



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF MICROELEKTRONICS**

# **ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI TLUSTOVRSTVÝCH ODPOROVÝCH PAST**

**ELECTRICAL PROPERTIES OF THICK-FILM RESISTIVE PASTES**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

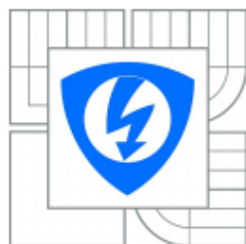
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**JIŘÍ GAJDOŠ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. MICHAL ŘEZNÍČEK**

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Mikroelektronika a technologie

**Student:** Jiří Gajdoš

**ID:** 125140

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2012/2013

## NÁZEV TÉMATU:

**Elektrické vlastnosti tlustovrstvých odporových past**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s technologií tlustovrstvých obvodů a způsoby jejich realizace. Navrhněte a realizujte testovací strukturu odporového monitoru pro ověření elektrických vlastností tlustovrstvých past. Na navrhnutém odporovém monitoru proveďte měření u tří různých past. Na vybraných vzorcích podrobně proměřte teplotní závislost odporu.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 11.2.2013

**Termín odevzdání:** 6.6.2013

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Řezníček

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

# Abstrakt

Tato práce se zabývá technologií tlustovrstvých elektronických obvodů, popisuje materiály používané pro realizaci tlustovrstvého obvodu a základní operace při jejich výrobě. Obsahem je také návrh odporového monitoru, který umožňuje provést měření vlastností tlustovrstvých odporových past. Praktická část popisuje samotné zhotovení odporového monitoru, zhotovení měřícího přípravku, měření jednotlivých hodnot rezistorů, měření teplotního koeficientu odporu TCR a vyhodnocení výsledků.

# Abstract

This work deals with the technology of thick-film electronic circuits, describes the materials used for the implementation of a thick-film circuit and basic operations for their production. The content is also a proposal resistive pattern, which allows measurement of thick-film resistive inks. The practical part describes the creation of resistive pattern, creating measuring station, measurement of values of resistors, measurement temperature coefficient of resistance TCR and interpretation of evaluation.

# Klíčová slova

Tlustá vrstva, vrstvá technologie, tlustovrstvé pasty, hybridní integrované obvody, síťotisk.

# Keywords

Thick-film, thick-film technology, thic-film inks, hybrid integrated circuit, screen printing.

## **Bibliografická citace:**

GAJDOŠ, J. *Elektrické vlastnosti tlustovrstvých odporových past: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 58 s., 3 příl. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Řezníček.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „**Elektrické vlastnosti tlustovrstvých odporových past**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 22. května 2013

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Řezníčkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

V Brně dne 22. května 2013

.....  
podpis autora

# Obsah

1	Tlusté vrstvy .....	9
1.1	Substrát .....	9
1.2	Pasty pro tlustovrstvou technologii .....	11
1.2.1	Vodivé pasty .....	13
1.2.2	Odporové pasty .....	13
1.2.3	Dielektrické pasty .....	15
1.2.4	Speciální pasty .....	17
1.3	Depozice tlustých vrstev .....	17
1.3.1	Sítotisk .....	17
1.3.2	Šablonový tisk .....	19
1.3.3	Writing .....	19
1.3.4	Jetting .....	20
1.4	Tepelné zpracování past .....	20
1.5	Vrstvový odpor .....	21
1.6	Dostavování hodnot rezistorů .....	22
1.6.1	Abrazivní dostavování .....	22
1.6.2	Dostavování pomocí laserového paprsku .....	22
1.7	Čtyřbodová metoda měření tlustovrstvých odporů .....	23
1.7.1	Ohraničená odporová vrstva .....	23
1.7.2	Neohraničená odporová plocha .....	24
1.8	Teplotní součinitel odporu TCR .....	25
2	Návrh odporového monitoru .....	27
2.1	Základní návrhová pravidla .....	27
2.2	Návrh obvodu .....	28
3	Realizace odporového monitoru .....	30
3.1	Zhotovení předloh na síta .....	30
3.2	Sítotisk .....	31
3.2.1	Použité pasty .....	32
3.2.2	Optická kontrola natisknutých obvodů .....	33
3.3	Výpal .....	34
4	Zhotovení měřícího přípravku .....	36
4.1	Použití měřícího přípravku .....	37
5	Měření hodnot rezistorů .....	38
5.1	Odporová pasta 1 k $\Omega$ /□ .....	39
5.2	Odporová pasta 10 k $\Omega$ /□ .....	41

5.3	Odporová pasta 1 M $\Omega$ /□ .....	43
5.4	Statistické vyhodnocení .....	45
5.4.1	Průměrná hodnota $\bar{x}$ .....	45
5.4.2	Medián $x$ .....	45
5.4.3	Rozptyl $s^2$ a směrodatná odchylka $s$ .....	45
6	Měření teplotního koeficientu TCR .....	47
6.1	Postup měření .....	47
6.1.1	Použité přístroje .....	47
6.1.2	Výpočet TCR .....	54
7	Závěr .....	55
	Seznam literatury .....	57
	Seznam zkratk .....	58
	Seznam příloh .....	58

