{R_{th}}, \quad (5)$$

kde $\Delta\vartheta$ je oteplení vodiče [K] a R_{th} je celkový tepelný odpor daného uspořádání [K/W].

Pro návrh desek plošných spojů se dle standardu IPC 2221 pro výpočet maximálního proudového zatížení vodiče využívá vztahu:

$$I_{max} = k_1 \cdot \Delta\vartheta^{k_2} \cdot (w \cdot h)^{k_3}, \quad (6)$$

kde k_1 je konstanta zohledňující umístění spoje, pro vnitřní spoje platí, že k_1 je rovno 0,024 a pro vnější spoje je rovno 0,048; k_2 je pro desky plošných spojů rovna 0,44; k_3 je rovna pro DPS 0,725; $\Delta\vartheta$ je oteplení vodiče [$^{\circ}\text{C}$]; w a h je šířka a tloušťka vodiče [mil].



Obr. 12: Maximální velikost proudového zatížení v závislosti na příčném průřezu vodiče [20]

3. Návrh a realizace vzorků pro měření

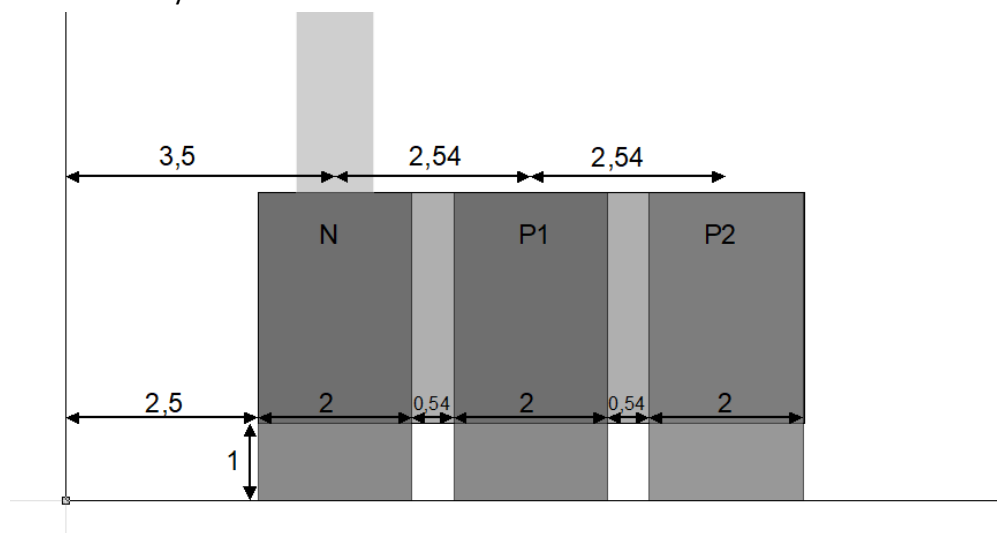
3.1. Návrh vhodných motivů

Návrh motivů pro měření proudové zatížitelnosti vychází z požadavku vzájemné porovnatelnosti měření jednotlivých motivů mezi sebou. To je splněno, pokud je ztrátový výkon na jednotlivých motivech shodný, z čehož vyplývá, že celkový odpor jednotlivých vodivých drah u jednotlivých vzorků musí být rovněž totožný, nebo alespoň co nejbližší. Z rovnice $R=R_{sq} \cdot (l/w)$ vyplývá nutnost zachování konstantního poměru l/w , tak aby nedošlo ke změně celkového odporu vodivé dráhy. Při změně šířky vodivé dráhy je tedy nutno upravit i její délku. Nelze tedy zkoumat odděleně vliv šířky a délky vodivé dráhy, jelikož by nebyla splněna podmínka konstantního poměru l/w a při shodném proudovém zatížení by docházelo k odlišnému zahřívání jednotlivých vzorků, což by významně ovlivnilo porovnatelnost výsledků.

Pro měření byly motivy zvoleny tak, aby celkový odpor vodivé dráhy dosahoval velikosti přibližně 3, 4 a 5 Ω . Daný rozsah odporů byl zvolen z důvodů použité velikosti podložek o rozměrech 25x25 mm, a vyšší hodnoty odporů, především pro větší šířky vodivých drah, by se na danou destičku nevešly. Dále byly zvoleny šířky jednotlivých drah ve velikostech 0,5; 0,8; 1 a 1,2 mm. Ze zvolených parametrů byla následně doložena střední délka vodivé dráhy tak, aby při daném odporu na čtverec použité vodivé polymerní pasty hodnota celkového odporu vodivé dráhy dosahovala požadované velikosti.

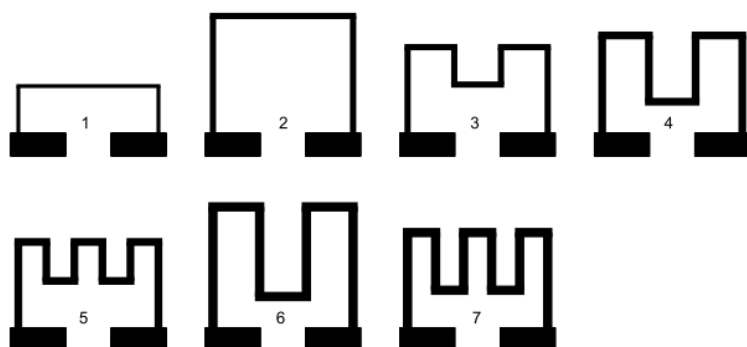
Tvar motivu uzpůsoben tak, aby vodivé dráhy byly na použitém substrátu rozloženy pokud možno co nejvíce rovnoměrně, aby nedocházelo k nerovnoměrnému ohřevu vrstvy vlivem jejího umístění například u kraje podložky a tím tak k nežádoucímu ovlivnění přesnosti měření.

Dalším požadavkem bylo přizpůsobení kontaktních plošek motivů čtyřvodičovému zapojení, proto byly kontaktní plošky rozšířeny tak, aby bylo možné na kontaktní plošku umístit jak napěťový, tak i proudový kontakt, a zároveň aby odpor kontaktní plošky byl co nejmenší a bylo minimalizováno zahřívání vzorků v místě kontaktu. Pro zvýšení stykové plochy bylo využito dvou kontaktů pro připojení proudového okruhu, díky čemuž v místě styku došlo ke snížení proudové hustoty.

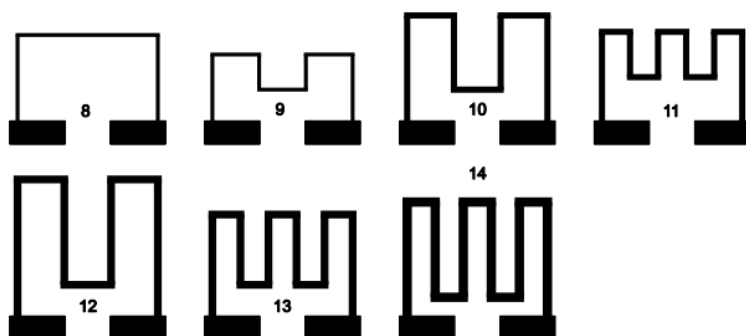


Obr. 13: Umístění proudových a napěťových kontaktů na kontaktní plošce

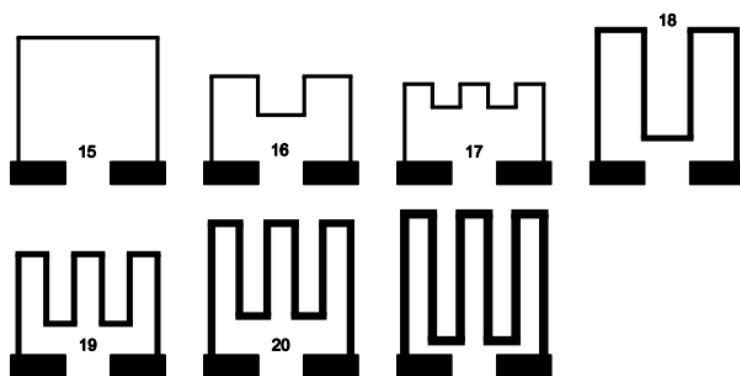
Na základě těchto požadavků, byly vytvořeny testovací motivy pro jednotlivé šířky vodivých drah. Testovací motivy jsou zobrazeny na následujících obrázcích (obr. č. 4, 5 a 6), parametry jednotlivých motivů jsou uvedeny v tabulce č. 2.



Obr. 14: Motiv vzorků s celkovým odporem 3Ω



Obr. 15: Motiv vzorků s celkovým odporem 4Ω



Obr. 16: Motiv vzorků s celkovým odporem 5Ω

Číslo motivu	R [Ω]	Délka dráhy l [mm]	Šířka dráhy w [mm]		
1	3	30	0,5		
2		48	0,8		
3					
4					
5					
6					
7					
8	4			40	0,5
9		64	0,8		
10					
11					
12					
13					
14					
15	5			50	0,5
16					
17					
18		80	0,8		
19					
20					
21	120			1,2	

Tab. 2: Přehled parametrů jednotlivých motivů

3.2. Tvorba předlohy pro síto

Pro tvorbu předlohy na výrobu síta byl použit 2D vektorový program Zoner Callisto, ve kterém byly vytvořeny motivy jednotlivých vzorků dle vypočtených parametrů a zároveň tyto vzorky byly umístěny do finální pozice tak, jak budou umístěny na sítu. Takto připravená předloha byla následně vyexportována do formátu „PDF“ a v tiskovém centru vytištěna ve formě diapozitivu, na jehož základě bylo vyrobeno síto ve specializovaném pracovišti pro výrobu sítotiskových šablon.

3.3. Příprava vzorků

Vzorky byly připraveny pomocí ručního sítotiskového přístroje Uniprint. Do sítotiskového přístroje bylo umístěno síto obsahující navržené motivy. Na výrobu vzorků byla použita pasta Paron 910. Výrobce udávané vlastnosti pasty jsou uvedeny v následující tabulce.

Pasta	Paron 910
Funkční složka pasty	Ag
Viskozita [Pa.s]	15
Obsah pevných částic [wt%]	neuveďeno
Hrúbost zrna [μm]	neuveďeno
Rezistivita [$\Omega\cdot\text{cm}$]	$(2,25 - 7,5)\cdot 10^{-5}$
Odpor na čtverec [Ω/sq]	0,015 – 0,05
Doba, teplota vytvrzování	30-60 min, 130 °C
Doporučená hustota síta [mesh]	neuveďeno

Tab. 3: Vybrané vlastnosti použité pasty

Jako základ vyráběných vzorků byl použit korundový substrát o rozměrech 25x25 mm, z jednotlivých destiček substrátu byla vytvořena plata, která byla vyrovnána pod sítem tak, aby motiv byl nanesen ve správné pozici. To bylo provedeno pomocí kontrolního tisku na plastovou fólii a vyrovnání pozice pracovní desky sítotiskového přístroje pomocí jejího posunu v osách x a y. Aby nedošlo k nežádoucímu posunu plat v průběhu tisku, byla plata zafixována pomocí podtlaku, vytvořeného vysavačem připojeným k sítotiskovému stroji.

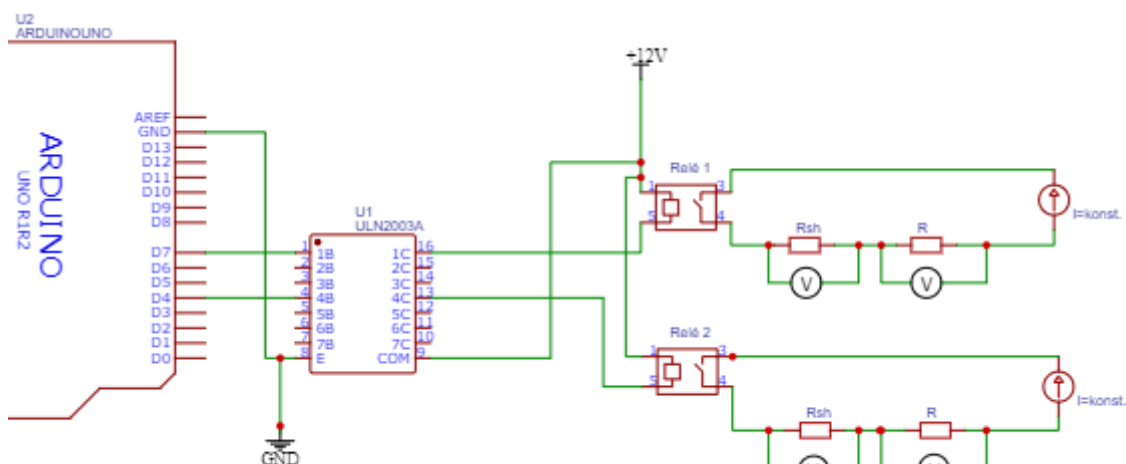
Po správném nastavení sítotiskového stroje, byl zahájen tisk motivů na připravená plata, což bylo realizováno nanesením polymerní pasty na síto a jejím protlačením přes oka síta pomocí rovnoměrného pohybu těrky po sítu. Pro výrobu dalších sad vzorků byl výše zmíněný postup opakován. Jelikož vlastnosti vytvořené vrstvy jsou ovlivněny tlakem působícím na těrku a rychlostí jejího pohybu, bylo nutné udržovat při výrobě jednotlivých sad vzorků stále stejný tlak na těrku a rychlost tažení těrky, což vzhledem k tomu, že se jedná o ruční přístroj, bylo poměrně obtížné.

Pro tisk byly vybrány pouze motivy č. 15 - č. 21. Od těchto vzorků bylo vytvořeno pro měření 24 sad a dalších 5 sad, které tvořily rezervu pro případ, že by některé vzorky byly závadné. Celkem tedy bylo vytvořeno 30 sad po 7 vzorcích, což je dohromady 210 vzorků.

Poté bylo nutné nanesenou polymerní vrstvu vytvrdit, to bylo provedeno pomocí laboratorní dávkovací pece s odporovým ohřevem. Doba a teplota vytvrzování byla zvolena dle specifikace výrobce pasty, tedy 130 °C po dobu 60 minut. Po vyjmutí a vychladnutí vzorků z pece byly jednotlivé vzorky popsány čísly jednotlivých tiskových sad, to v kombinaci s číselným označením motivů, které bylo vytvořeno již při tisku, tvořilo unikátní označení každého vzorku zabraňující jejich vzájemné záměně.

4. Postup měření a vyhodnocení

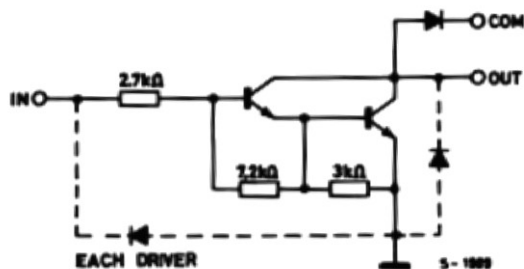
4.1. Schéma zapojení měřicího obvodu



Obr. 17: Schéma měřicího obvodu

Schéma zapojení měřeného obvodu vychází z principu měření odporu pomocí Ohmovy metody, kdy je velikost odporu vrstvy vypočítána ze znalosti velikosti procházejícího proudu a úbytku napětí na měřené tlusté vrstvě, která je ve schématu nahrazena odporem. Přímé měření odporu vrstvy při proudovém zatěžování není možné vlivem paralelního spojení odporu měřené tlusté vrstvy a odporu proudové dráhy laboratorního zdroje. Jelikož se měřené odpory budou pohybovat v řádu jednotek ohmů, bylo pro zvýšení přesnosti měření využito čtyřvodičového zapojení. (viz obrázek přípravku)

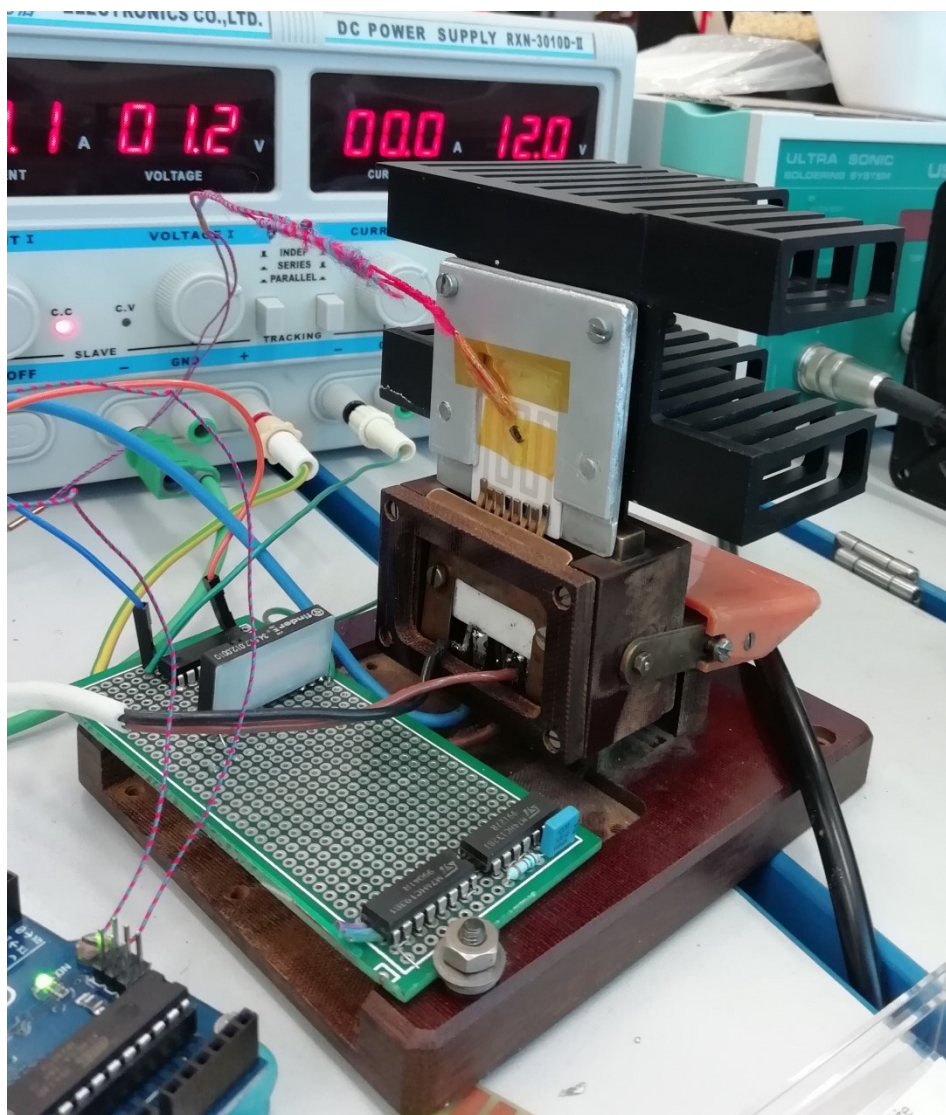
Ke spínání obvodu podle požadavku zasláného programem LabView a k měření času byla využita vývojová deska Arduino Uno, která řídí pomocí digitálních výstupů relé č. 1 a č. 2 a komunikuje s programem LabView pomocí sériové komunikace. Vzhledem k tomu, že velikost proudu z výstupního pinu Arduina je omezena na 40 mA a odběr ovládací cívky relé by tuto hodnotu přesahoval, což by mohlo vést k poškození výstupního pinu, byl k ovládání relé použit integrovaný obvod ULN2003A. Vnitřní zapojení jednotlivých pinů integrovaného obvodu je znázorněno na obr. č. 17. Výhodou tohoto obvodu je, že zároveň obsahuje rezistory pro omezení velikosti proudu, díky čemuž je možné IO použít samostatně bez použití dalších externích odporů, což vede k zjednodušení výsledného zapojení.