## Seznam obrázků

Obr. 1	Základní sled operací při realizaci tlustovrstvé struktury [2] .....	9
Obr. 2	Slévání keramického substrátu [1] .....	10
Obr. 3	Závislost viskozity na tlaku [6] .....	12
Obr. 4	Závislost odporu $R_p$ na koncentraci vodivé fáze [8] .....	14
Obr. 5	Změna hodnoty odporu v závislosti na teplotě pro sadu odporových past [9] .....	15
Obr. 6	Princip sítotisku [6] .....	18
Obr. 7	a) Velikost ok vs. průměr drátu b) Světlost síta [7] .....	18
Obr. 8	Teplotní profil pro výpal tlustých vrstev ve čtyřzónové peci [2] .....	20
Obr. 9	Odpor čtverce nezávisí na jeho velikosti [9] .....	21
Obr. 10	Obdélníkový odpor [9] .....	21
Obr. 11	Dostavování pomocí vzduchového proudu brusiva [9] .....	22
Obr. 12	Dostavování pomocí laseru [9] .....	23
Obr. 13	Model měření čtyřbodovou metodou $R_v$ s ohraničenou plochou [12] .....	24
Obr. 14	Charakter nehomogenního proudového pole [12] .....	24
Obr. 15	a) rozměry vodičů b) rozměry rezistoru [2] .....	27
Obr. 16	Rozměry pájecích plošek [2] .....	28
Obr. 17	Soutiskové značky [2] .....	28
Obr. 18	Návrh vodivé a odporové vrstvy .....	28
Obr. 19	Návrh odporového monitoru .....	29
Obr. 23	Zhotovené předlohy na sítích .....	31
Obr. 24	Sítotiskový poloautomat AUREL C880 [13] .....	32
Obr. 25	Přetavovací pec BTU [13] .....	34
Obr. 26	Vypalovací profil .....	35
Obr. 20	Části měřicího přípravku .....	36
Obr. 21	Detail při měření odporového monitoru .....	37
Obr. 22	Měřicí přípravek .....	37
Obr. 27	Znázornění směru tisku .....	38

Obr. 28	Závislost pasty $1\text{k}\Omega/\square$ na délce .....	39
Obr. 29	Difúze vodivých částic do odporové pasty $1\text{k}\Omega/\square$ .....	40
Obr. 30	Závislost pasty $10\text{k}\Omega/\square$ na délce .....	41
Obr. 31	Difúze vodivých částic do odporové pasty $10\text{k}\Omega/\square$ .....	42
Obr. 32	Závislost pasty $1\text{M}\Omega/\square$ na délce .....	43
Obr. 33	Difúze vodivých částic do odporové pasty $1\text{M}\Omega/\square$ .....	44
Obr. 34	Měření TCR .....	48
Obr. 35	Závislost odporu na teplotě pasty $1\text{ k}\Omega/\square$ .....	49
Obr. 36	Závislost odporu na teplotě pasty $10\text{ k}\Omega/\square$ .....	51
Obr. 37	Závislost odporu na teplotě pasty $1\text{ M}\Omega/\square$ .....	53
Obr. 38	Rozdíl mezi ideálním a vypáleným rezistorem [1] .....	55

## Seznam tabulek

Tab. 1	Vlastnosti keramických materiálů [4] .....	11
Tab. 2	Základní vlastnosti vodivých past [7] .....	13
Tab. 3	Vlastnosti odporových past [7] .....	15
Tab. 4	Vlastnosti izolačních past [7] .....	16
Tab. 5	Průměrné hodnoty pro pastu $1\text{k}\Omega/\square$ .....	39
Tab. 6	Průměrné hodnoty pro pastu $10\text{k}\Omega/\square$ .....	41
Tab. 7	Průměrné hodnoty pro pastu $1\text{M}\Omega/\square$ .....	43
Tab. 8	Statistické hodnoty pro pastu $1\text{ k}\Omega/\square$ .....	46
Tab. 9	Statistické hodnoty pro pastu $10\text{ k}\Omega/\square$ .....	46
Tab. 10	Statistické hodnoty pro pastu $1\text{ M}\Omega/\square$ .....	47
Tab. 11	Hodnoty pro pastu $1\text{ k}\Omega/\square$ .....	48
Tab. 12	Hodnoty pro pastu $10\text{ k}\Omega/\square$ .....	50
Tab. 13	Hodnoty pro pastu $1\text{ M}\Omega/\square$ .....	52

# Úvod

Pro většinu elektronických aplikací je důležitá spolehlivost, kvalita, funkčnost a další vlastnosti, které přímo závisí na tom, jakou technologií jsou vyrobené jednotlivé prvky systému. Cílem této bakalářské práce je seznámit se s technologií tlustých vrstev a realizací elektronických obvodů pomocí této technologie. Tato technologie je poněkud atypická, zároveň však při zpracování poskytuje široké možnosti rozvoje, a tím i zlepšení výkonů a elektrických parametrů vytvořených obvodů.

Zajímavou skutečností tlustovrstvé technologie je, že ačkoliv celý proces prošel dlouhým vývojem, je s malými obměnami identický jako na začátku vývoje v šedesátých letech dvacátého století. Zároveň s vývojem tlustovrstvé technologie se rozvíjela i tenkovrstvá technologie, která tlustovrstvou načas zastínila. Podle způsobu nanášení vrstev existují dvě základní technologie výroby obvodů a to tlustovrstvá a tenkovrstvá. Pro tlustovrstvou technologii je charakteristické nanášení vrstev nejčastěji pomocí sítotisku a pro tenkovrstvou technologii je charakteristické nanášení vrstev napařováním nebo naprašováním ve vakuu. V této práci se dále zabývám pouze tlustovrstvou technologií.

V současné době se pozornost obrací zpět k tlustovrstvým technologiím, které inovacemi jednotlivých operací výrobního procesu a rozšířením materiálové báze poskytují široké možnosti zlepšování a zdokonalování.

Základním rysem tlustovrstvé technologie v elektronice je výroba obvodů pomocí nanášení jednotlivých vrstev na substrát, který tvoří základní nosnou část obvodu (většinou keramická hmota). Z hlediska elektrických vlastností rozlišujeme vrstvy na vodivé, odporové a dielektrické a díky těmto vlastnostem můžeme na substrátu realizovat např. různé pasivní sítě. Principem této metody je protlačení tlustovrstvé pasty volnými oky síťky s motivem na izolační podložku. Tím se vytvoří požadovaná vrstva ve stejném seskupení jako na síťce s motivem. Pasta se na substrát protlačuje stěrkou, která funguje jako flexibilní nůž. Dále tento natisknutý obvod prochází tepelným zpracováním.

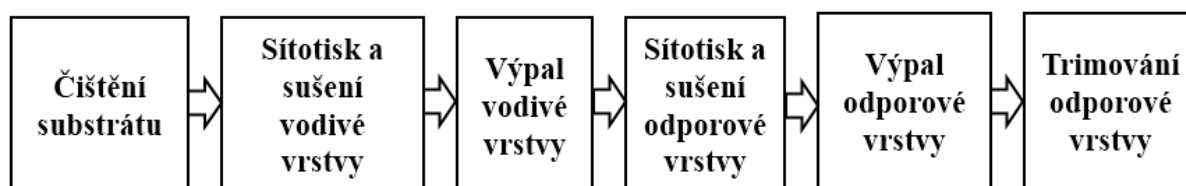
Tlustovrstvá technologie se s výhodou používá tam, kde je potřeba vyšší úroveň integrace při dodržení nízkých nákladů na vývoj a výrobu. Výhodou je také vysoká tepelná vodivost substrátu a možnost nastavení libovolných hodnot rezistorů s vysokou přesností pomocí dostavování hodnot. Typickými představiteli použití tlustovrstvé technologie jsou hybridní integrované obvody, vysokofrekvenční obvody, různé nekonvenční obvody a v dnešní době stále se rozšiřující oblast senzorů.



# 1 Tlusté vrstvy

Pojem tlustá vrstva označuje technologický postup, kdy je elektronický obvod realizován pomocí vypálení určitých druhů past do jednotlivých vrstev na nosný substrát. Pasty jsou většinou nanášeny pomocí metody sítotisku a poté vypáleny. Typická tloušťka tlusté vrstvy je řádově v desítkách  $\mu\text{m}$ . Pokud jsou v obvodu osazené aktivní součástky, obvod nazýváme tlustovrstvé hybridní obvody [1].

Typický sled operací v procesu vytváření tlusté vrstvy je znázorněn na obr. 1. Při nanášení více druhů odporových past nebo nanášení izolačních vrstev, se může operace sítotisku několikrát opakovat [2].



**Obr. 1** Základní sled operací při realizaci tlustovrstvé struktury [2]

Vzniknutí technologie tlustých vrstev můžeme datovat od období druhé světové války, kdy pro vojenské účely vznikl požadavek na miniaturizaci některých elektronických částí. Výsledkem tohoto požadavku byl vznik stříbrné vodivé a uhlíkové odporové pasty, které byly nanášeny na keramický substrát. Většina takto vytvořených obvodů tvořila jen pasivní síť. Díky větší spolehlivosti a nižší ceně než obvody s klasickými diskrétními součástkami, se po válce tato technologie rozšířila i do komerční sféry. Se vznikem monolitických integrovaných obvodů v pozdních padesátých letech, byla snaha těmito obvody vše nahrazovat. Brzy však vyšlo najevo, že monolitické integrované obvody mají své limity (velikost napájení, napětí, proudu, rychlost a také vysoká cena). To byl impuls k dalšímu vývoji tlustovrstvé technologie. Bylo dosaženo širokého rozpětí hodnot odporových past a jejich menší závislost na teplotě, výrazného pokroku se dosáhlo v oblasti dielektrik a také v postupech výroby tlustovrstvých obvodů (např. osazení polovodičových čipů přímo na substrát, což vedlo k zvýšení hustoty elektronických obvodů na substrátu) [1].