Obr. 18: Vnitřní zapojení jednotlivých driverů integrovaného obvodu ULN2003A

4.2. Připojení vzorků do měřícího obvodu

Vzhledem k tomu, že polymerní vrstvy není možné pájet, byla realizace spolehlivého připojení vzorků do měřícího obvodu poměrně obtížná. Proto bylo využito přípravku na měření integrovaných obvodů (Obr. 19), který zajišťuje pevné přitisknutí kontaktních ploch ke vzorku a jeho stabilní upevnění. Přípravek umožňuje připojení až osmi kontaktů, pro účely měření bylo využito šesti kontaktů, po dvou kontaktech na každé straně vzorku pro připojení proudového okruhu a po jednom kontaktu pro připojení voltmetru měřícího úbytek napětí na vrstvě. Rozmístění kontaktů je naznačeno na Obr. 13.

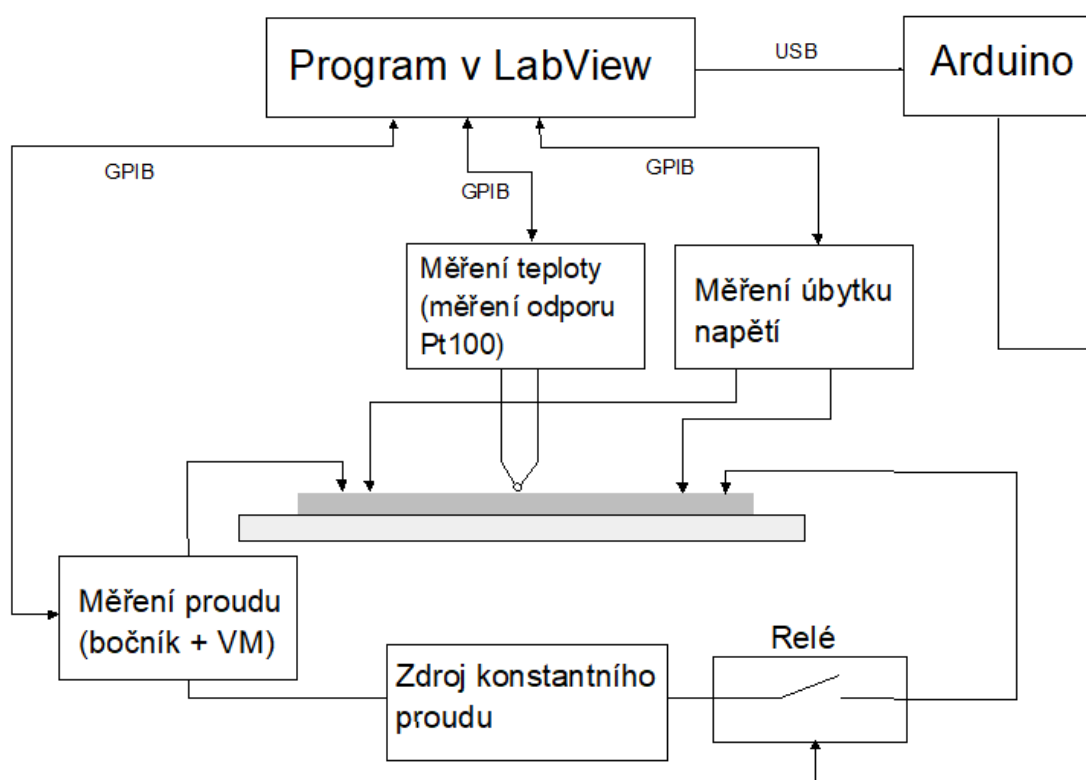


Obr. 19: Přípravek pro připojení vzorku do měřícího obvodu

V případě měření efektu chlazení byl pro zapojení vzorku do obvodu použit stejný přípravek, avšak samotný vzorek byl ještě navíc nasunut do přípravku, který byl pevně připojen na chladič a zajišťoval tak odvod vznikajícího tepla na vrstvě zadní stranou vzorku, toto řešení chlazení vzorku bylo možné díky velké tepelné vodivosti korundového substrátu. Pokud by byl použit substrát s nižší tepelnou vodivostí, jako je např. standardní FR4, bylo by nutné řešit odvod tepla jiným způsobem.

4.3. Realizace měření pomocí programu LabView

K měření vlastností tlustých vrstev byl využit počítačový program LabView, který řídil měřicí přístroje připojené k počítači pomocí rozhraní GPIB a rovněž komunikoval s mikrokontrolérem Arduino, který prováděl měření času a ovládal relé, na principu sériové komunikace přes USB port počítače. Pomocí blokového schématu v programu LabView byl připojenými multimetry v pravidelných intervalech měřen úbytek napětí na měřené vrstvě, úbytek napětí na bočniku pro měření proudů a teplota povrchu vrstvy. Z naměřených hodnot byla poté vypočtena hodnota odporu vrstvy. Tyto naměřené a vypočtené hodnoty byly následně zapsány do souboru pro účely pozdějšího zpracování. Uspořádání měření je naznačeno v blokovém schématu na obr. č. 20.



Obr. 20: Blokové schéma měření

4.3.1. Použité měřicí přístroje

Pro veškerá měření byly využity digitální multimetry HP/Keysight 34401A, které byly připojeny k počítači pomocí převodníku GPIB/USB HP 82357B. Díky tomu, že se jednotlivé přístroje mohou pomocí propojovacích kabelů řetězit za sebou je možné pomocí jednoho převodníku GPIB/USB připojit k počítači najednou až 14 přístrojů kompatibilních s převodníkem. [1]

Nevýhodou tohoto řetězení více přístrojů za sebou je, že měření na všech přístrojích neprobíhá v jednom časovém okamžiku, ale postupně, díky čemuž se liší časy odečtu jednotlivých veličin, což může působit chyby při měření.



Obr. 21: Převodník GPIB/USB HP 82357B



Obr. 22: Digitální multimetr HP/Agilent/Keysight 34401A

Vzhledem k tomu, že nejnovější dostupné ovladače pro použitý převodník byly dostupné pro OS Windows XP, bylo pro připojení digitálních multimetrů k počítači s OS Windows 10 nutné nainstalovat navíc ještě program Keysight Connection Expert. Pro umožnění práce digitálních multimetrů s programem NI LabView bylo dále nutné v nastavení programu Connection Expert povolit komunikaci GPIB s programy kompatibilními s protokolem NI-488.2.

Posledním krokem pro správné připojení multimetru k počítači bylo zvolení komunikace přes GPIB v samotném přístroji a nastavení adresy VISA tak, aby bylo zajištěno, že adresy jednotlivých přístrojů mezi sebou nekolidují.

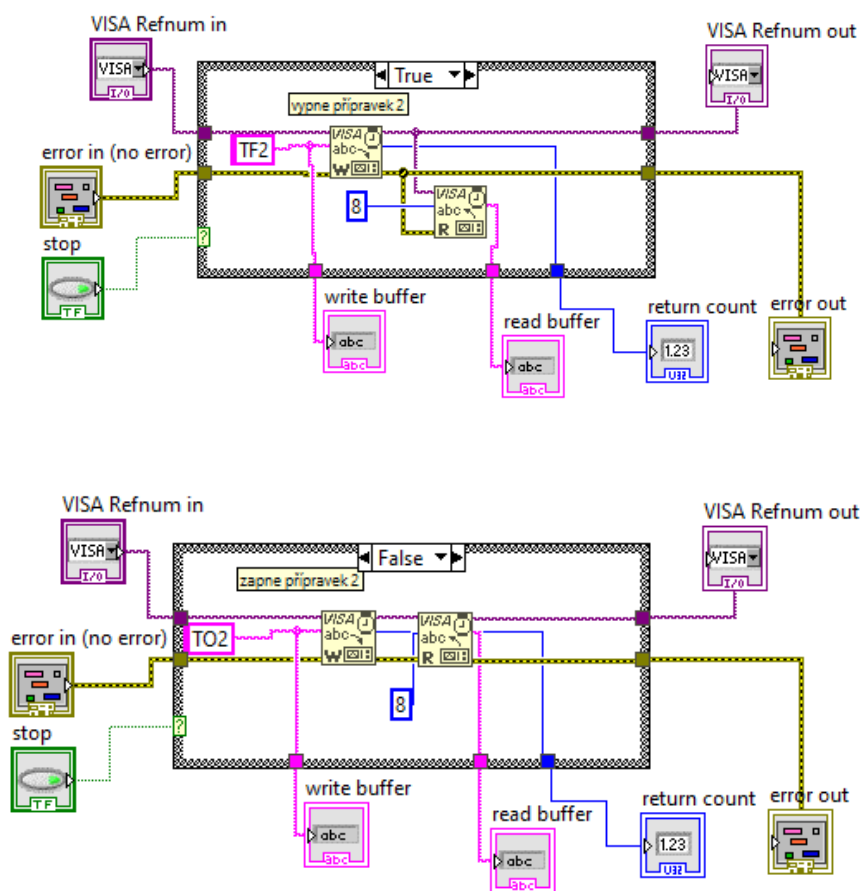
Pro měření velikost zatěžovacího proudu byl použit proudový bočník Keysight 34330A tvořený z přesného $0,001 \Omega$ odporu. Tento proudový bočník je dimenzován na nepřerušované zatěžování proudem až 15 A. Naměřený úbytek napětí na výstupu 1 mV odpovídá procházejícímu proudu 1 A, udávaná chyba je 0,3 % při zatěžování konstantním proudem a střídavým proudem o frekvenci do 1 kHz.

Při měření byl použit laboratorní zdroj Ziaoxin RXN-3010D-II, přičemž tento zdroj byl provozován v režimu konstantního proudu pro zajištění konstantní velikosti procházejícího proudu měřenou vrstvou. Udávaná stabilizace proudu tohoto zdroje je $\leq 0,2 \% + 3 \text{ mA}$.

4.3.2. Návrh ovládacího programu v NI LabView

Blokové schéma v programu LabView vychází ze schématu měřicího obvodu, který je znázorněn na Obr. 20. Blokové schéma je možné rozdělit na několik logických částí, přičemž každá část provádí určitou činnost daného měření. Jedná se o části: část ovládání relé a měření času, měření proudu protékajícího obvodem, měření úbytku napětí na vrstvě, měření teploty vrstvy, výpočet odporu vrstvy a zápis naměřených či vypočtených hodnot do souboru pro pozdější zpracování. Všechny tyto bloky jsou vloženy do smyčky, která neustále opakuje dané kroky do ukončení programu.

4.3.2.1. Ovládání relé a měření času

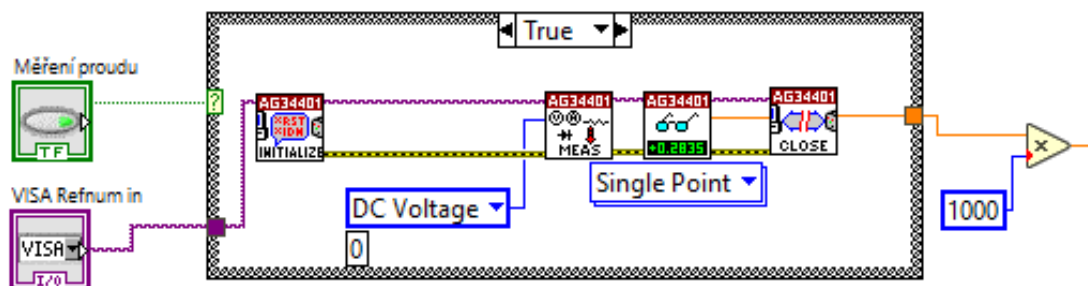


Obr. 23: Ovládání relé prostřednictvím komunikace LabView s vývojovou deskou Arduino Uno

Při požadavku na sepnutí obvodu je pomocí bloku pro sériovou komunikaci „VISA Write“ odeslán pokyn do mikrokontroléru Arduino pro sepnutí daného relé „TO1“ pro přípravek č. 1 resp. „TO2“ pro přípravek č. 2. V čase sepnutí je zároveň uložen čas sepnutí daného relé do paměti, aby při každé iteraci mohl být vypočten čas, který uběhl od sepnutí relé. V případě, že je z důvodu ukončení měření na vzorku požadováno vypnutí relé, je do mikrokontroléru odeslán pokyn „TF1“ resp. „TF2“ pro vypnutí příslušného relé. Čas vypočtený mikrokontrolérem Arduino je čten pomocí bloku „VISA Read“. Z obrázku č. 23 je zřejmé, že v programu LabView je toto realizováno pomocí tzv. „Case Structure“, která na základě toho, zda je proměnná „stop“ rovna hodnotě True či False provede příslušnou část programu.

Určitá nepřesnost této metody měření času je způsobena, jak již bylo naznačeno dříve, postupným odečítáním hodnot jednotlivými přístroji, proto vypočtený čas odpovídá pouze času, kdy zrovna probíhá v dané iteraci programu komunikace počítače s mikrokontrolérem Arduino, a měření přístroji je zpožděno o dobu, po kterou probíhala komunikace programu s mikrokontrolérem a dobu měření všech předchozích přístrojů, avšak pro zjednodušení uvažují ve výpočtu se shodným časem odečtu všech přístrojů.

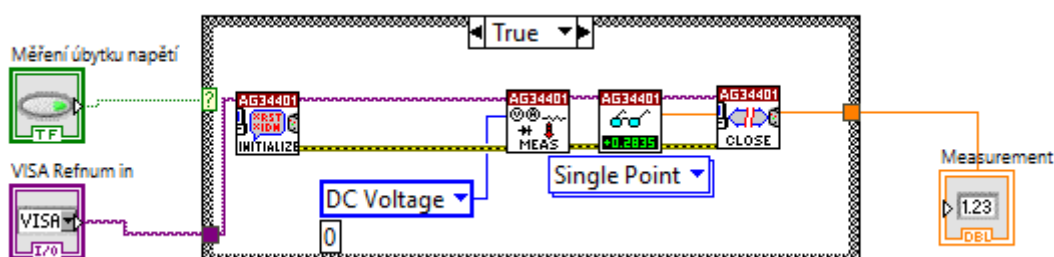
4.3.2.2. Měření proudu protékajícího obvodem



Obr. 24: Blokové schéma měření proudu

Měření proudu protékajícího obvodem je realizováno blokem na obrázku č. 24. Měřicí přístroj je nutné nejprve inicializovat pomocí bloku „Initialize“, jehož vstupním parametrem je adresa VISA, která nás odkazuje na konkrétní přístroj. Pomocí bloku „Configure Measurement“ je nastaveno, jakou veličinu má přístroj měřit, v tomto případě se jedná o stejnosměrné napětí, jelikož se měří proud pomocí bočníku. Dalším blokem „Read“ je přečtena změřená hodnota dané veličiny. Následně je pomocí bloku „Close“ ukončena komunikace s přístrojem. Jednotlivé bloky pro komunikaci s měřicím přístrojem si mezi sebou předávají informace o adrese VISA daného přístroje (fialové propojení) a případně chybová hlášení (žluto-černé propojení). Vzhledem k tomu, že úbytek napětí na bočníku o velikosti 1 mV odpovídá proudu 1 A, je nutné změřenou hodnotu vynásobit tisícem pro získání správné hodnoty procházejícího proudu.

4.3.2.3. Měření úbytku napětí na tlusté vrstvě



Obr. 25: Blokové schéma měření úbytku napětí na tlusté vrstvě

Princip měření úbytku napětí na tlusté vrstvě je podobný jako u měření proudu, který protéká obvodem. Odlišnost spočívá pouze v jiné adrese přístroje VISA.

4.3.2.4. Měření teploty vrstvy

K měření teploty vrstvy bylo použito teplotní čidlo Pt 100, principem měření teploty je měření odporu teplotního čidla a teplota vrstvy je vypočítána ze změřeného odporu na základě známé teplotní závislosti odporu teplotního čidla na teplotě.

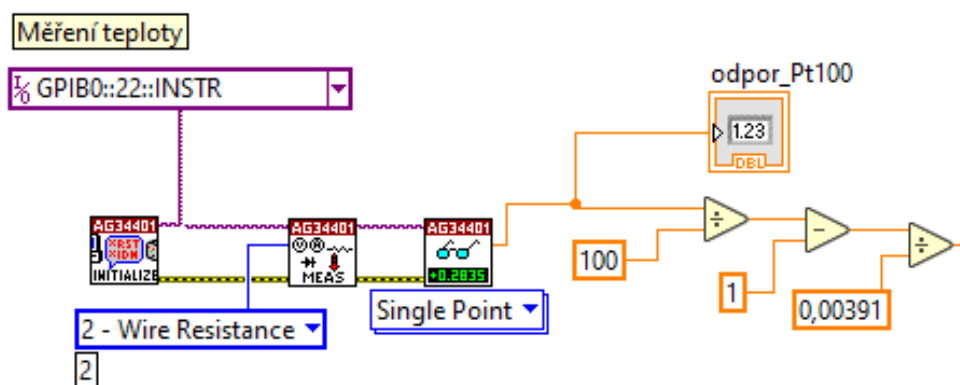
Závislost udávaná výrobcem čidla [2] má v rozmezí teplot 0 – 400°C tvar:

$$R = R_0 \cdot (1 + A \cdot \vartheta + B \cdot \vartheta^2) \quad (7)$$

kde $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $B = - 5,775 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$ a $R_0 = 100 \ \Omega$.

Pro zjednodušení výpočtu a za předpokladu, že závislost v rozsahu teplot, ve kterém se v průběhu měření budeme pohybovat, je lineární, je dále počítáno pouze se závislostí ve tvaru $R = R_0 \cdot (1 + A \cdot \vartheta)$, ze které je možné získat inverzní závislost teploty ϑ na změřeném odporu, která je ve tvaru:

$$\vartheta = \frac{\frac{R}{R_0} - 1}{A} \quad (8)$$

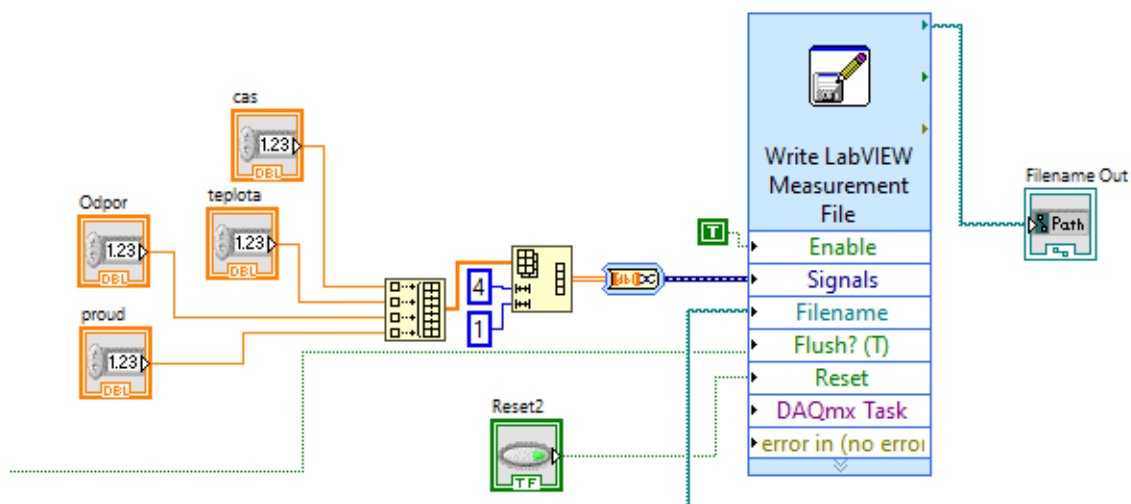


Obr. 26: Blokové schéma měření teploty vrstvy pomocí teplotního čidla Pt100

4.3.2.5. Výpočet odporu vrstvy

Výpočet odporu vrstvy vychází z Ohmova zákona, z předchozích bloků je k dispozici velikost úbytku napětí a velikost proudu procházejícího tlustou vrstvou, velikost odporu vrstvy se vypočítá vydělením úbytku napětí na vrstvě velikostí procházejícího proudu.

4.3.2.6. Uložení naměřených dat do souboru



Obr. 27: Uložení dat do souboru

Ukládání naměřených dat probíhá pomocí bloku „Write To Measurement File“, přičemž tento blok je umístěn ve smyčce tak, aby při každé iteraci došlo k uložení změřených hodnot do souboru, v mém případě jsem zvolil soubor Microsoft Excel.

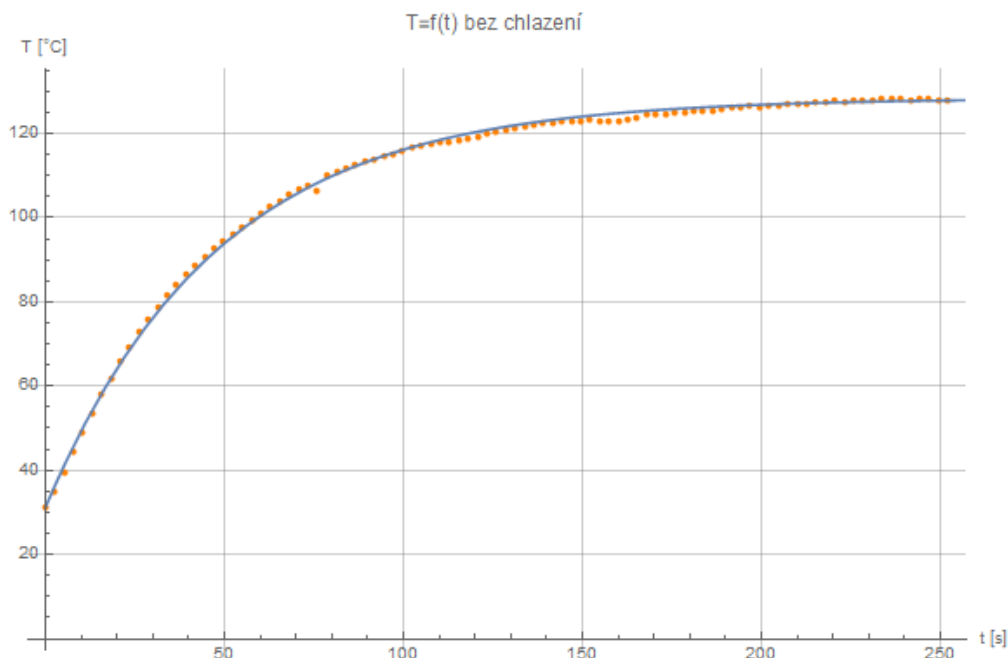
Pro uložení dat ve správném tvaru tak, aby všechny naměřené hodnoty a čas od začátku měření příslušný dané iteraci byly umístěny v jednom řádku, bylo nutné přicházející data do bloku určitým způsobem upravit. Nejprve bylo nutné z naměřených a vypočtených hodnot času, teploty vrstvy, odporu vrstvy a proudu vytvořit pole pomocí bloku „Build Array“, tímto blokem je vytvořen sloupcový vektor v rozměru (4,1), což není pro zápis do souboru vhodné, proto je ještě nutné vzniklý vektor transponovat pomocí bloku „Reshape Array“ do řádkového vektoru o rozměrech (1,4).

Dalšími vstupními parametry bloku jsou název a cesta souboru, do kterého jsou data ukládána. Výstupním parametrem bloku je název souboru, do kterého byla data uložena, pro snadnější orientaci mezi naměřenými daty jednotlivých měření se tento parametr zobrazí na čelním (ovládacím) panelu.

Protože při výměně za nový vzorek není program ukončen, ale je pozastavena pouze část programu týkající se měření na daném přípravku, není měření na druhém přípravku díky tomu ovlivněno. Při opětovném spuštění měření na novém vzorku bylo proto nutné vynutit ukládání do nového souboru, aby zápis naměřených hodnot na novém vzorku neproběhl do stejného souboru jako předcházející vzorek, to bylo realizováno přivedením logické hodnoty true na parametr „Reset“ bloku „Write To Measurement File“.

4.4. Metodika měření a zpracování

Výše popsané zapojení umožnilo provádět měření časové závislosti odporu vrstvy a její teploty při konstantním proudovém zatížení a to do ustálení teploty vrstvy, nebo do přerušování vodivé dráhy.



Obr. 28: Příklad zaznamenaného časového průběhu teploty vrstvy a jejího proložení

Z vynesené časové závislosti teploty vrstvy je poté možné získat parametry náhradního tepelného obvodu, který na základě analogií mezi elektrickými a tepelnými obvody zobrazuje tepelný tok jako proud a teplotu jako rozdíl potenciálů (napětí). Pro popis situace byl zvolen náhradní tepelný obvod, který zavádí mnohá zjednodušení a to především z toho důvodu, že kvůli omezenému množství vhodných měřících přístrojů, které by umožňovaly komunikaci s ovládacím programem, nebylo možné měřit zvlášť teplotu vrstvy a teplotu podložky resp. chladiče. Proto byl zaveden předpoklad, že teplota vrstvy a teplota destičky je totožná, a v důsledku toho je tepelný odpor mezi vrstvou a substrátem rovný nule. Dalším zjednodušujícím předpokladem je uvažování konstantní velikosti tepelného výkonu, což v praxi není splněno vzhledem k nárůstu odporu vrstvy vlivem jejího ohřátí, proto bylo nutné určit střední hodnotu tepelného výkonu, a to pomocí lichoběžníkové metody numerické integrace:

$$P_{stř} = \frac{1}{T} \sum \frac{t_i - t_{i-1}}{2} (P(t_i) + P(t_{i-1})) [W] \quad (8)$$

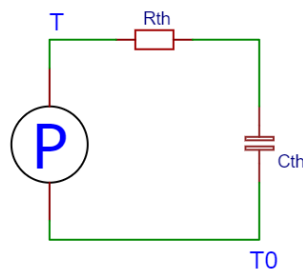
kde $P(t)$ je okamžitý tepelný výkon v daném měřeném bodě určený ze vztahu $P=RI^2$, t_i a t_{i-1} jsou časy od začátku měření příslušné dané iteraci a T je celková doba měření.

Náhradní tepelný obvod je popsán následující rovnicí:

$$T = T_0 + P \cdot R_{th} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{th} \cdot C_{th}}}\right) [^{\circ}C] \quad (9)$$

kde T_0 je teplota okolí, R_{th} je tepelný odpor mezi vrstvou a okolím a C_{th} je celková tepelná kapacita vrstvy, destičky a případně i chladiče.

Část rovnice $R_{th} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{th} \cdot C_{th}}}\right)$ vyjadřuje transientní tepelnou impedanci daného uspořádání, kterou je poté možné využít pro výpočet ustálené teploty vzorku, nejen pro konstantní proudové zatěžování, ale také pro zatěžování impulsní.



Obr. 29: Náhradní tepelné schéma

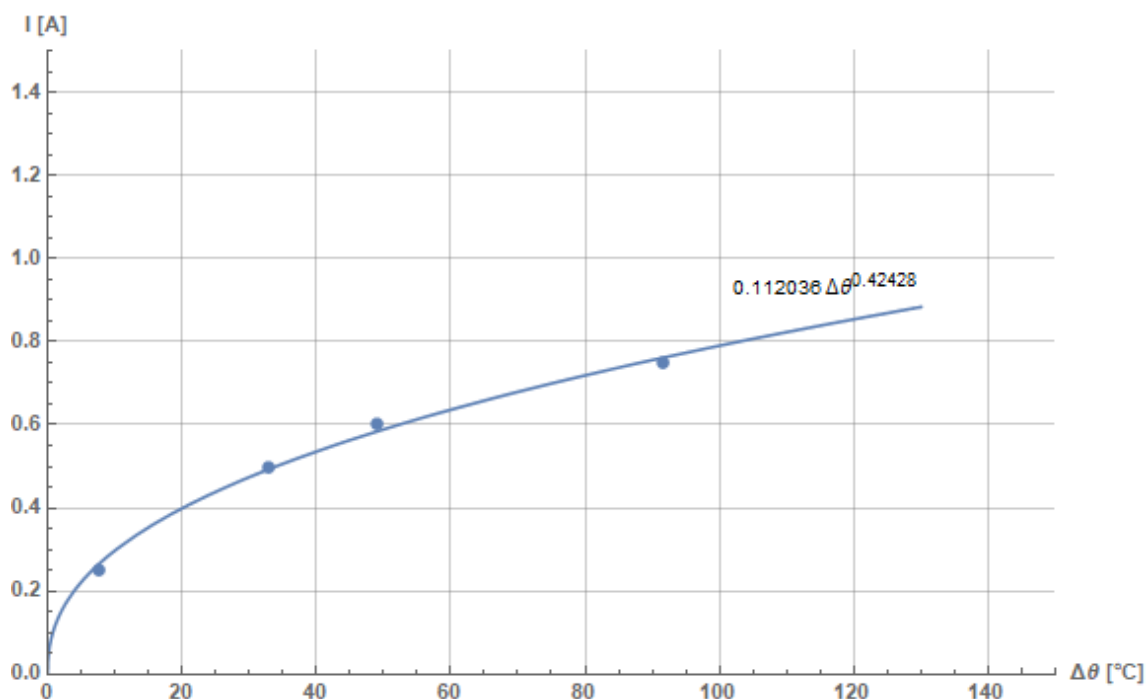
Toto měření bude provedeno na vybraných motivech pro čtyři různé úrovně proudového zatížení tak, aby z naměřených hodnot bylo možné posoudit vliv jednotlivých parametrů proudové dráhy.

Abyste byl omezen vliv vzorků, jejichž vlastnosti se výrazně odlišují od navržených hodnot a to z důvodu např. defektu vodivé dráhy (zúžení, přerušování, zkrat mezi kontaktními ploškami) bude před vlastním měřením proudového zatěžování provedeno měření odporu vodivé dráhy. Nevyhovující vzorky budou na základě tohoto měření odporu vyřazeny.

Ze statistických důvodů bude pro každý motiv a každé proudové zatížení měření provedeno třikrát, z těchto měření bude určena střední závislost odporu a teploty na čase. Pro určení vlivu chlazení bude pro každý motiv a každé proudové zatížení provedeno rovněž měření s instalovaným pasivním chladičem. Výsledky měření u vzorků, u kterých dojde při měření k přerušování dráhy, budou z celkového vyhodnocení vyřazeny.

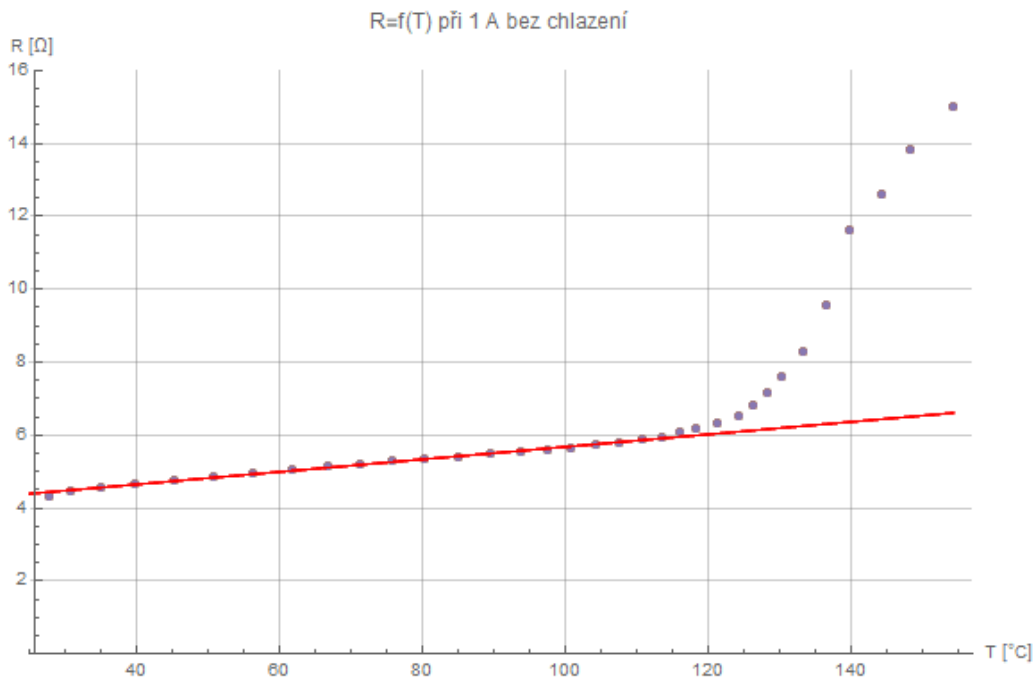
Celkem tedy bude nutné provést měření na 96 vzorcích, což by v případě měření každého vzorku zvláště bylo velice časově náročné, proto bylo měření navrženo tak, aby mohlo probíhat měření dvou vzorků paralelně na dvou nezávislých měřících okruzích, díky čemuž by se časová náročnost měření snížila na polovinu. Avšak vzhledem k nedostatku vhodných měřících přístrojů bylo nutné od tohoto záměru ustoupit a měření bude prováděno postupně pouze na jednom měřicím přípravku.

Z naměřených hodnot dosaženého oteplení vzorků pro jednotlivá proudová zatížení budou určeny koeficienty vzorce (6) pro výpočet maximálního proudového zatížení při daných rozměrech vrstvy. Pro výpočet koeficientů bude předpokládáno, že je šířka i tloušťka dráhy konstantní u všech vzorků daného testovaného motivu.



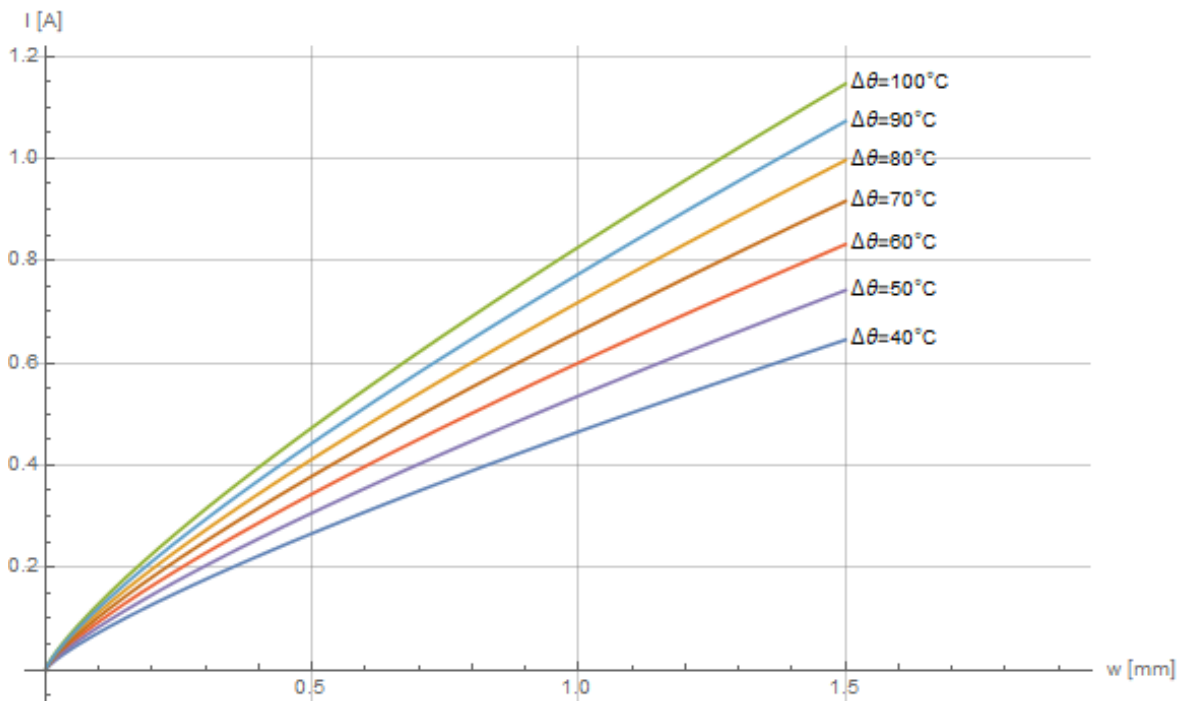
Obr. 30: Graf závislosti maximální hodnoty proudu v závislosti na oteplení

Z naměřených hodnot bude rovněž možné vytvořit závislost odporu vrstvy na teplotě, z čehož bude možné identifikovat, v případě odklonu závislosti od předpokládaného lineárního průběhu, teplotu, při které začíná docházet k degradaci vrstvy a případně také zjistit vliv velikosti proudového zatížení na teplotní závislost odporu. Ze získané závislosti budou rovněž získány hodnoty R_0 a TKR pro jednotlivá měření, které budou využity například pro pozorování vlivu rozptylu odporu vzorků na jejich oteplení a vlivu proudového zatížení na velikost koeficientu odporu.



Obr. 31: Graf závislosti odporu na teplotě

Dosažením vypočtených koeficientů k_1 , k_2 a k_3 rovnice do (6) bude možné sestavit graf dosaženého oteplení vrstvy na šířce dráhy a velikosti proudového zatížení, tento graf bude obdobou toho, který se používá při návrhu šířky a tloušťky vodivých drah u desek plošných spojů. Tento graf by poté mohl být například používán pro návrh rozměrů vrstvy při požadovaném proudovém zatížení a maximálním oteplení vrstvy.



Obr. 32: Graf závislosti maximální hodnoty proudového zatížení vrstvy pro jednotlivé hodnoty oteplení v závislosti na šířce dráhy

5. Výsledky měření

5.1. Naměřená časová závislost teploty pro různá proudová zatížení vzorků

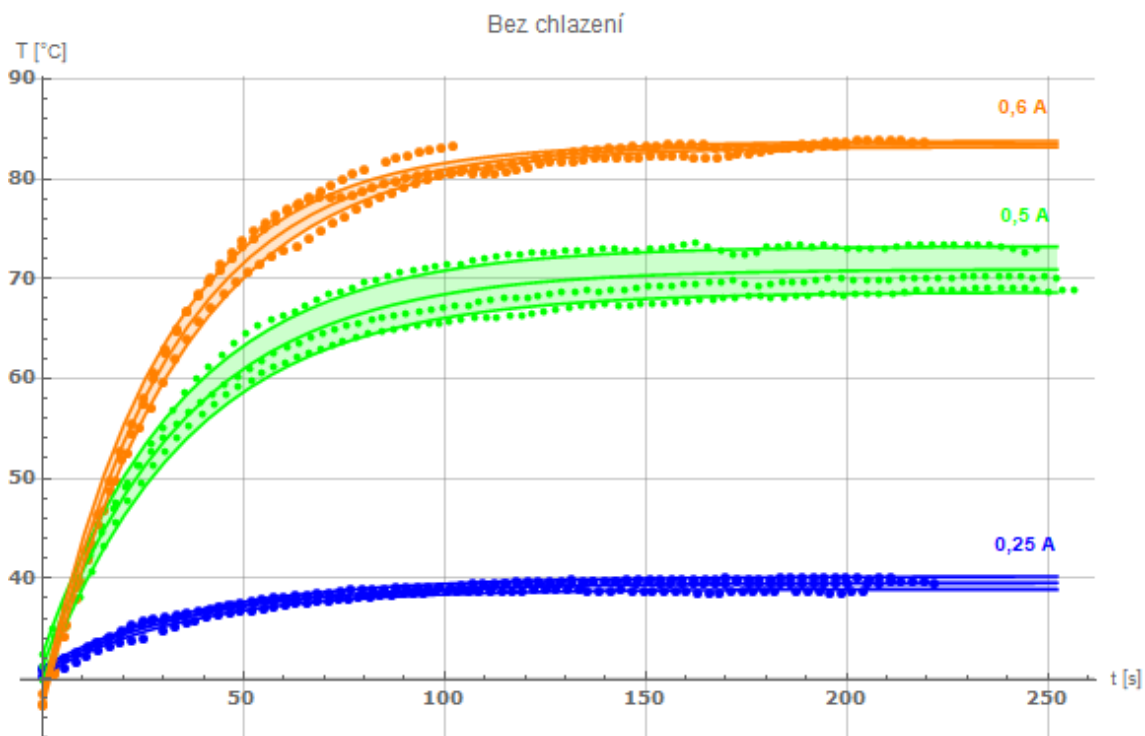
Jako první v pořadí ve výsledcích uvádím naměřené časové závislosti teploty povrchu vrstvy při různých velikostech proudového zatížení, při různých šířkách vodivých drah a při různých typech chlazení u jednotlivých motivů. Měření pro daný motiv, proudové zatížení a typ chlazení bylo provedeno vždy na třech různých vzorcích tak, aby byl alespoň částečně omezen vliv rozdílů mezi jednotlivými vzorky. Zároveň pokud by opakování měření bylo realizováno na tom samém vzorku, mohlo by další měření být ovlivněno degradací vzorku vlivem jeho tepelného namáhání z předchozího měření. Avšak odlišnost parametrů vzorků není jediné, co ovlivňuje výsledky měření. Výsledky jsou rovněž ovlivněny tím, že velikost zatěžovacího proudu při jednotlivých opakováních měření není stejná vzhledem k určité nedokonalosti proudové regulace použitého zdroje, navíc vzhledem k tomu, že ztrátový výkon závisí na druhé mocnině zatěžovacího proudu, tak výsledná chyba je tímto ještě umocněna.