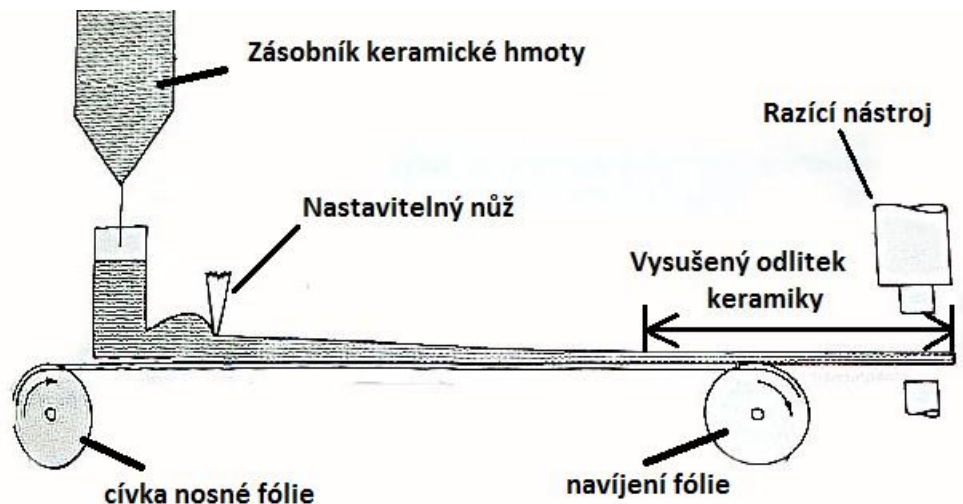
## 1.1 Substrát

Substrát nazýváme podložku, na které je vytvořen elektronický obvod. Pro tlustovrstvé obvody se nejčastěji používají keramické substráty. Keramické substráty s porovnáním se substráty s organických materiálů, mají lepší mechanické, chemické, elektrické a tepelné vlastnosti. Nevýhodou je náročnější opracování a cena. Cena se ale začne vyrovnávat s rostoucí integrací elektronického obvodu [2].

Klasické keramické materiály používané v elektronice mají schopnost snášet teploty  $1300^{\circ}\text{C}$  až  $1500^{\circ}\text{C}$  (4). Porovnáme-li např. materiál typu FR-4 ze skelné tkaniny a epoxidové pryskyřice, který má hodnotu skelného přechodu  $130^{\circ}\text{C}$  (po překročení této teploty materiál přechází z elastického do plastického stavu) vidíme, že keramické materiály můžeme vystavovat vysokým teplotám. Keramické materiály se také vyznačují vysokým elektrickým odporem, vysokou elektrickou pevností a také dobrými dielektrickými vlastnostmi [5].

Keramické substráty mohou být vyráběny několika způsoby. Mezi nejpoužívanější patří:

- Lisování (lisování keramického prášku přímo do formy)
- Extruze (vytlačování plastické keramické hmoty přes matrici)
- Slévání (plastická keramická hmota je slévána na tenké plátky)



**Obr. 2** Slévání keramického substrátu [1]

Při výrobě substrátu metodou slévání (obr. 2), jsou do základní keramické hmoty přidány rozpouštědla, která zajistí plastické vlastnosti materiálu. Poté je materiál nanášen na odvíjející se fólii, nad kterou je umístěn nastavitelný nůž, kterým nastavujeme šířku substrátu. Materiál je dále vysušen, kde se odstraní zbytky rozpouštědel.

Po vytvarování substrátu jednou z uvedených metod, substrát musí často projít předehřevem od 300°C do 600°C, aby se odstranily zbylé organické pojiva, maziva a změkčovadla. Poté je vystaven vyšším teplotám, kdy dojde k vytvrzení. Po vypálení dochází až k 50% ztrátě na objemu substrátu [1].