Naměřené hodnoty povrchové teploty vzorku byly následně proloženy exponenciálou dle rovnice č. 9, ze které poté bylo následně možné určit náhradní parametry prvků tepelného obvodu. Na následujících grafech je zobrazena střední časová závislost teploty povrchu vzorku, která je rozšířena o pásmo, jehož šířka je dána velikostí směrodatné odchylky ze zjištěných exponenciálních průběhů pro jednotlivá opakování.

Pro porovnání výsledků byly z naměřených průběhů vypočteny kromě průměrné hodnoty dosaženého oteplení vzorku vlivem proudového zatížení, také směrodatná odchylka a variační koeficient a tyto hodnoty byly zaneseny do tabulky. Pro snazší určení důvodu výkyvů dosažených hodnot oteplení při stejném proudovém zatížení a měřeném motivu byly do tabulky rovněž zaneseny vypočtené hodnoty odporů vzorků v odpovídajících měřeních.

5.1.1. Šířka dráhy 0,5 mm (motiv č. 15)

V rámci měření ohřívání motivu č. 15, který obsahoval jednu vodivou dráhu o délce 50 mm a šířce 0,5 mm, došlo při zatěžování proudem 0,25 A k ohřevu vzorku o 8,8°C oproti teplotě okolí, která byla stanovena na 25°C, při zatěžování proudem o velikosti 0,5 A došlo k ohřátí vzorků průměrně o 39,8°C, a při zatížení proudem 0,6 A dosáhlo oteplení vzorků průměrně 55,8°C.



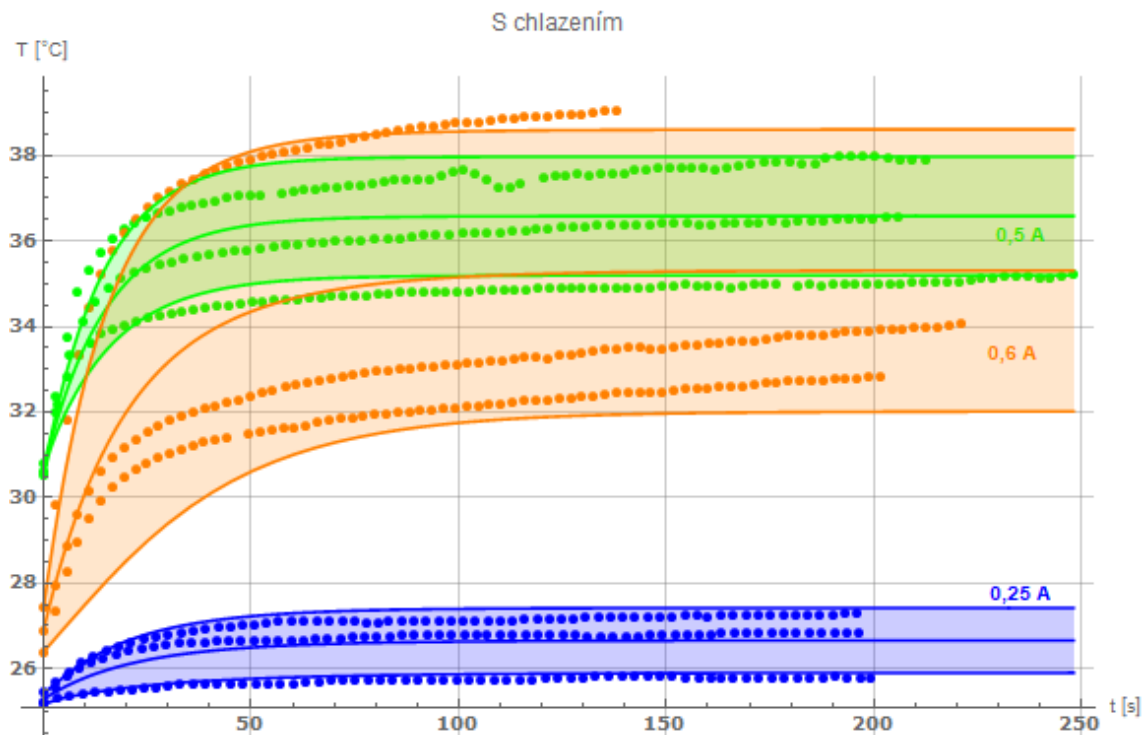
Graf 1: Časová závislost teploty vrstvy při jednotlivých proudových zatíženích u vzorků s motivem č. 15 bez chladiče

Zatížení proudem o velikosti 0,75 A nebylo v případě těchto vzorků provedeno z toho důvodu, že při této hodnotě proudového zatížení nastalo poškození vzorků vlivem nesprávného nastavení napěťové hladiny zdroje, a tak v časovém rozmezí mezi okamžikem sepnutí relé a okamžikem, než zdroj přepnul z režimu konstantního napětí na režim konstantního proudu, byl proud omezen pouze hodnotou odporu vzorku, díky čemuž hodnota proudu dosahovala výrazně vyšších hodnot, než byla zamýšlena.

V úseku provádění měření na vzorcích za použití chladiče, se projevilo dle očekávání ohřívání vzorků výrazně méně. Při zatěžování proudem o velikosti 0,25 A, vzrostla teplota vzorku průměrně o 1,4°C, při vyšších proudových zatíženích došlo k ohřátí vzorku o 11,6°C resp. 10,3°C. Dále bylo lze pozorovat, že v případě měření s instalovaným chladičem je rozptyl průběhů jednotlivých úrovní proudového zatížení vyšší, to je možné vysvětlit větším rozptylem hodnot odporů použitých vzorků při měření v této konfiguraci.

Z grafu je rovněž patrné, že u měření se zatěžováním proudem 0,5 A a 0,6 A se projevilo výraznější ohřátí vzorku při zatěžování vzorků nižším proudem (0,5 A), přestože průměrná hodnota odporu vzorků, které byly zatěžovány proudem vyšším (tj. 0,6 A), je rovněž vyšší, takže ztrátový výkon na vzorcích zatěžovaných proudem 0,6 A byl rovněž vyšší, oproti zatěžování proudem 0,5 A. Tento výsledek měření lze tedy vysvětlit pouze tím, že při

zatěžování vzorků proudem 0,5 A nebyl chladič s přípravkem dostatečně ochlazen z předchozího měření na teplotu okolí, díky čemuž byla účinnost chlazení snížena, což je ostatně také zřejmé z grafu, kde průběhy odpovídající zatěžování proudem 0,5 A začínají na teplotách mezi teplotami 30°C a 31°C, zatímco průběhy při zatěžování proudem 0,6 A začínají na hodnotě okolo 27°C.



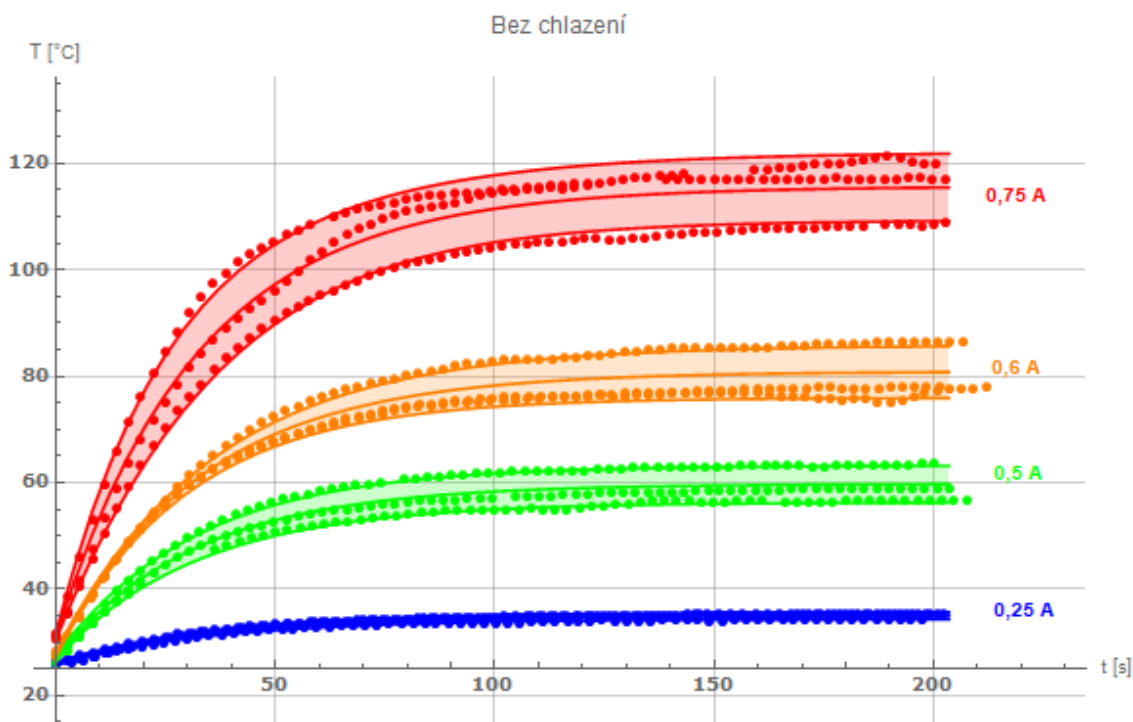
Graf 2: Časová závislost teploty vrstvy při jednotlivých proudových zatíženích u vzorků s motivem č. 15 s chladičem

I [A]	bez chlazení		s chlazením	
	ΔT [°C]	R_0 [Ω]	ΔT [°C]	R_0 [Ω]
0,25	13,85	5,81	1,85	6,18
	15,14	5,98	0,83	4,00
	14,63	5,90	2,31	6,28
průměr \bar{x}	14,54	5,90	1,66	5,49
směr. odchylka s	0,65	0,07	0,62	1,05
variační koeficient v_x	4,47	1,18	37,28	19,15
0,5	45,25	4,77	10,21	5,06
	44,08	5,30	12,98	6,15
	48,52	5,25	11,56	5,62
průměr \bar{x}	45,95	5,11	11,58	5,61
směr. odchylka s	2,30	0,29	1,39	0,54
variační koeficient v_x [%]	5,01	5,72	11,99	9,69
0,6	58,48	6,26	9,05	6,93
	58,83	6,14	14,06	8,35
	58,22	5,79	7,84	5,56
průměr \bar{x}	58,51	6,06	10,31	6,95
směr. odchylka s	0,31	0,25	3,30	1,39
variační koeficient v_x [%]	0,53	4,04	31,97	20,07

Tab. 4: Dosažené hodnoty oteplení a naměřené hodnoty R_0 u motivu č. 15

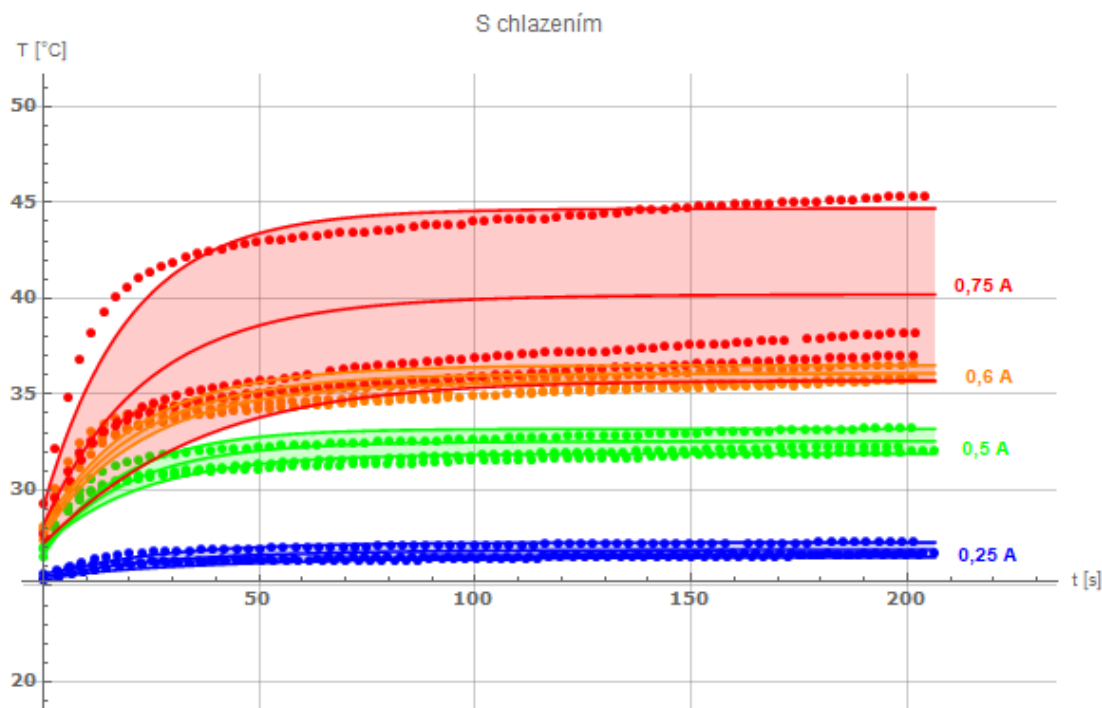
5.1.2. Šířka dráhy 0,8 mm (motiv č. 18)

Při měření vzorků s natištěným motivem č. 18, které obsahovaly 80 mm dlouhou vodivou dráhou, jejíž předpokládaná šířka dosahovala 0,8 mm, byla při měřeních bez použití chladiče s proudovým zatěžováním konstantním proudem o velikosti 0,25 A; 0,5 A; 0,6 A a 0,75 A zjištěna ohřátí vzorků průměrně o 10°C; 34,8 °C; 55,9°C a 90,7 °C, což jsou hodnoty velice podobné jako u měření motivu č. 15.



Graf 3: Časová závislost teploty vrstvy při jednotlivých proudových zatíženích u vzorků s motivem č. 18 bez chladiče

V případě měření vzorků s připojeným chladičem se vzorky ohřály na teplotu v průměru o 80 % nižší než u měření bez využití chladiče. Na časových průbězích teploty vzorku je rovněž možné pozorovat, že při nízkých hodnotách proudového zatížení vzorků není lineární nárůst teploty tak patrný a po určitém čase dojde k ustálení teploty. Ale například při zatížení vzorků nejvyšší hodnotou proudového zatížení je zjevné, že teplota vzorku po počátečním exponenciálním nárůstu roste již téměř lineárně.



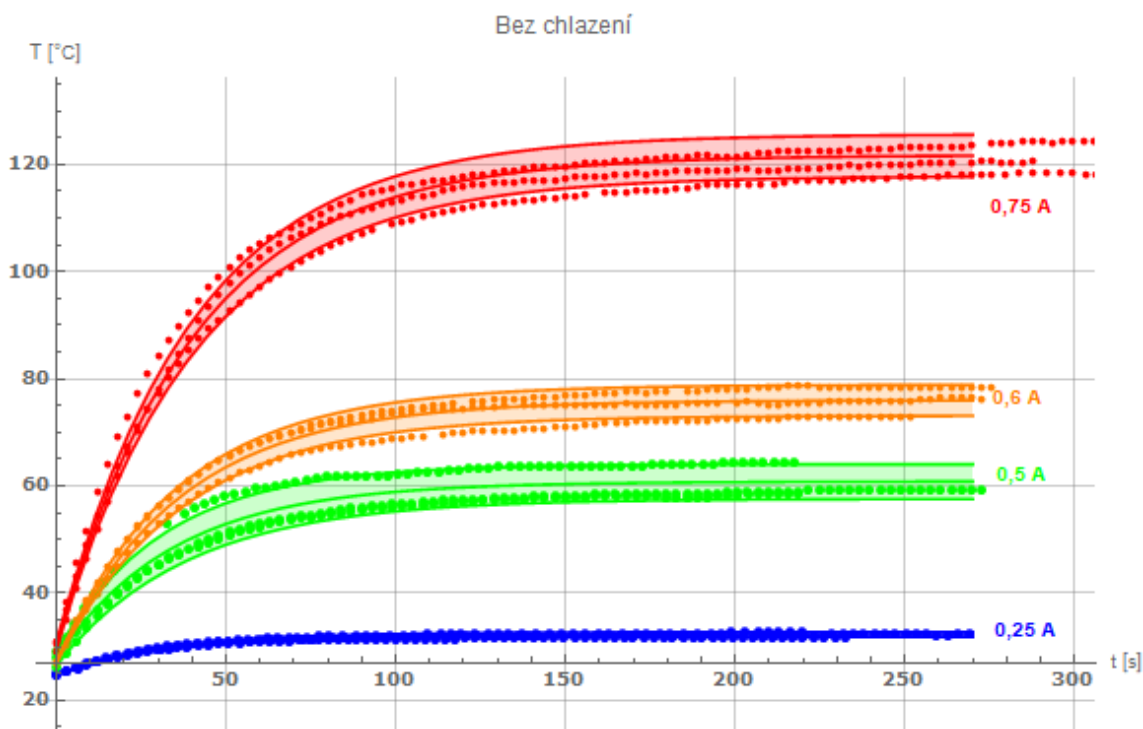
Graf 4: Časová závislost teploty vrstvy při jednotlivých proudových zatíženích u vzorků s motivem č. 18 s chladičem

I [A]	bez chlazení		s chlazením	
	ΔT [°C]	R_0 [Ω]	ΔT [°C]	R_0 [Ω]
0,25	10,44	5,57	1,73	6,18
	9,26	5,16	2,32	4,00
	10,29	5,23	1,61	6,28
průměr \bar{x}	10,00	5,32	1,89	5,49
směr. odchylka s	0,64	0,18	0,31	1,05
variační koeficient v_x [%]	6,42	3,36	16,50	19,15
0,5	33,95	6,31	7,04	5,06
	38,56	5,44	7,31	6,15
	31,77	4,89	8,28	5,62
průměr \bar{x}	34,76	5,55	7,55	5,61
směr. odchylka s	3,47	0,72	0,65	0,54
variační koeficient v_x [%]	9,97	12,88	8,66	9,69
0,6	53,13	5,69	10,80	4,88
	61,61	5,88	11,58	7,48
	52,94	5,39	10,88	6,74
průměr \bar{x}	55,89	5,65	11,08	6,37
směr. odchylka s	4,95	0,25	0,43	1,34
variační koeficient v_x [%]	8,86	4,38	3,91	21,04
0,75	83,73	5,48	20,34	6,50
	96,22	6,00	12,05	5,03
	92,20	6,46	13,22	5,93
průměr \bar{x}	90,72	5,98	15,20	5,82
směr. odchylka s	6,38	0,49	4,49	0,74
variační koeficient v_x [%]	7,03	8,19	29,51	12,71

Tab. 5: Dosažené hodnoty oteplení a naměřené hodnoty R_0 u motivu č. 18

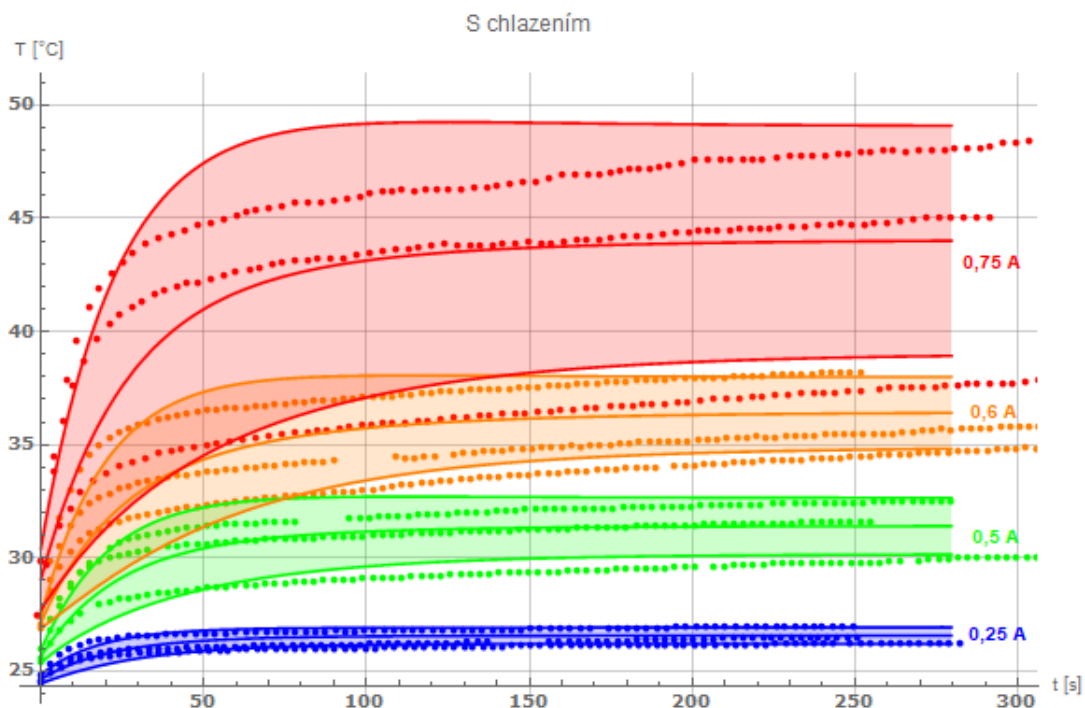
5.1.3. Šířka 1 mm (motiv č. 20)

Při zatěžování vzorků s natištěným motivem č. 20, obsahující vodivou dráhu o délce 100 mm a šířce 1 mm bylo naměřeno ohřátí vzorků při zvolených hodnotách zatěžovacího proudu následovně: při zatížení vzorků proudem o velikosti 0,25 A došlo v průměru k ohřátí vzorku o 7,3°C; při zatížení proudem 0,5 A se teplota vzorku průměrně zvýšila o 35,8°C; při zatížení vybraných vzorků proudem, který dosahoval velikosti 0,6 A, došlo k průměrnému zvýšení teploty o 51°C a při zatížení nejvyšším zvoleným proudem bylo zjištěno průměrné ohřátí vzorků o 96,8 °C.



Graf 5: Časová závislost teploty vrstvy při jednotlivých proudových zatíženích u vzorků s motivem č. 20 bez chladiče

Při měření s instalovaným chladičem oteplení vzorků při zatížení proudem 0,25 A v průměru dosáhlo 1,6°C, při zatížení proudem dosáhla průměrná hodnota oteplení 6,4°C, a zatěžování vzorku proudem 0,6 A se projevilo ohřátím vzorku v průměru o 11,4°C. Při nejvyšší měřené úrovni proudového zatížení dosáhlo oteplení průměrně 19,1 °C. Na níže uvedeném grafu je rovněž možné pozorovat, že jednotlivá opakování pro měření při proudovém zatížení 0,6 A a 0,75 A se od sebe výrazně liší, to je pravděpodobně způsobeno velkým rozptylem odporů jednotlivých vzorků. V případě tohoto motivu je více viditelný lineární nárůst teploty po počátečním exponenciálním nárůstu i v případě nižších hodnot proudového zatížení.



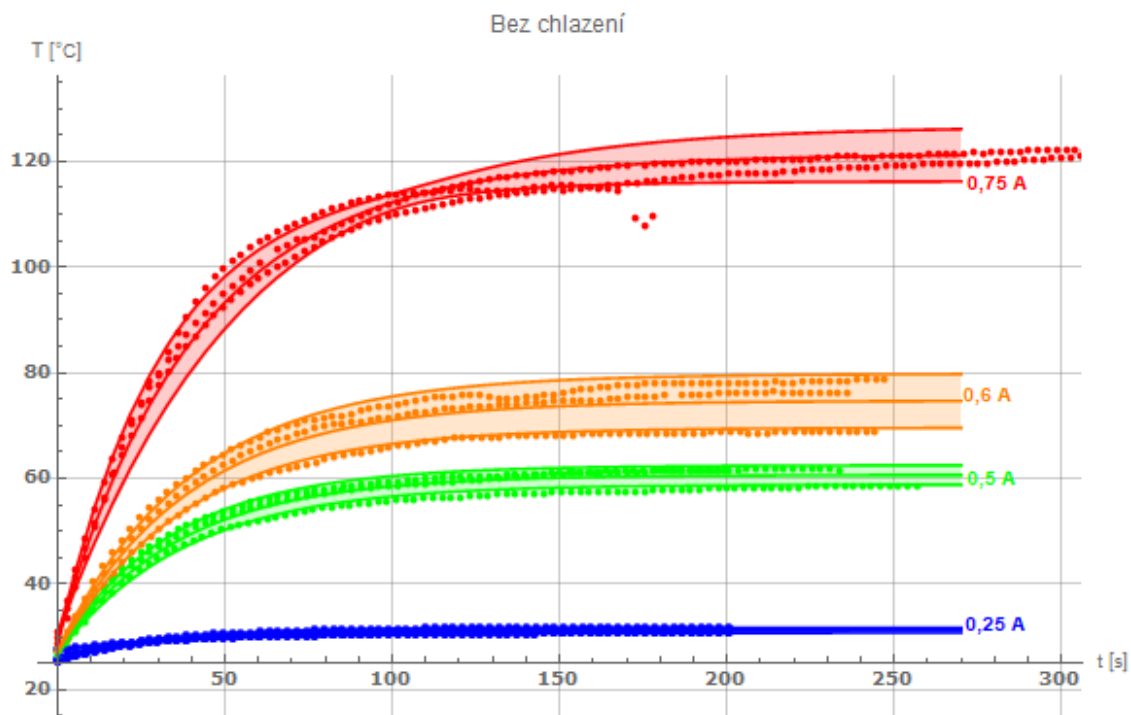
Graf 6: Časová závislost teploty vrstvy při jednotlivých proudových zatíženích u vzorků s motivem č. 20 s chladičem

I [A]	bez chlazení		s chlazením	
	ΔT [°C]	R_0 [Ω]	ΔT [°C]	R_0 [Ω]
0,25	7,69	4,95	1,97	5,43
	6,79	4,45	1,27	5,54
	7,31	4,53	1,47	5,50
průměr \bar{x}	7,27	4,64	1,57	5,49
směr. odchylka s	0,45	0,22	0,29	0,04
variální koeficient v_x	6,21	4,70	18,81	0,81
0,5	39,53	5,79	7,53	4,51
	34,36	4,69	5,07	4,78
	33,59	4,60	6,63	4,86
průměr \bar{x}	35,83	5,03	6,41	4,72
směr. odchylka s	3,23	0,66	1,25	0,18
variální koeficient v_x [%]	9,02	13,22	19,43	3,85
0,6	53,63	4,75	10,89	5,01
	51,49	4,91	10,25	5,55
	47,88	4,46	13,19	5,96
průměr \bar{x}	51,00	4,71	11,44	5,50
směr. odchylka s	2,90	0,23	1,55	0,48
variální koeficient v_x [%]	5,70	4,89	13,51	8,64
0,75	101,12	5,08	23,49	6,95
	95,58	5,58	20,05	5,36
	93,56	4,92	13,60	5,14
průměr \bar{x}	96,75	5,19	19,05	5,81
směr. odchylka s	3,91	0,35	5,02	0,99
variální koeficient v_x [%]	4,05	6,69	26,35	17,01

Tab. 6: Dosažené hodnoty oteplení a naměřené hodnoty R_0 u motivu č. 20

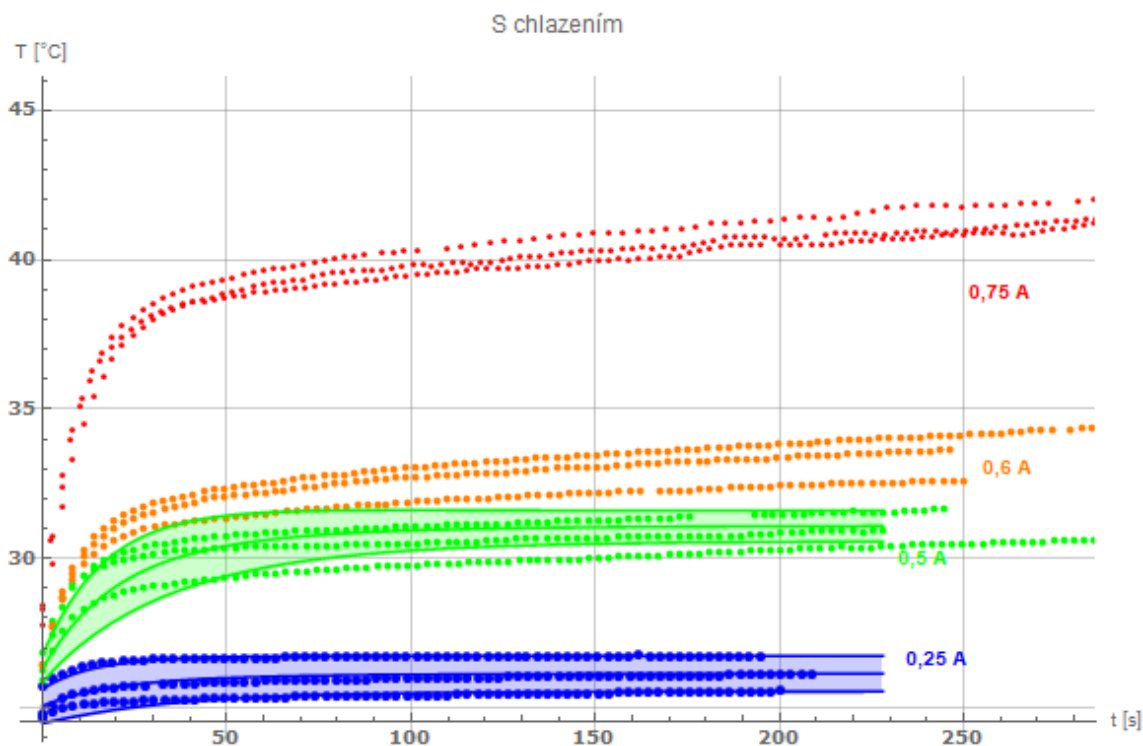
5.1.4. Šířka 1,2 mm (motiv č. 21)

V případě zatěžování vzorků s natištěným motivem č. 21, který byl tvořen vodivou dráhou o délce 120 mm a šířce 1,2 mm, zvolenými hodnotami proudu stejných jako u ostatních motivů bylo bez použití chladiče dosaženo následujících oteplení vzorků: 6,2°C; 35,7°C; 49,7°C a 96,8°C.



Graf 7: Časová závislost teploty vrstvy při jednotlivých proudových zatíženích u vzorků s motivem č. 21 bez chladiče

Při použití chladiče, stejně jako u ostatních motivů, byla zjištěná zahřátí vzorků výrazně nižší, než při měřeních bez použití chladiče. Naměřené nárůsty teplot dosáhly hodnot 1,1°C; 8,4°C; 10,9°C a 17,8°C. V případě měření zatížení proudy 0,6 A a 0,75 A byly vypočtené proklady průběhů natolik nepřesné, že jsem je z důvodů zvýšení přehlednosti do výsledného grafu nevnášel.



Graf 8: Časová závislost teploty vrstvy při jednotlivých proudových zatíženích u vzorků s motivem č. 21 s chladičem

I [A]	bez chlazení		s chlazením	
	ΔT [°C]	R_0 [Ω]	ΔT [°C]	R_0 [Ω]
0,25	6,74	4,98	1,74	5,38
	5,86	4,27	1,11	5,21
	6,11	4,40	0,56	4,87
průměr \bar{x}	6,23	4,55	1,14	5,15
směr. odchylka s	0,45	0,31	0,48	0,21
variační koeficient v_x [%]	7,27	6,79	42,57	4,11
0,5	36,58	6,54	5,94	4,30
	36,86	5,05	5,67	4,74
	33,54	4,60	6,65	4,52
průměr \bar{x}	35,66	5,40	6,09	4,52
směr. odchylka s	1,84	1,01	0,51	0,22
variační koeficient v_x [%]	5,16	18,79	8,38	4,94
0,6	53,72	4,90	7,61	4,58
	51,41	4,61	9,47	5,86
	43,94	4,38	8,63	5,12
průměr \bar{x}	49,69	4,63	8,57	5,19
směr. odchylka s	5,11	0,26	0,93	0,65
variační koeficient v_x [%]	10,29	5,60	10,86	12,44
0,75	101,12	6,37	17,35	5,19
	95,58	5,04	17,34	4,51
	93,56	4,87	18,78	5,16
průměr \bar{x}	96,75	5,43	17,82	4,95
směr. odchylka s	3,91	0,82	0,83	0,38
variační koeficient v_x [%]	4,05	15,04	4,63	7,77

Tab. 7: Dosažené hodnoty oteplení a naměřené hodnoty R_0 u motivu č. 21

5.1.5. Shrnutí výsledků naměřených časových závislostí teploty

Z všech naměřených průběhů je patrné, že použitý náhradní tepelný obvod v případě měření bez chladiče dostatečně přesně popisuje skutečnost a vypočtené proklady svým průběhem téměř odpovídají naměřeným hodnotám, proto zjištěné hodnoty tepelného odporu a tepelné kapacity je možné považovat za směrodatné.

V případě uspořádání s chladičem je již zjednodušení náhradního tepelného obvodu příliš velké a tak nebylo možné najít exponenciální průběhy, které by dostatečně přesně popisovaly naměřené hodnoty. Uvažovaný náhradní tepelný obvod totiž obsahuje pouze jeden tepelný odpor a jednu tepelnou kapacitu, což neodpovídá skutečnému uspořádání. V tomto případě by pro nalezení správného průběhu bylo nutné uvažovat tepelný odpor mezi vzorkem a přípravkem, přípravkem a chladičem, a chladičem a okolím, a stejně tak by bylo nutné uvažovat tepelné kapacity vzorku, přípravku pro upevnění vzorku na chladič a samotného chladiče. A vzhledem k uspořádání těchto náhradních obvodových prvků tepelného obvodu není možné je zahrnout do jednoho tepelného odporu a jedné tepelné kapacity, tak jak bylo v tomto případě vlastně provedeno. Určení náhradních parametrů takového náhradního tepelného obvodu by vyžadovalo měření teploty nejen povrchu vzorku, ale také přípravku a chladiče, což z důvodu omezeného množství vhodných přístrojů nebylo možné.

Dále je na naměřených průbězích při aplikaci chladiče patrné, že vzhledem k velké tepelné kapacitě chladiče a upevňovacího přípravku a pravděpodobně také vlivem vysokého tepelného odporu mezi upevňovacím přípravkem a chladičem, nebylo dosaženo ustálení teploty na konečné hodnotě, což mělo rovněž vliv na přesnost určení náhradních tepelných obvodových prvků, ale také hodnot oteplení vzorků. Problém s ustálením teploty chladiče rovněž mohl být způsoben tím, že kvůli testovacímu přípravku musel být chladič orientován o 90° jinak, než pro jakou polohu byl navržen, proto přirozené proudění vzduchu okolo žeber chladiče nemuselo být ideální. Avšak i přes poměrně velkou nepřesnost těchto souhrnných náhradních parametrů v případě měření bez chladiče je zahrnuji do výsledků měření jako ukázkou významného vlivu chlazení na možnosti proudového zatěžování vzorků.

5.2. Parametry náhradního tepelného obvodu

Z naměřených časových závislostí teploty vrstvy byly vypočteny parametry náhradního tepelného obvodu. Z hodnot v následující tabulce je patrné, že v případě měření bez použití chladiče je velikost tepelného odporu mezi vrstvou a okolím výrazně vyšší, než v případě měření s použitím chladiče, což je především dáno výrazně větší plochou chladiče, ze které může teplo přestupovat do okolí, zatímco při měření v uspořádání bez chladiče může přestupovat do okolí pouze z malé plochy vzorku o rozměrech 25x25 mm, plocha pro přestup tepla do okolí při uvažování obou stran vzorku je tedy rovna 1 250 mm².

V případě vypočtené velikosti tepelné kapacity při měření s instalovaným chladičem jsou její hodnoty přibližně čtyřikrát až pětkrát vyšší, než bez použití chladiče, což je především dáno velkou hmotou chladiče a upevňovacího přípravku.

Ze zjištěných náhradních parametrů je možné rovněž vypočítat časovou konstantu vynásobením hodnot R_{th} a C_{th} . Hodnota časové konstanty je důležitý parametr, jehož trojnásobek lze považovat za dobu, za jakou dojde k ustálení teploty na konečné hodnotě. Z naměřených hodnot vyplynulo, že doba, za kterou dojde k ustálení teploty v případě uspořádání bez použití chladiče je přibližně 120 s a je přibližně pro všechny hodnoty proudového zatížení podobná. Pro uspořádání s chladičem je díky výrazně nižší hodnotě tepelného odporu výsledná hodnota časové konstanty resp. doby ustálení teploty ještě nižší, než v případě samotného vzorku bez chladiče, avšak zde je nutné vzhledem k spíše orientační hodnotě zjištěných náhradních parametrů brát tuto hodnotu s rezervou.

		bez chlazení			
šířka w [mm]	I [A]	R_{th} [K.W ⁻¹]	C_{th} [J.K ⁻¹]	τ [s]	3τ [s]
0,5	0,25	21,28	1,78	37,78	113,33
	0,5	24,29	1,50	36,32	108,97
	0,6	27,75	1,32	36,57	109,70
	0,75	-	-	-	-
	Průměr	24,44	1,53	36,89	110,67
0,8	0,25	22,33	1,58	35,37	106,11
	0,5	21,44	1,50	32,06	96,19
	0,6	21,20	1,55	32,95	98,84
	0,75	20,35	1,61	32,86	98,59
	Průměr	21,33	1,56	33,31	99,93
1	0,25	20,26	1,53	31,05	93,16
	0,5	20,51	1,72	35,34	106,02
	0,6	24,14	1,51	36,56	109,69
	0,75	27,73	1,47	40,87	122,60
	Průměr	23,16	1,56	35,96	107,87
1,2	0,25	17,75	2,20	38,99	116,96
	0,5	20,71	1,76	36,48	109,45
	0,6	24,57	1,59	39,05	117,15
	0,75	12,53	4,32	54,17	162,51
	Průměr	18,89	2,47	42,17	126,52
Celkový průměr		21,79	1,80	37,09	111,28

Tab. 8: Vypočtené parametry náhradního tepelného obvodu pro uspořádání bez chladiče