Nejnámějším představitelem používaných materiálů v elektronice je korundová keramika  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Používá se jako nosný substrát pro tlusté i tenké vrstvy a také pro keramická pouzdra elektronických součástek a hybridních integrovaných obvodů. Dalším typem keramiky je oxid berylnatý  $\text{BeO}$ , který se používá jen velice zřídka z důvodů jeho toxicity. Uplatnění má v obvodech s vyšším tepelným namáháním, kde můžeme využít jeho vysokou tepelnou vodivost. V dnešní době je  $\text{BeO}$  nahrazen nitridem hliníku  $\text{AlN}$ , který se svou tepelnou vodivostí velice přibližuje  $\text{BeO}$ . Díky koeficientu teplotní roztažnosti  $\text{AlN}$ , který je podobný s křemíkem, máme také možnost přímého připojení čipů na substrát. Z hlediska tepelné vodivosti lze keramické materiály srovnat s tepelnou vodivostí kovů. Další vlastnosti keramik jsou uvedeny v tab. 1. Speciální druh keramiky tvoří LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic). Jde o nízkoteplotně vypalovatelnou keramiku, která je z 15% tvořena organickou složkou, 40%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a 45%  $\text{SiO}_2$ . Z tab. 1 také vidíme její odlišné vlastnosti od ostatních druhů keramik. Zejména její tepelná vodivost je velice malá a pro některé aplikace nemusí vyhovovat. Její přednost je flexibilita v surovém stavu, což nám ji umožňuje

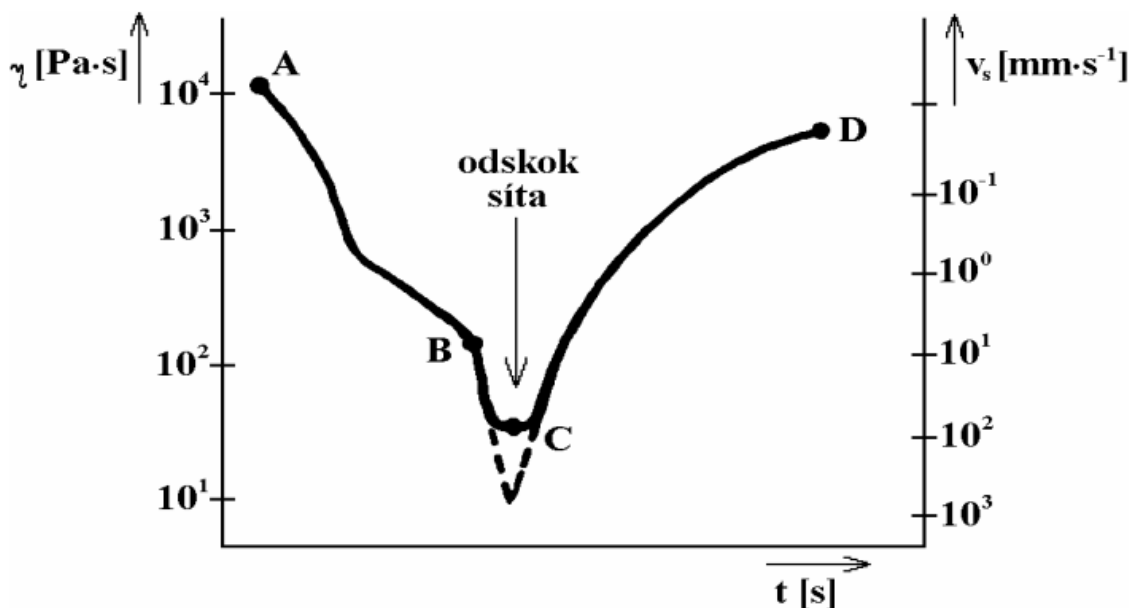
dodatečně tvarovat. Její nevýhodou je smršťování během výpalu, čemuž se zase musí přizpůsobit zejména typy nanášených past. Tento druh keramiky můžeme označit v dnešní době za progresivní, díky jejím vlastnostem lze vytvářet vícevrstvé struktury (3D struktury), které mohou ve vnitřních strukturách obsahovat sítě z pasivních prvků. Tímto způsobem docílíme zmenšení plochy elektronického obvodu a větší integrace prvků do obvodu [4].

	AlN	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BeO	LTCC
<b>Tepelná vodivost <math>\lambda</math> (Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>)</b>	140 – 170	10 – 35	150 – 250	2 -4
<b>Koeficient tepelné roztažnosti <math>\alpha</math> (10<sup>-6</sup>K<sup>-1</sup>)</b>	2,65	5,5	5,4	4,3
<b>Průrazné napětí E<sub>P</sub> (kV.mm<sup>-1</sup>)</b>	15	> 10	10	8,5
<b>Relativní permitivita <math>\epsilon_r</math> (1 MHz)</b>	8,9	9,7	6,7	1,5 – 8
<b>Pevnost R<sub>m</sub> (MPa)</b>	450	400	240	190

**Tab. 1** Vlastnosti keramických materiálů [4]

## 1.2 Pasty pro tlustovrstvou technologii

Materiály pro vytvoření pasivních sítí na substrátu jsou ve formě past. Tyto pasty obsahují více složek, které jsou charakterizovány různými chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Důležitá vlastnost každé pasty je její viskozita. S viskozitou past jsou spojeny jejich tixotropní vlastnosti. Tixotropní vlastnost znamená, že viskozita pasty se mění v závislosti na mechanickém tlaku. Tato závislost je zobrazena na obr. 3 [2].