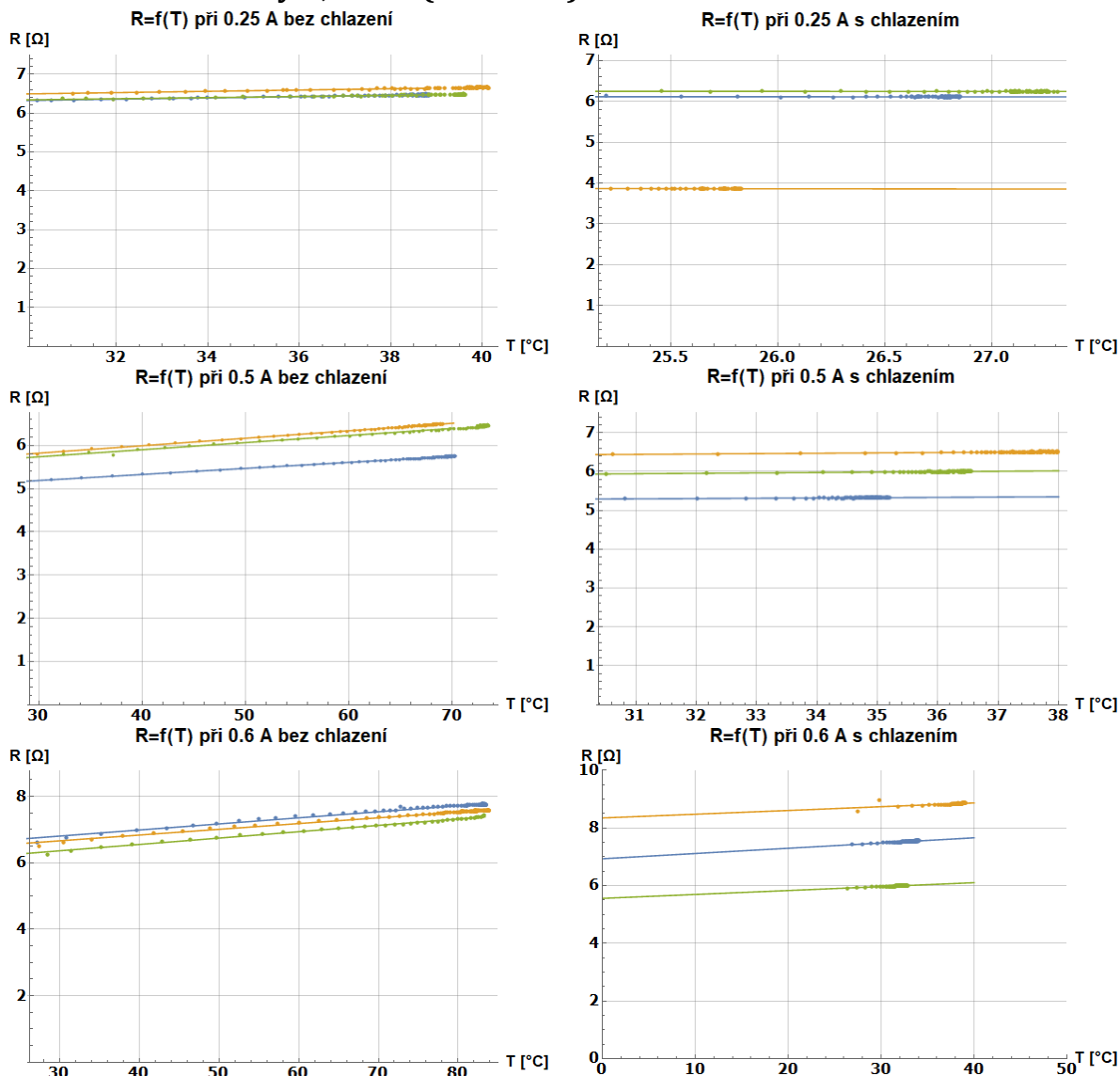
		s chlazením			
šířka w [mm]	I [A]	R _{th} [K.W ⁻¹]	C _{th} [J.K ⁻¹]	τ [s]	3τ [s]
0,5	0,25	4,07	7,63	31,09	93,27
	0,5	4,12	3,87	15,97	47,90
	0,6	3,94	7,58	29,85	89,54
	0,75	-	-		
	Průměr	4,05	6,36	25,63	76,90
0,8	0,25	3,65	9,74	35,56	106,67
	0,5	4,11	5,06	20,78	62,35
	0,6	3,55	6,67	23,66	70,98
	0,75	3,35	8,06	27,00	80,99
	Průměr	3,66	7,38	26,75	80,25
1	0,25	4,80	5,06	24,30	72,91
	0,5	4,54	7,95	36,09	108,28
	0,6	4,61	9,94	45,81	137,43
	0,75	3,98	11,75	46,77	140,31
	Průměr	4,48	8,67	38,24	114,73
1,2	0,25	3,55	7,28	25,88	77,63
	0,5	3,62	7,55	27,32	81,97
	0,6	3,34	9,65	32,23	96,68
	0,75	3,79	10,74	40,67	122,02
	Průměr	3,57	8,81	31,52	94,57
Celkový průměr		3,93	7,90	30,86	92,59

Tab. 9: Vypočtené parametry náhradního tepelného obvodu pro uspořádání s chladičem

5.3. Závislost odporu na teplotě

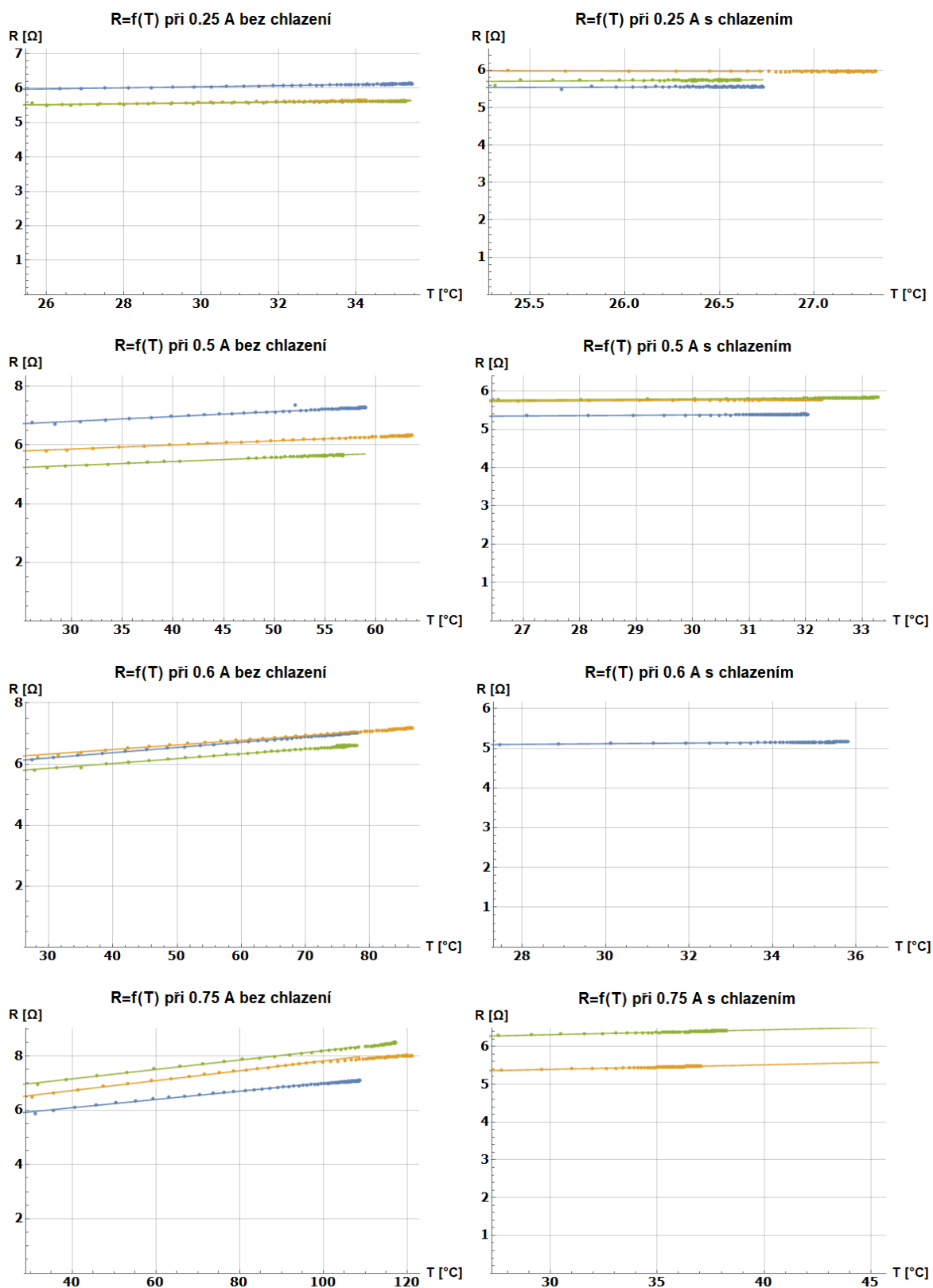
Z naměřených časových závislostí odporu a teploty povrchu vrstvy byly sestaveny závislosti velikosti odporu vrstvy na teplotě. Prokladem jednotlivých bodů příslušné závislosti byla získána funkční závislost odporu vzorku na teplotě, ze které bylo možné určit velikost odporu vrstvy při teplotě 0°C a teplotní koeficient odporu pro jednotlivé úrovně proudového zatížení a jednotlivé měřené motivy. Na následujících grafech je možné pozorovat, že rozptyl velikosti odporu jednotlivých vzorků je velký díky tomu, že vzorky byly připravovány pomocí ručního sítotisku.

5.3.1. Šířka dráhy 0,5 mm (motiv 15)



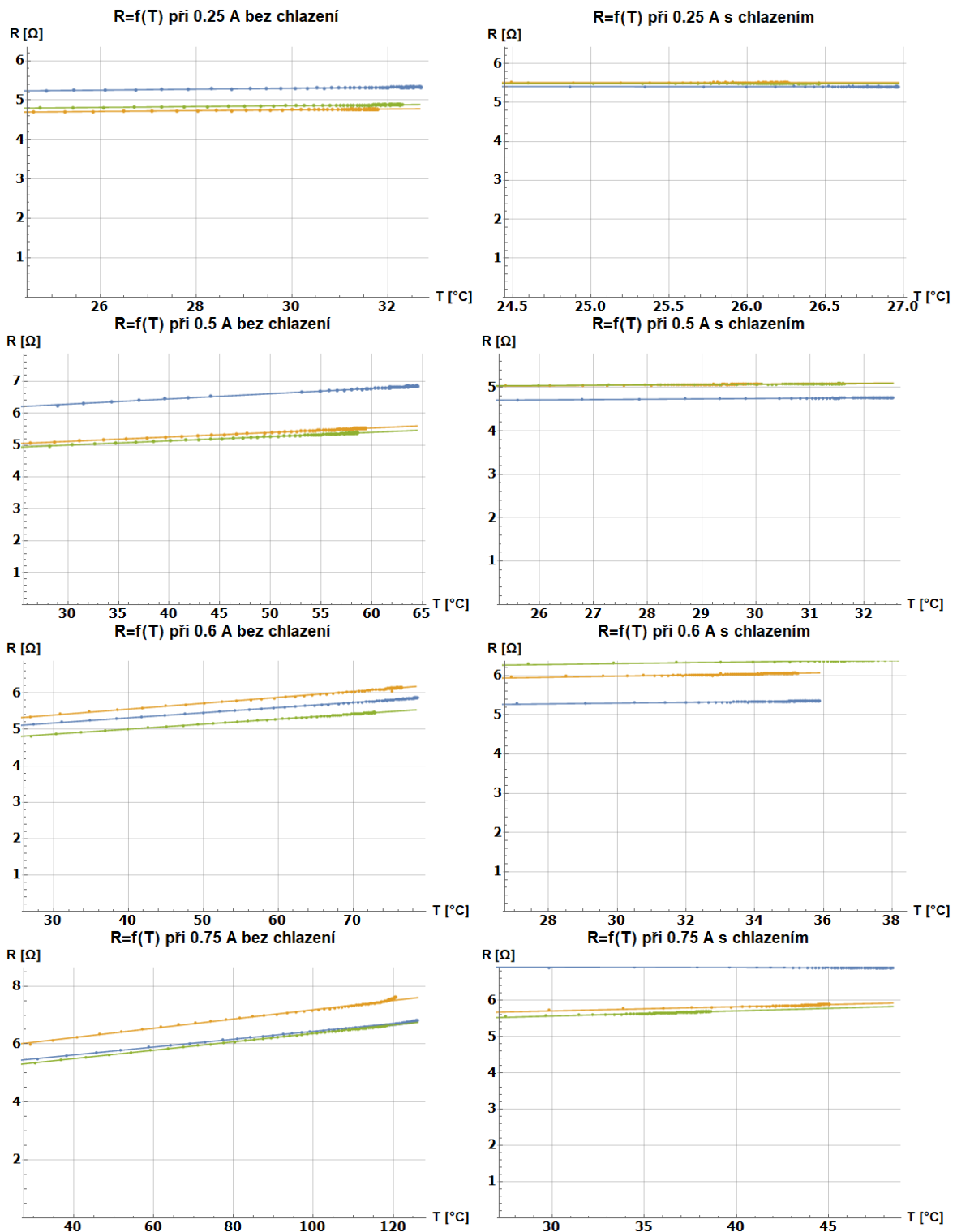
Graf 9 – 16: Naměřené závislosti odporu na teplotě pro vzorky s motivem č. 15

5.3.2. Šířka dráhy 0,8 mm (motiv 18)



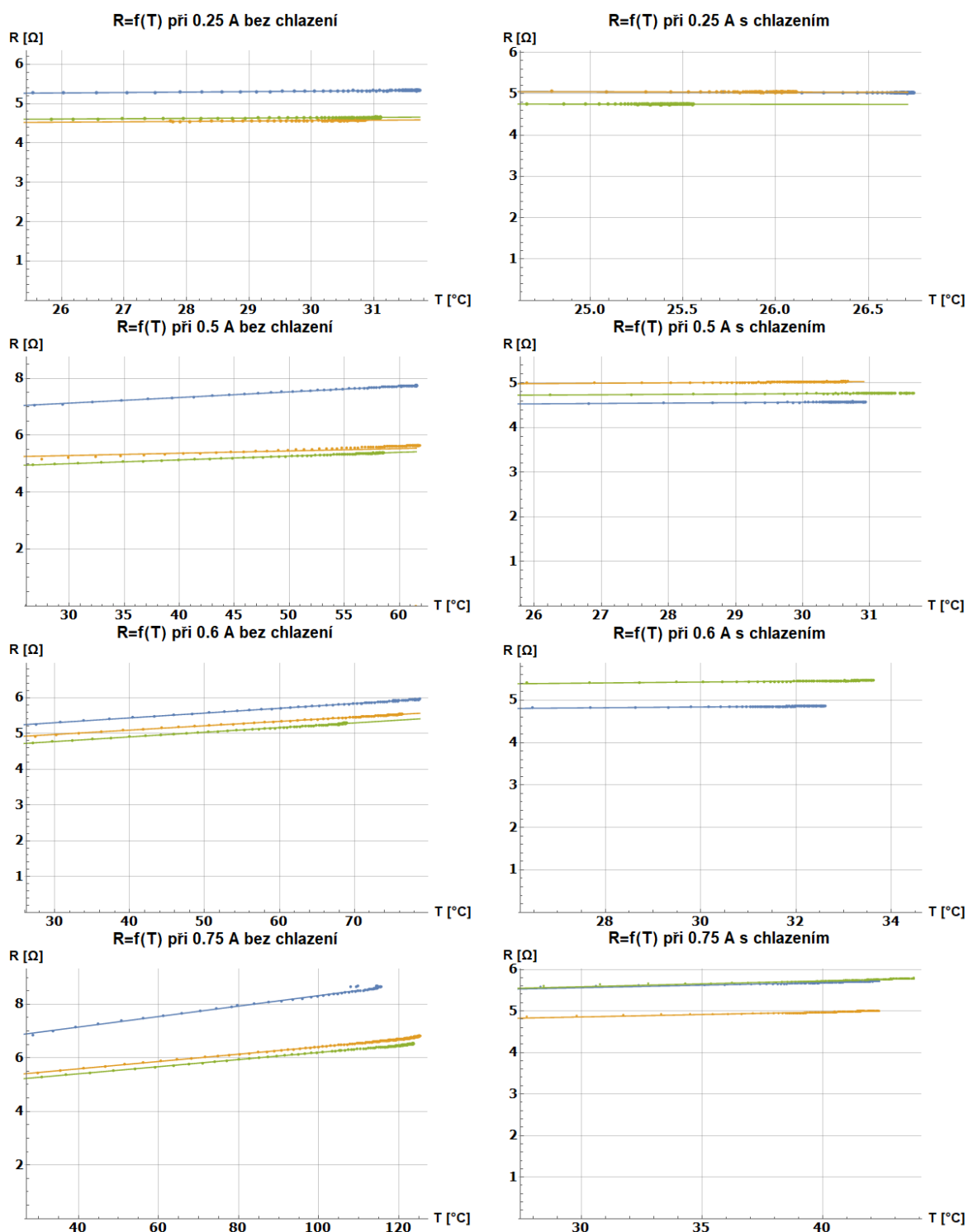
Graf 17 – 24: Naměřené závislosti odporu na teplotě pro vzorky s motivem č. 18

5.3.3. Šířka dráhy 1 mm (motiv 20)



Graf 25 – 32: Naměřené závislosti odporu na teplotě pro vzorky s motivem č. 20

5.3.4. Šířka dráhy 1,2 mm (motiv 21)



Graf 33 – 40: Naměřené závislosti odporu na teplotě pro vzorky s motivem č. 21

I [A]	R_0 [Ω]		TKR [K ⁻¹]	
	bez chlazení	s chlazením	bez chlazení	s chlazením
0,25	5,90	5,49	0,016	-0,003
0,5	5,11	5,61	0,016	0,009
0,6	6,06	6,95	0,018	0,015

Tab. 10: Zjištěné hodnoty R_0 a TKR pro motiv č. 15 (šířka dráhy 0,5 mm)

I [A]	R ₀ [Ω]		TKR [K ⁻¹]	
	bez chlazení	s chlazením	bez chlazení	s chlazením
0,25	5,32	3,73	0,014	0,012
0,5	5,55	5,36	0,015	0,009
0,6	5,65	6,37	0,016	0,014
0,75	5,98	5,82	0,017	0,012

Tab. 11: Zjištěné hodnoty R₀ a TKR pro motiv č. 18 (šířka dráhy 0,8 mm)

I [A]	R ₀ [Ω]		TKR [-]	
	bez chlazení	s chlazením	bez chlazení	s chlazením
0,25	4,64	5,49	0,011	-0,001
0,5	5,03	4,72	0,015	0,008
0,6	4,71	5,50	0,015	0,012
0,75	5,19	5,81	0,015	0,008

Tab. 12: Zjištěné hodnoty R₀ a TKR pro motiv č. 20 (šířka dráhy 1 mm)

I [A]	R ₀ [Ω]		TKR [-]	
	bez chlazení	s chlazením	bez chlazení	s chlazením
0,25	4,55	5,15	0,010	-0,008
0,5	5,40	4,52	0,014	0,009
0,6	4,63	5,19	0,013	0,011
0,75	5,43	4,95	0,016	0,013

Tab. 13: Zjištěné hodnoty R₀ a TKR pro motiv č. 21 (šířka dráhy 1,2 mm)

Nejen ze závislostí odporu na teplotě, ale také z vypočtených průměrných hodnot R₀ je patrné, že rozptyl celkového odporu jednotlivých vzorků byl poměrně výrazný, z celkového počtu devadesáti testovaných vzorků byla průměrná hodnota odporu R₀ rovna 5,28 Ω a výběrová směrodatná odchylka činila 0,76 Ω, což odpovídá téměř 15 % z průměrné hodnoty. U vzorků, které byly použity na měření bez chlazení, byla zjištěna průměrná hodnota odporu R₀ rovna 5,28 Ω a směrodatná odchylka činila 0,64 Ω a to odpovídá přibližně 12 %. V případě vzorků, u kterých měření probíhalo s využitím chladiče, byla hodnota odporu R₀ vyšší, dosahovala průměrně hodnoty 5,49 Ω, rovněž výběrová směrodatná odchylkou byla vyšší, její velikost byla 0,76 Ω, což odpovídá přibližně 14 %.

V případě teplotního koeficientu odporu (TKR) jsou všechny vypočtené hodnoty podobné, pouze u některých vzorků byla zjištěna klesající závislost odporu na teplotě, to však přisuzují chybě měření. Průměrná zjištěná hodnota teplotního koeficientu odporu byla v případě měření bez chladiče rovna 0,0146 s výběrovou směrodatnou odchylkou 0,0028, variační koeficient je tedy v tomto případě roven přibližně 19 %. Pro měření s chladičem již průměrná hodnota teplotního koeficientu odporu je rovna 0,0080 s výběrovou směrodatnou odchylkou 0,0081 a variační koeficient je tedy roven přibližně 101 %, hodnoty zjištěného TKR mají v tomto případě značný rozptyl.