Obr. 3 Závislost viskozity na tlaku [6]

Z obrázku je patrné, že nejnižší viskozity je dosaženo v bodě C, což je okamžik, kdy dochází k přenosu pasty ze síta na substrát v důsledku působení tlaku stěrky. Z obrázku dále vidíme, že viskozita pasty je nepřímo úměrná tlaku stěrky a díky tomu dochází k přesunu pasty v okamžiku, kdy je pasta protlačována volnými oky síta. Poté dochází k odskoku síta a vytvoření obrazce na substrátu [2].

Pasty pro tlustovrstvou technologii se skládají z těchto složek:

#### a) Funkční složka

Funkční složka nám určuje charakter pasty. Vodivé pasty jsou složeny z částic drahých kovů, izolační pasty ze skelných frit a dielektrických částic. Funkční složka u odporových past může tvořit směs drahých kovů (např. PdAg) nebo oxidy (např.  $\text{Ru}_2\text{O}$ ). Velikost částic je řádově v  $\mu\text{m}$  a musí být menší než velikost ok použitého síta.

#### b) Tavivová složka

Tavivová složka obsahuje skleněnou fritu z nízko tavného skla, jehož teplota tavení je od  $600^\circ\text{C}$ . Tato vlastnost zaručuje vytvoření vazby mezi funkční složkou a substrátem. Některé pasty obsahují oxidovou vazbu, která je vytvořena přidáním kovu (např. 4% Cu do Au). Při výpalu pasty potom musí dojít k měknutí (nesmí dojít k roztavení), aby vznikla nosná matrice pro funkční složku.

#### c) Pojivová složka

Pojivová složka je tvořena z organických látek (např. terpineol, butyldiglykolacetát) a pastě zajišťuje její viskozitu a tím i její tiskové vlastnosti. Tato složka nemá vliv na konečné vlastnosti vrstvého obvodu, protože se v průběhu výpalu odpaří [6].

V pastách mohou být i látky, které mohou změnit jejich viskozitu, tzv. modifikátory vlastností (smáčedla, oxidy nebo sloučeniny) [3].

Pasty můžeme rozdělit podle jejich určení na tyto skupiny:

- vodivé
- odporové
- dielektrické
- speciální

### 1.2.1 Vodivé pasty

U typického tlustovrstvého obvodu, vodivé pasty tvoří největší podíl materiálu otisknutého na substrát. Tyto pasty musí mít velký rozsah vypalovacích teplot, aby mohli být použity spolu s ostatními pastami, a přitom si musí stále udržet své dobré elektrické vlastnosti a pájitelnost [1].

U tlustovrstvých obvodů se vodivé pasty používají pro vytvoření propojovací sítě mezi jednotlivými prvky v obvodu, k vytvoření pájecích plošek nebo plošek pro lepení polovodičů, pro elektrody kondenzátorů a senzorů a další nekonvenční aplikace jako je např. stínění antén.

Funkční složka vodivých past je tvořena práškem z drahých kovů nebo z jejich slitin (AgPd, AuPd, AuPt, Au). Teplota výpalu vodivých past na substrát se pohybuje v rozmezí od 760°C do 1000°C. Doporučenou teplotu udává výrobce pro každý typ vodivé pasty.

Konečnou vlastnost pasty určuje druhý kov obsažený ve slitině. Slitiny AuPd a AuPt snáší vícenásobné pájení a rozpustnost těchto slitin v cínu je malá. Jsou však dražší a jejich vodivost oproti AgPd je menší. Vrstvy z čistého Au jsou ideální pro eutektické pájení slitinou Au-Si a termokompresní sváření. Nevýhodou je, že Au vrstvy nemůžeme pájet pájkou s obsahem cínu, v níž se rychle rozpouštějí. Speciálně upravené Au pasty s velikostmi zrn několika  $\mu\text{m}$ , nám umožňují tisk velmi tenkých vrstev s vysokou rozlišovací schopností.

U slitiny s Ag druhý kov zabraňuje elektromigraci a snižuje rozpustnost v pájce. Tyto slitiny mají velice dobrou smáčitelnost a jsou charakteristické svou vysokou vodivostí [7].

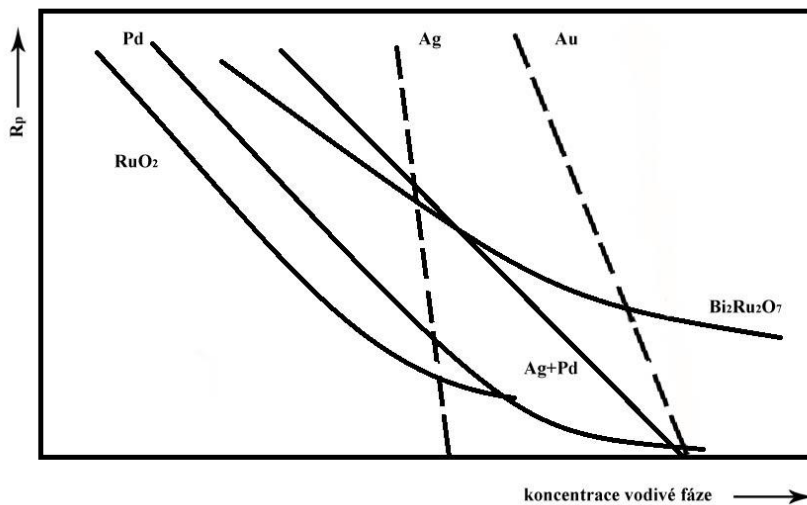
Vlastnost	Ag-Pd	Au-Pd	AuPt	Au
Teplota výpalu [°C ]	760-1000	760-1000	800-1000	760-1000
Rozlišení [ $\mu\text{m}$ ]	50-400	50-400	50-400	50-400
Plošný odpor $R_p$ [ $\Omega$ ]	0,01-0,06	0,05-0,1	0,08-0,1	0,003-0,01
Přilnavost síta, potřebná k utržení připájené plošky 4 mm <sup>2</sup> po 100 hod. 125°C [N]	15-40	30-40	10-45	---

**Tab. 2** Základní vlastnosti vodivých past [7]

### 1.2.2 Odporové pasty

Pomocí odporových past vytváříme tlustovrstvé odpory typu cermetu. Odporová pasta obsahuje práškový vodivý pigment a skelnou fritu, a právě změnou koncentrace vodivých částic v pastě nastavujeme požadovanou hodnotu odporu. Při překročení určité hodnoty

koncentrace (tzv. kritická koncentrace), dochází ke vzniku vodivého propojení po celé délce vytvořeného odporu. Obr. 4 schematicky znázorňuje závislost odporu na koncentraci vodivých částic [8].



**Obr. 4** Závislost odporu  $R_p$  na koncentraci vodivé fáze [8]

Z Obr. 4 vidíme, že závislost odporu materiálů pro odporové pasty má pozvolnou tendenci. Pro srovnání jsou v obrázku také znázorněny závislosti Ag a Au. Z jejich průběhů je zjevné, že použití čistých drahých kovů je pro odporové pasty nevhodné [8].

Výsledné vlastnosti odporových vrstev závisí na dodržení technologického postupu, především dodržení teploty a doby výpalu. Teplota výpalu odporových vrstev se pohybuje kolem 850°C a celková doba výpalu je 60min [7].

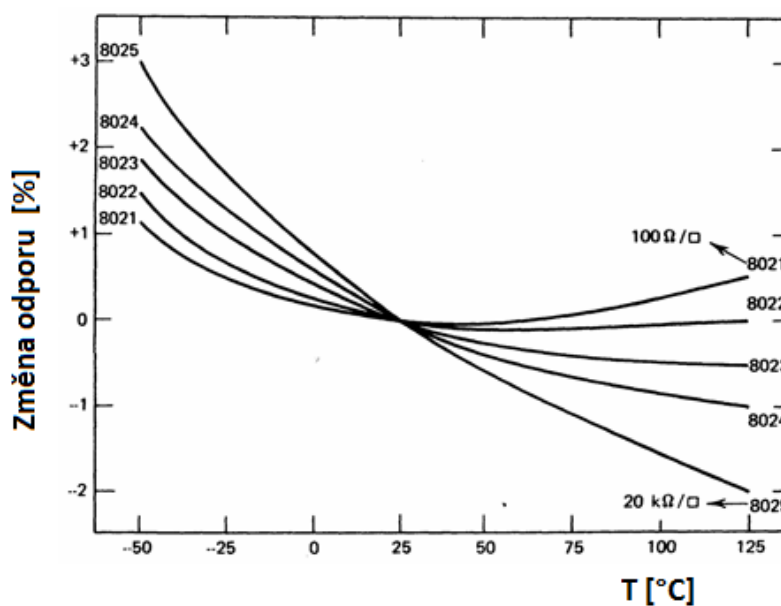
Mezi základní požadavky na odporové pasty patří:

- široký rozsah rezistivity
- stabilní hodnoty i při vysokých teplotách
- nízká hodnota TCR
- nízká hodnota VCR
- nízký šum
- kompatibilita s vodivými pastami [9]

Vlastnost	Jednotka	Pd-Ag	RuO <sub>2</sub>	Ruteničitany
Plošný odpor R <sub>p</sub>	Ω	10·10 <sup>5</sup>	1·10 <sup>7</sup>	10·10 <sup>7</sup>
Rozptyl odporu po výpalu	%	30	10	10-25
Teplotní součinitel -55 až +125°C	K <sup>-1</sup>	300·10 <sup>-6</sup>	300·10 <sup>-6</sup>	50-250·10 <sup>-6</sup>
Napěťový součinitel	V <sup>-1</sup>	150·10 <sup>-6</sup>	400·10 <sup>-6</sup>	-19·10 <sup>-6</sup>
Vypalovací teplota	°C	850	980	850
Doba výpalu	min	60	45	60

**Tab. 3** Vlastnosti odporových past [7]

Současné moderní odporové pasty jsou založeny na oxidu ruthenia, iridia a rhenia. Tyto pasty jsou méně citlivé na změnu vypalovacího profilu a nabízí nízkou hodnotu TCR a stabilitu. Na obr. 5 je znázorněna změna hodnoty odporů vybraných past v závislosti na teplotě [9].