Z vynesných závislostí odporu na teplotě vzorku je možné pozorovat, že v některých případech při zatížení vzorku proudem 0,75 A dochází již k zahřátí vzorku na více než 120°C a je již tak možné pozorovat počínající odklon závislosti od přímky, což signalizuje počínající degradaci vzorku.

5.4. Určení maximálního proudového zatížení dle IPC 2221

Pro každý motiv byly z naměřených hodnot oteplení při zvolených velikostech proudového zatížení určeny koeficienty rovnice používané pro výpočet maximálního proudového zatížení standardem IPC 2221. Ze všech měřených motivů byla poté určena průměrná velikost daného koeficientu a tato průměrná hodnota byla dále využívána pro vynesení grafů závislosti maximálního proudového zatížení na šířce dráhy a požadovaném oteplení vzorku.

Pokud bychom porovnali mezi sebou velikost koeficientů při měření bez využití chlazení a s chlazením, tak je patrné, že v případě využití chladiče je velikost konstanty k_1 více než o 50 % vyšší než v případě měření bez využití chlazení. Zatímco u koeficientů k_2 a k_3 se ukazuje, že jejich velikost v případě měření bez a s chlazením je podobná a liší se maximálně o 15 %, což může být rovněž způsobeno nepřesností měření.

Při porovnání zjištěných koeficientů pro vyrobené vzorky s uváděnou velikostí koeficientů pro desky plošných spojů ve standardu IPC 2221 je patrné, že v případě měření bez chlazení je velikost zjištěných koeficientů k_1 a k_2 velmi podobná hodnotám uváděných ve standardu IPC 2221, velikost k_3 je již výrazně nižší, dosahuje necelých 50 %. Při porovnání uváděné velikosti koeficientů se zjištěnými hodnotami pro uspořádání chlazené pasivním chladičem jsou již rozdíly větší, to může být způsobeno méně přesným určením oteplení vzorku vzhledem k tomu, že v případě využití chlazení pasivním chladičem nedošlo k ustálení teploty vzorku na konečné hodnotě, ale jeho teplota dále rostla i poté, co by již mělo dojít k ustálení teploty.

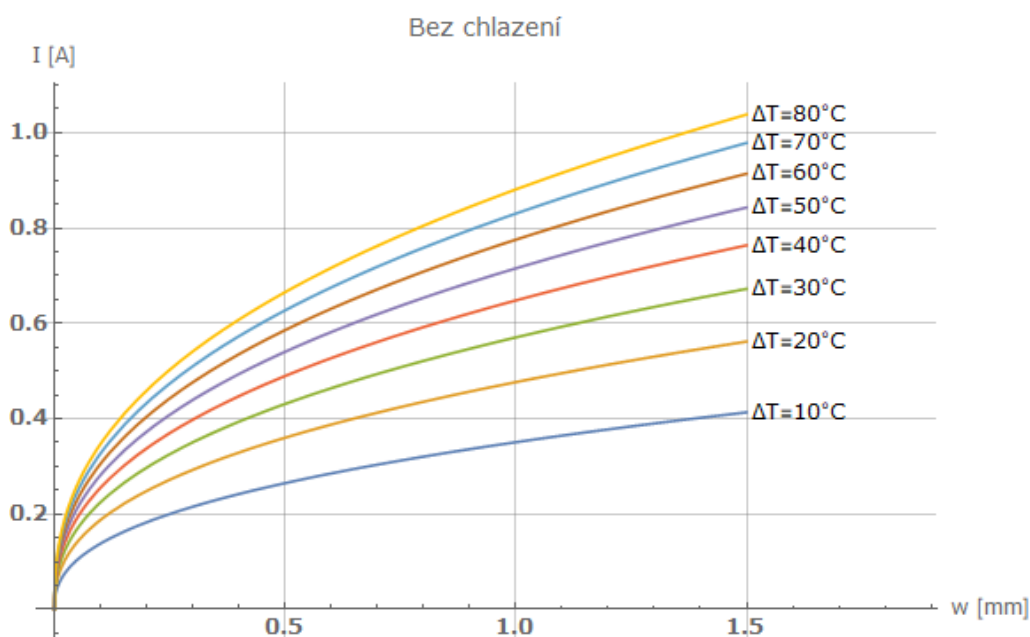
	w [mm]				Průměr	Rozdíl oproti IPC 2221 [%]
	0,5	0,8	1,0	1,2		
k1	0,02	0,07	0,05	0,02	0,042	-13,0
k2	0,48	0,47	0,42	0,40	0,443	0,6
k3	0,62	0,10	0,30	0,60	0,405	-44,2

Tab. 14: Vypočtené koeficienty pro výpočet max. proudového zatížení dle rovnice (6) bez chlazení

	w [mm]				Průměr	Rozdíl oproti IPC 2221 [%]
	0,5	0,8	1,0	1,2		
k1	0,10	0,04	0,06	0,07	0,068	41,5
k2	0,65	0,52	0,50	0,39	0,515	17,0
k3	0,26	0,65	0,46	0,42	0,448	-38,2

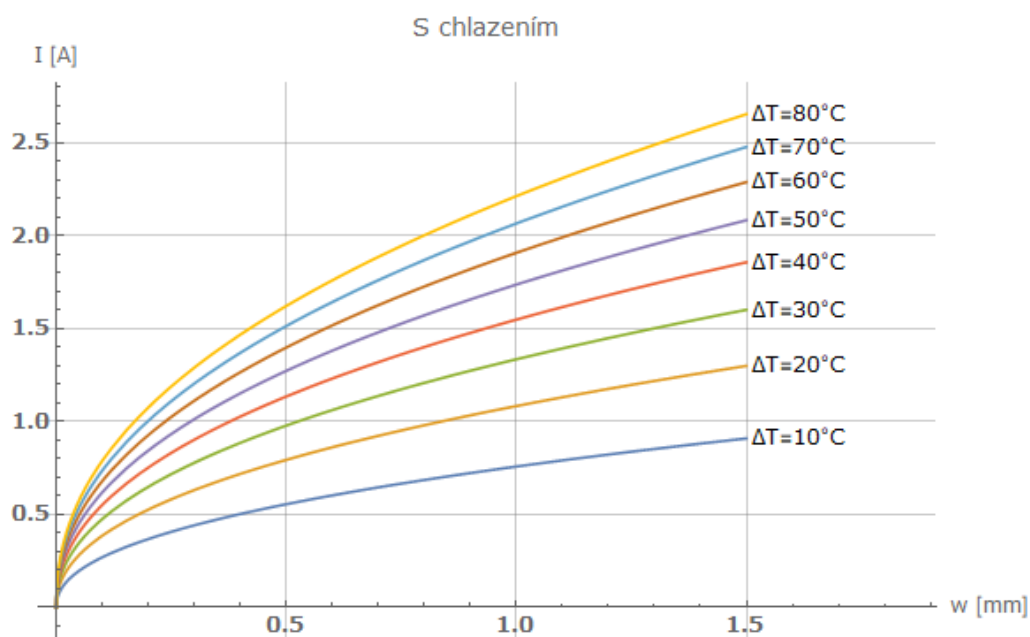
Tab. 15: Vypočtené koeficienty pro výpočet max. proudového zatížení dle rovnice (6) s chladičem

Na základě zjištěných průměrných hodnot jednotlivých koeficientů byly sestaveny grafy doporučených rozměrů dráhy při požadované hodnotě proudového zatížení a maximálního oteplení. Při sestavování grafu jsem uvažoval, že tloušťka vrstvy je rovna 10 μm , to však nemuselo být splněno vzhledem k tomu, že vzorky byly připravovány ručním síťotiskovým strojem. Maximální vynesená teplota oteplení vzorku byla stanovena na 80°C vzhledem k tomu, že maximální teplota, při které ještě nedochází k degradaci testované polymerní pasty, je přibližně rovna 120°C, což při započtení teploty okolí 20°C a určité teplotní rezervy přibližně odpovídá tomuto oteplení.



Graf 41: Závislost maximálního zatěžovacího proudu na šířce dráhy motivu pro různá oteplení bez chladiče

Z vynesených grafů vypočtené závislosti dle IPC 2221 je patrné, že dovolené maximální proudové zatížení pro zvolené oteplení vzorku je v případě instalace chladiče přibližně 2,5 krát větší, než v případě zatěžování samotného vzorku bez chladiče.

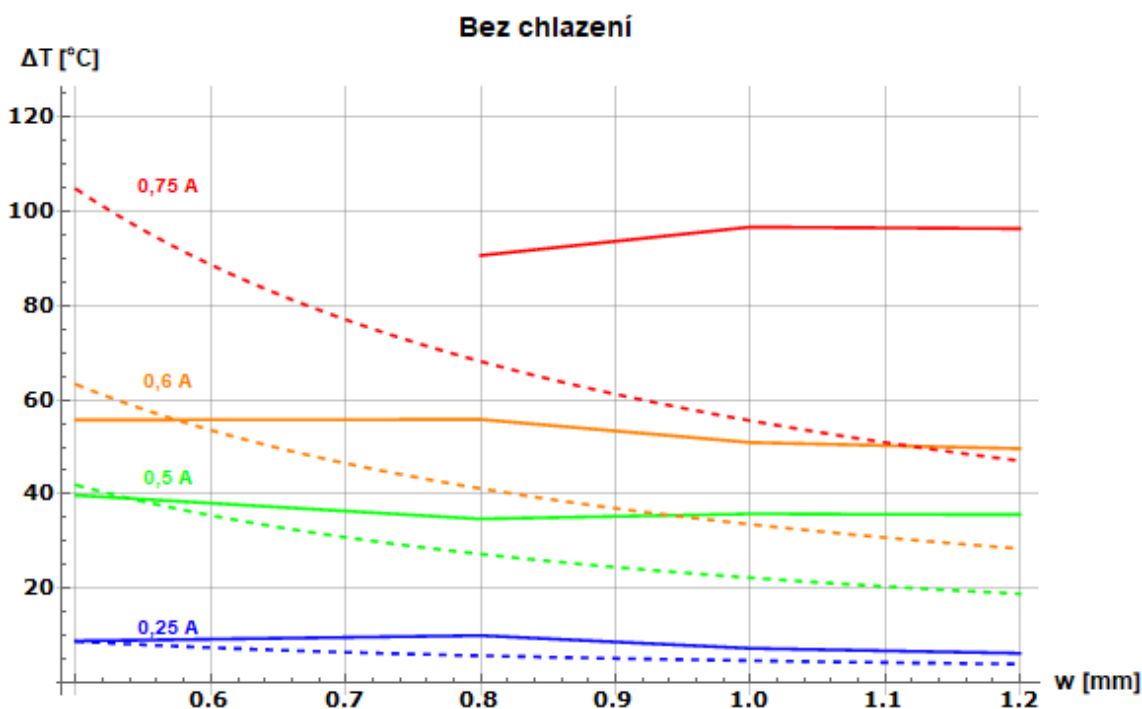


Graf 42: Závislost maximálního zatěžovacího proudu na šířce dráhy motivu pro různá oteplení s chladičem

5.5. Vliv šířky vrstvy na velikost oteplení při různých hodnotách proudového zatížení

V této části zpracování výsledků bych se rád věnoval vlivu šířky dráhy motivu na velikost oteplení vzorku. V této části práce budou naměřené hodnoty porovnány s vypočteným průběhem inverzní závislosti dle rovnice č. 6 doplněné o zjištěné koeficienty pro dané uspořádání měření.

5.5.1. Bez chlazení



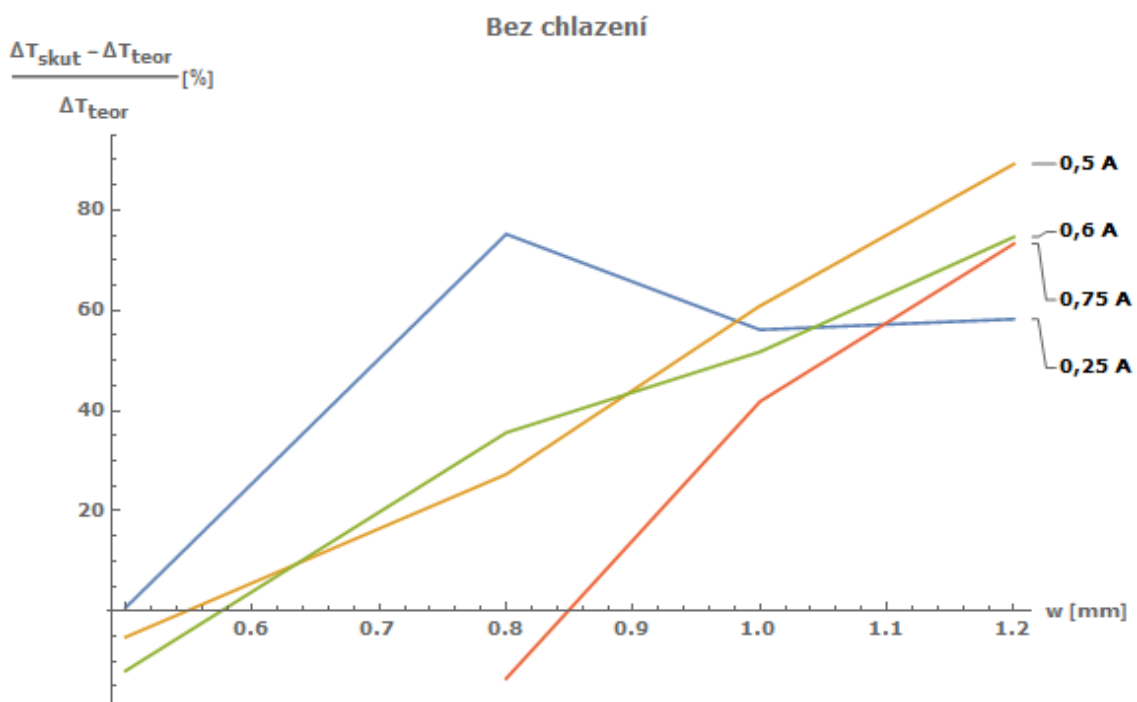
Graf 43: Porovnání naměřené závislosti oteplení vzorku na šířce dráhy s průběhem dle IPC 2221 pro měření bez chlazení

I [A]	ΔT [°C]			
	w = 0,5 mm	w = 0,8 mm	w = 1 mm	w = 1,2 mm
0,25	8,83	9,01	7,52	4,86
0,5	39,77	32,70	33,01	33,65
0,6	55,78	53,05	48,93	47,36
0,75	-	84,60	91,61	91,66

Tab. 16: Průměrná naměřená oteplení pro jednotlivé šířky drah a hodnoty proudového zatížení bez použití chlazení

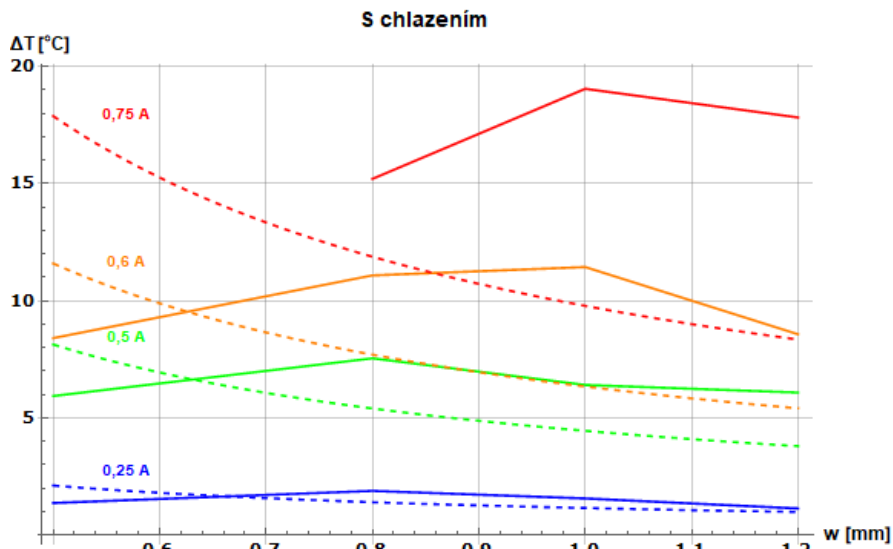
Naměřené hodnoty v případě měření bez použití chladiče nevykazují závislost velikosti oteplení na šířce dráhy motivu, což příliš neodpovídá předpokladu, kdy by se hodnota oteplení měla poměrně výrazně s velikostí šířky dráhy resp. s velikostí příčného průřezu dráhy snižovat. Předpokládaná závislost je v grafu pro jednotlivé velikosti proudového zatížení vynesena čárkovaně.

Již z předchozího grafu je patrné, že se skutečné naměřené hodnoty a předpokládané průběhy příliš neshodují. Na následujícím grafu je vynesena závislost rozdílu skutečné naměřené hodnoty a předpokládané hodnoty oteplení v poměru k předpokládané hodnotě oteplení v závislosti na šířce dráhy pro jednotlivé velikosti proudového zatížení. Na tomto grafu můžeme pozorovat, že se naměřené a předpokládané hodnoty v některých případech liší i o 80 % a zároveň se téměř u všech úrovní proudového zatížení velikost této chyby zvětšuje s šířkou dráhy.



Graf 44: Závislost procentuálního rozdílu odchylky skutečně naměřeného oteplení od předpokládané hodnoty v závislosti na šířce dráhy pro měření bez chlazení

5.5.2. S chlazením

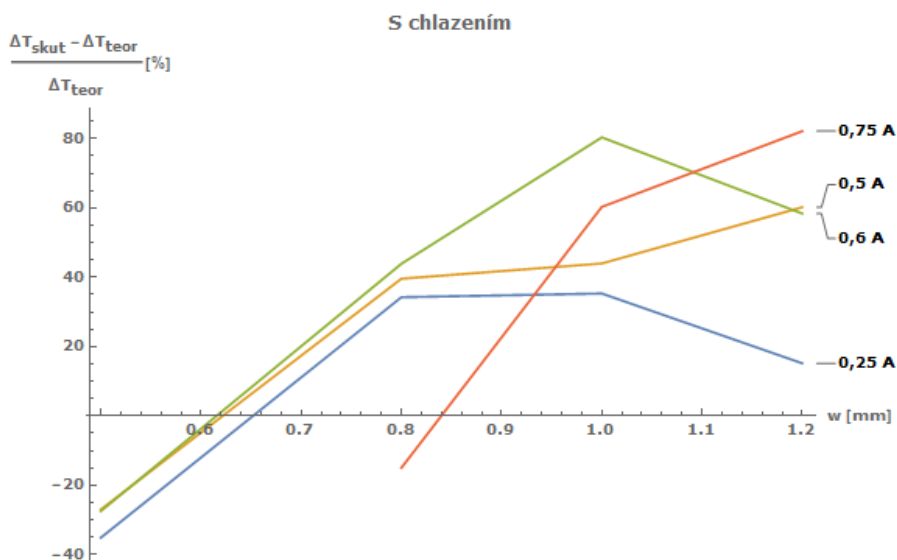


Graf 45: Porovnání naměřené závislosti oteplení vzorku na šířce dráhy s průběhem dle IPC 2221 pro měření s chlazením

I v případě zatěžování vzorků s připevněným chladičem je na výše uvedeném grafu vidět, že s výjimkou nejužší šířky dráhy je předpokládaná hodnota oteplení vzorku výrazně nižší, než k jakému oteplení skutečně došlo. To je možné rovněž pozorovat na grafu č. 46, ze kterého je patrné, že i v případě měření s chlazením vzorku, se odchylka skutečně dosaženého oteplení vzorku od předpokládané hodnoty zvětšuje s šířkou dráhy vzorku.

I [A]	ΔT [°C]			
	w = 0,5 mm	w = 0,8 mm	w = 1 mm	w = 1,2 mm
0,25	1,37	1,43	1,92	1,08
0,5	5,94	5,70	5,76	4,78
0,6	8,41	8,24	9,30	7,15
0,75	-	12,03	14,99	14,67

Tab. 17: Průměrná naměřená oteplení pro jednotlivé šířky drah a hodnoty proudového zatížení s chladičem

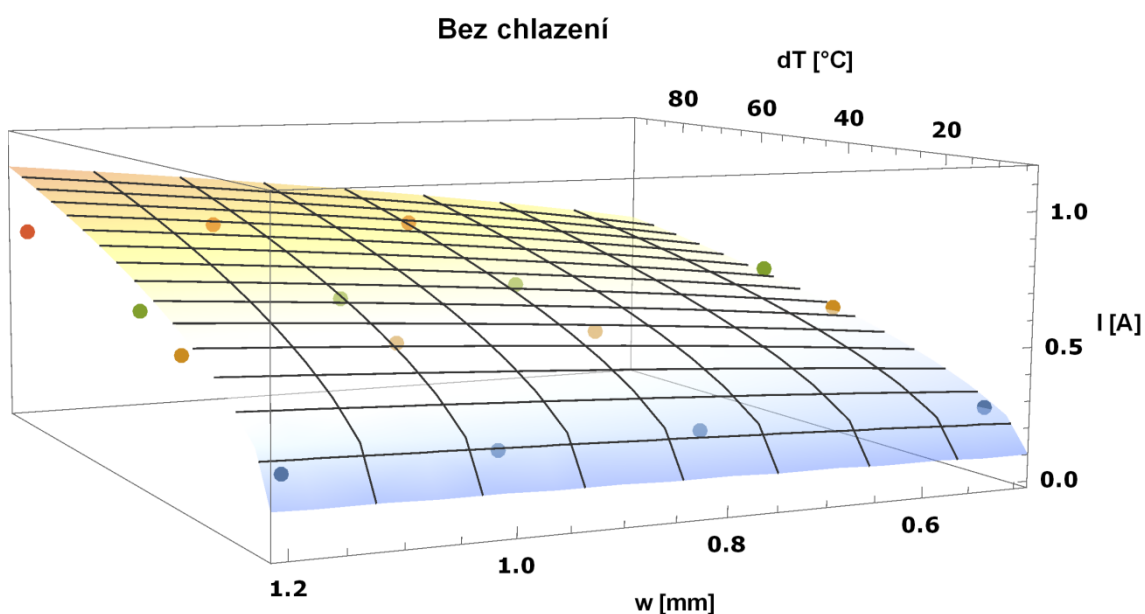


Graf 46: Závislost procentuálního rozdílu odchylky skutečně naměřeného oteplení od předpokládané hodnoty v závislosti na šířce dráhy pro měření bez chlazení

5.6. Porovnání naměřených hodnot a průběhu funkce dle IPC 2221

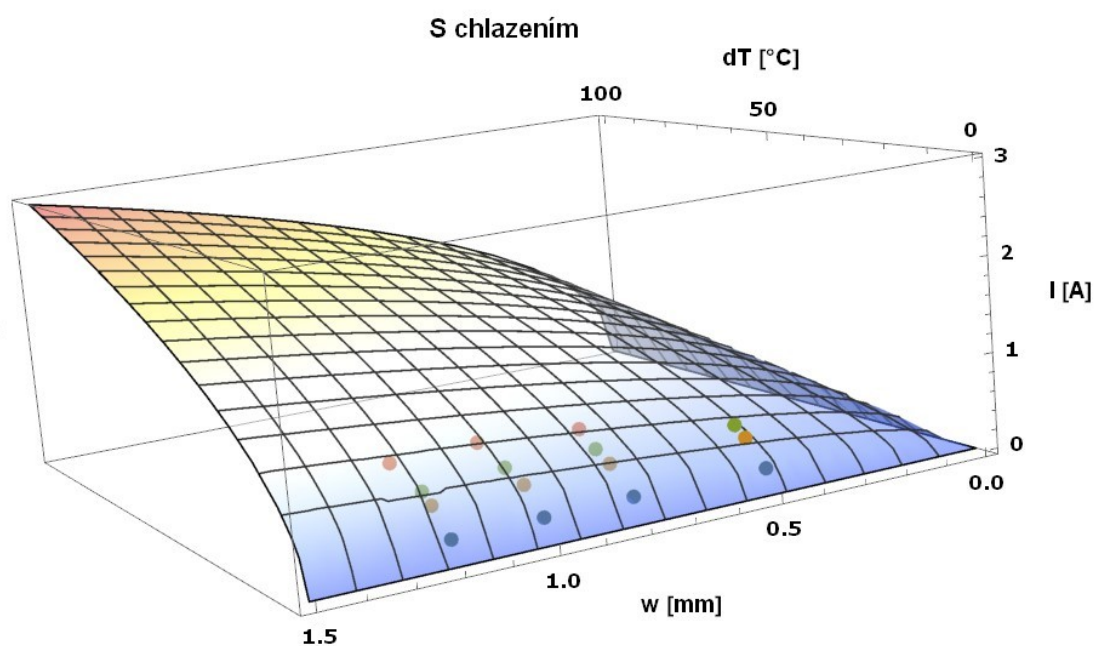
Průměrné hodnoty vypočtených koeficientů byly dosazeny do rovnice dle IPC 2221. Pro hodnoty šířky vodivé dráhy motivu vzorku v rozmezí od 0 do 1,2 mm a oteplení vzorku v intervalu mezi teplotami od 0 do 80°C byl vytvořen 3D graf závislosti maximálního proudového zatížení v závislosti na šířce dráhy a maximální hodnotě oteplení vzorku. Za účelem porovnání zjištěných průběhů a naměřených hodnot byly do 3D grafu vloženy rovněž průměrné naměřené hodnoty oteplení ze všech měření při dané šířce vodivé dráhy a hodnotě proudového zatížení vzorku.

V případě uspořádání bez využití chlazení je patrné, že se body odpovídající naměřeným hodnotám s vypočítaným průběhem příliš neshodují, což je patrné především v oblasti grafu pro velké šířky vodivé dráhy, kde je tato chyba největší. Dále je z grafu patrné, že maximální možná hodnota proudového zatížení pro nejširší testovanou dráhu a nejvyšší dovolené oteplení 100°C, při kterém ještě nemusí docházet k degradaci vrstvy, odpovídá přibližně 1 A.



Graf 47: Porovnání získané závislosti maximálního zatěžovacího proudu v závislosti na šířce dráhy a oteplení vzorku s naměřenými hodnotami pro uspořádání bez chlazení

Při zatěžování vzorků s instalovaným chladičem je i na tomto grafu možné pozorovat, že dosahovaná oteplení jsou výrazně nižší, než při měření bez chladiče, dle vypočtené závislosti je teoreticky možné takto vrstvu zatěžovat proudem až 3 A, aniž by vrstva dosáhla oteplení většího než 100°C, které by v případě teploty okolí vzorku rovné 20 °C znamenalo dosažení hraniční teploty 120 °C, jejíž překročení by vrstvu mohlo nenávratně poškodit, avšak není úplně jisté, zda by ve skutečnosti bylo možné vrstvu takto zatěžovat, jelikož dle dosavadních zjištění se vypočtená hodnota oteplení resp. proudového zatížení výrazně lišila od skutečné naměřené hodnoty.



Graf 48: Porovnání získané závislosti maximálního zatěžovacího proudu v závislosti na šířce dráhy a oteplení vzorku s naměřenými hodnotami pro uspořádání s chladičem

6. Závěr

V této diplomové práci jsem se v první části zabýval popisem tlustých vrstev, její struktury, hlavních vlastností pro jejich popis a nejčastějšími využívanými metodami jejich vytváření.

Druhá část práce byla věnována návrhu motivů a přípravě vzorků vhodných pro proudové zatěžování. V této části byla rovněž řešena problematika připojení vzorků do obvodu, vzhledem k tomu, že polymerní tlusté vrstvy není možné pájet, byly vzorky připojeny do obvodu pomocí přípravku pro měření integrovaných obvodů a zároveň přizpůsobením umístění a rozměrů kontaktních plošek na vzorcích použitému přípravku.

Obsahem třetí části diplomové práce je příprava samotné praktické realizace měření, pro niž byl využit program LabView a s tímto programem kompatibilní multimetry, a mikrokontrolér Arduino Uno, využitý pro řízení sepnutí proudového obvodu a měření doby od sepnutí, který s měřícím programem komunikoval přes USB na principu sériové komunikace. V této části rovněž uvádím vysvětlení metodiky měření a zpracování výsledků.

Hlavním cílem této diplomové práce bylo podrobit vytvořené vzorky tlustovrstvých struktur proudovému zatěžování a z naměřených výsledků vytvořit matematický model, díky kterému bude možné přizpůsobit návrh rozměrů vrstvy na základě potřebného proudového zatížení a maximálního požadovaného oteplení. Při porovnání naměřených hodnot a zjištěných výstupů použité rovnice z IPC 2221 s upravenými koeficienty na základě provedených měření je však nutné konstatovat, že se cílů diplomové práce z tohoto pohledu nepodařilo uspokojivě dosáhnout vzhledem k velké odlišnosti vypočtených a skutečně dosažených oteplení.

Otázkou však zůstává, z jakého důvodu došlo k tomu, že naměřené hodnoty příliš neodpovídají předpokládaným hodnotám. První z možností, která by toto mohla způsobit je nekonzistentnost rozměrů a parametrů vzorků stejných motivů. Vzhledem k tomu, že vzorky byly vytvářeny ručním síťotiskovým zařízením, tak předpoklad rovnoměrné šířky dráhy a konstantní tloušťky, který byl použit při výpočtu upravených koeficientů rovnice pro výpočet maximálního proudového zatížení, velice pravděpodobně nebyl splněn, to se ostatně již ukázalo v mé předchozí práci při měření tloušťky a šířky drah pomocí talystepu, kdy výsledná tloušťka vrstvy při použití totožné pasty se od předpokládané hodnoty 10 μm lišila průměrně o 2,3 μm a výběrová směrodatná odchylka tloušťky vrstvy činila 2,61 μm , rovněž i šířka dráhy se mezi jednotlivými vzorky lišila vcelku výrazně. Toto je možné rovněž pozorovat i na vypočtených hodnotách R_0 ze změřené teplotní závislosti odporu při jednotlivých měřeních, kdy se průměrná hodnota odporu všech vzorků lišila od navrhované hodnoty celkového odporu motivu 5 Ω přibližně o 0,4 Ω a výběrová směrodatná odchylka činila 0,76 Ω .

Druhou možností může být struktura samotné polymerní tlusté vrstvy, která z principu není homogenní, na rozdíl od vrstvy mědi u desek plošných spojů, pro jejichž návrh použitá rovnice z IPC 2221, byť s jinými koeficienty slouží. Vlivem realizace vodivých vlastností vrstvy pouhým dotykem vodivých částic nedochází k rovnoměrnému rozložení proudové hustoty, ale v místech dotyku těchto částic vznikají místa s výrazně vyšší proudovou hustotou. Rovněž vlivem umístění vodivých částic v polymerní struktuře, která je rovněž výrazně horším tepelným vodičem, než je měď, docházelo zároveň k horšímu odvodu tepla z těchto bodů a k jejich výraznému zahřívání vlivem vysoké proudové hustoty.

7. Použité zdroje

- [1] [www.distrelec.cz: 82357B](http://www.distrelec.cz:82357B) - Převodník USB/GPIB - PC Systems/Laptop, Keysight [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.distrelec.cz/cs/prevodnik-usb-gpib-pc-systems-laptop-keysight-82357b/p/17629020?queryFromSuggest=true>
- [2] Katalog pro čidla teploty Pt 100, Pt 500, Pt 1000. [Www.remmaxcz.com](http://www.remmaxcz.com) [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <http://remmaxcz.com/old/katalog/snimace/teplota/kl/char/Pt100.pdf>
- [3] Viskozita kapalin. www.nanoed.tul.cz: e-learningový server se studijními materiály pro obor Nanomateriály na TUL [online]. [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/9322/mod_resource/content/0/10.pdf
- [4] CHANG SUNG CORPORATION: *Conductive pastes: Materials for a high-tech revolution* [online]. [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: http://changsung.com/new/wp-content/themes/changsung/images/product_PDF/conductive_pastes.pdf
- [5] GUPTA, Tapan. *Handbook of thick- and thin-film hybrid microelectronics*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2003. ISBN 04-712-7229-9.
- [6] SAMANO, Anthony. *Measurements of conductive film*. 2017. Dizertační práce. Brunel University London. Vedoucí práce Xu, Y; Harrison, D. Dostupné z: <http://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/14982>
- [7] YAMAMOTO, Takashi a Dominique NUMAKURA. Advanced Fine-Line Thick-Film Conductors with High Conductivity and Soldering Capability Built by Screen-Printing. *Journal of The Japan Institute of Electronics Packaging* [online]. 2009, 28.6.2009, str. 40-45 [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: http://www.jiep.or.jp/hp_e/journal/2/transaction2_1_40-45.pdf
- [8] JAKUBOWSKA, Malgorzata, Mateusz JAROSZ, Konrad KIELBASINSKI a Anna MLOZNIAK. New conductive thick-film paste based on silver nanopowder for high power and high temperature applications. *Microelectronics Reliability* [online]. 19.5.2011, **2011**(51), str. 1235-1240 [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026271411001399>
- [9] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 9788001023921;8001023923;.
- [10] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2006. ISBN 9788021432925;8021432926;.
- [11] SZENDIUCH, Ivan. *Thusté vrstvy (Thick films)* [online]. [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/41173783-Tluste-vrstvy-thick-films-2.html>
- [12] Plošný spoj - klávesnice. Moodle Fakulta elektrotechnická: BIM13EMP, BDIM13EMP - *Ekologie materiálů a procesů* [online]. [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/125616/mod_resource/content/1/klavesnice.pdf
- [13] EICHLER, Petr. *Vliv okolního prostředí na tlustovrstvé struktury*. Praha, 2016, [online]. [cit.2020-03-03]. 77 s. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64760/F3-DP-2016-Eichler-Petr-Vliv%20okolniho%20prostredi%20na%20tlustovrstve%20struktury.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ivana Beshajová Pelikánová.

- [14] Flexotisk. *Státní tiskárna cenin* [online]. [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://stc.cz/techniky-tisku/flexotisk/>
- [15] BUJABOKOVÁ, Magdaléna a Pavel TRNKA. Progresivní tlustovrstvé technologie v elektronických aplikacích. *Časopis elektro* [online]. **2008** [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/progresivni-tlustovrstve-technologie-v-elektronickych-aplikacich--11693>
- [16] KAWAHARA, Yoshihiro, Steve HODGES a Benjamin S. COOK. Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices. *UbiComp* [online]. 12.9.2013, **2013**(13) [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/02/ubi1415-instant20inkjet.pdf>
- [17] DM-SIP-3061S Datasheet. *www.dycotecmaterials.com* [online]. [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <https://www.dycotecmaterials.com/wp-content/uploads/2019/02/Dycotec-DM-SIP3061S-Datasheet-19.06.19.pdf>
- [18] HROMADKA, Karel. *Substráty pro výkonové aplikace v elektrotechnice*. Plzeň, 2015. [online]. [cit. 2020-03-04] Dostupné také z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/23041>. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Aleš Hamáček.
- [19] *Technologie pro výrobu desek plošných spojů*. 2018. Dostupné také z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/76500/F3-BP-2018-Kaltmeyer-Jan-Kaltmeyer_techologie%20pro%20vyrobu%20DPS.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ivana Beshajová Pelikánová.
- [20] IPC-2221A. *Generic Standard on Printed Board Design*. 2003. Dostupné také z: [http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT_DESIGN/TP/MATERIALS/IPC-2221A\(L\).pdf](http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT_DESIGN/TP/MATERIALS/IPC-2221A(L).pdf)

8. Seznam obrázků

Obr. 1: Struktura vypálené anorganické tlusté vrstvy.....	2
Obr. 2: Struktura vytvrzené organické tlusté vrstvy	2
Obr. 3: Časová závislost viskozity pasty v průběhu tiskového procesu realizovaného sítotiskem	4
Obr. 4: Princip sítotisku	5
Obr. 5: Princip šablonového tisku	7
Obr. 6: Princip flexotisku (vlevo) a hlubotisku (vpravo).....	8
Obr. 7: Princip technologie Micro-Screen: vlevo šablona, uprostřed organická těsnicí vrstva, vpravo výsledný motiv	8
Obr. 8: Princip technologie světlocitlivých vrstev	9
Obr. 9: Princip kontinuálního nanášení se zachytáváním inkoustu a Drop on Demand.....	10
Obr. 10: Příklad teplotního profilu sušení a vytvrzování organické pasty	11
Obr. 11: Příklad teplotního profilu pro výpal anorganických tlustých vrstev	12
Obr. 12: Maximální velikost proudového zatížení v závislosti na příčném průřezu vodiče	14
Obr. 13: Umístění proudových a napěťových kontaktů na kontaktní plošce	15
Obr. 14: Motivy vzorků s celkovým odporem 3Ω	16
Obr. 15: Motiv vzorků s celkovým odporem 4Ω	16
Obr. 16: Motiv vzorků s celkovým odporem 5Ω	16
Obr. 17: Schéma měřícího obvodu.....	19
Obr. 18: Vnitřní zapojení jednotlivých driverů integrovaného obvodu ULN2003A	19
Obr. 19: Přípravek pro připojení vzorku do měřícího obvodu	20
Obr. 20: Blokové schéma měření	21
Obr. 21: Převodník GPIB/USB HP 82357B	21
Obr. 22: Digitální multimetr HP/Agilent/Keysight 34401A	21
Obr. 23: Ovládání relé prostřednictvím komunikace LabView s vývoj. deskou Arduino Uno	23
Obr. 24: Blokové schéma měření proudu	24
Obr. 25: Blokové schéma měření úbytku napětí na tlusté vrstvě.....	24
Obr. 26: Blokové schéma měření teploty vrstvy pomocí teplotního čidla Pt100	25
Obr. 27: Uložení dat do souboru	26
Obr. 28: Příklad zaznamenaného časového průběhu teploty vrstvy a jejího proložení	27
Obr. 29: Náhradní tepelné schéma	28
Obr. 30: Graf závislosti maximální hodnoty proudu v závislosti na oteplení.....	29
Obr. 31: Graf závislosti odporu na teplotě.....	30
Obr. 32: Graf závislosti maximální hodnoty proudového zatížení vrstvy pro jednotlivé hodnoty oteplení v závislosti na šířce dráhy.....	30

9. Seznam tabulek

Tab. 1: Vliv parametrů síťotiskového procesu na tloušťku vrstvy.....	6
Tab. 2: Přehled parametrů jednotlivých motivů	17
Tab. 3: Vybrané vlastnosti použité pasty	18
Tab. 4: Dosažené hodnoty oteplení a naměřené hodnoty R_0 u motivu č. 15	33
Tab. 5: Dosažené hodnoty oteplení a naměřené hodnoty R_0 u motivu č. 18	35
Tab. 6: Dosažené hodnoty oteplení a naměřené hodnoty R_0 u motivu č. 20	37
Tab. 7: Dosažené hodnoty oteplení a naměřené hodnoty R_0 u motivu č. 21	39
Tab. 8: Vypočtené parametry náhradního tepelného obvodu pro uspořádání bez chladiče	41
Tab. 9: Vypočtené parametry náhradního tepelného obvodu pro uspořádání s chladičem	42
Tab. 10: Zjištěné hodnoty R_0 a TKR pro motiv č. 15 (šířka dráhy 0,5 mm).....	46
Tab. 11: Zjištěné hodnoty R_0 a TKR pro motiv č. 18 (šířka dráhy 0,8 mm).....	47
Tab. 12: Zjištěné hodnoty R_0 a TKR pro motiv č. 20 (šířka dráhy 1 mm).....	47
Tab. 13: Zjištěné hodnoty R_0 a TKR pro motiv č. 21 (šířka dráhy 1,2 mm).....	47
Tab. 14: Vypočtené koeficienty pro výpočet max. proudového zatížení dle rovnice (6) bez chlazení.....	48
Tab. 15: Vypočtené koeficienty pro výpočet max. proudového zatížení dle rovnice (6) s chladičem.....	48
Tab. 16: Průměrná naměřená oteplení pro jednotlivé šířky drah a hodnoty proudového zatížení bez použití chlazení.....	50
Tab. 17: Průměrná naměřená oteplení pro jednotlivé šířky drah a hodnoty proudového zatížení s chladičem.....	52