**Obr. 5** Změna hodnoty odporu v závislosti na teplotě pro sadu odporových past [9]

### 1.2.3 Dielektrické pasty

Dielektrické pasty mohou být definovány jako vysoko viskózní tixotropní pasty. Konvenční pasty obsahují dielektrické nebo feroelektrické oxidy ve formě prášku a nízko tavitelné skleněné frity smíchané s organickým pojivem. Po aplikaci pasty na substrát je pasta zahřívána, aby došlo k vypálení organického pojiva. Zahřívání dále způsobí změkčení a roztavení skla a dochází ke spojení skelných frit s dielektrickým práškem. Takto vytvořená skleněná vrstva se chemicky spojí se substrátem [1].

Změknutí skla může způsobit deformaci kryté vrstvy, a proto se do pasty zavádí jemné plniva (např.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ). To má za následek vzrůst viskozity a omezení plastického toku pasty při výpalu [8].

Použití dielektrických past:

- ochranná vrstva vytvořeného obvodu
- izolace vodivých vrstev (křížiště, vícevrstvé obvody)
- kondenzátory
- pouzdření [1]

Ochranná dielektrická vrstva se vyznačuje vysokou hodnotou měrného odporu, nízkou hodnotou permitivity a malým ztrátovým činitelem. Aby nedocházelo k ovlivnění kryté vrstvy, hodnota výpalu musí být malá (okolo  $500^\circ\text{C}$ ). Proto je tato vrstva aplikována jako poslední.

Izolační dielektrická vrstva pro křížiště a vícevrstvé obvody se vyznačuje minimální permitivitou pro potlačení parazitních kapacit, vysokým izolačním odporem a elektrickou pevností. U vícevrstevných obvodů musí mít izolační vrstva a substrát podobnou hodnotu TCE a dostatečnou tepelnou vodivost pro odvod tepla z prostoru mezi vrstvami.

Funkční složka u tlustovrstvých kondenzátorů je tvořena z materiálů stejných jako u keramických kondenzátorů. Jsou to feroelektrické sloučeniny nebo iontově krystalické sloučeniny perovskitové. U první skupiny můžeme dosáhnout vysokých hodnot relativní permitivity, ale za cenu vysokého ztrátového činitele. U druhé skupiny je to naopak. Teplota slinutí u zmiňovaných materiálů převyšuje  $1000^\circ\text{C}$ , a proto se v pastě používá skelné pojivo, které tuto teplotu snižuje. Skelná pojiva mají ale za následek snížení permitivity. Tomuto snížení se předchází nasycením skelné fáze příslušnou sloučeninou už při její přípravě tavením [8].

Parametr	Jednotka	Sklovina jednoduchá	Sklovina rekrytalizační	Sklo-keramika
Tloušťka vrstvy	$\mu\text{m}$	37-50	37-50	37-50
Relativní permitivita $\epsilon_r$ (1kHz)	-	6-9	10-20	11
Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ 1kHz	-	0,005	0,005	0,005
Činitel jakosti Q (1kHz)	-	500	1000	-
Izolační odpor měř. při napětí 100 V	$\Omega$	$10^{11}$	$10^{11}$	$10^{13}$
Elektrická pevnost $E_d$	$\text{kVmm}^{-1}$	8,5	11	20
Vypalovací teplota	$^\circ\text{C}$	875	850	850
Doba výpalu	min	60	60	45

**Tab. 4** Vlastnosti izolačních past [7]



### 1.2.4 Speciální pasty

Speciální pasty obsahují funkční složku, která je pro každou aplikaci jiná.

Druhy speciálních past:

- Termorezistivní NTC (oxidy Mn, Co, Ni, Fe, Ti, Zn, Mg, Cr, Li)  
PTC (na bázi BaTiO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, VO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- Magnetorezistivní (na bázi Ni)
- Feromagnetické
- Pyroelektrické (na bázi LiTaO<sub>3</sub> a polymerní)
- Piezorezistivní (cermetové SiC, AlAs, RuO<sub>2</sub>)
- Piezoelektrické (BaTiO<sub>3</sub>, piezoelektrické polymery)
- Citlivé na vlhkost (polymerní sloučeniny, cermetové pasty)
- Chemicky citlivé (polovodičové oxidy kovů, polyelektrolyty, pevné elektrolyty ZrO<sub>2</sub>)
- Biocitlivé (polymerní lože s receptorovými částicemi) [10]

## 1.3 Depozice tlustých vrstev

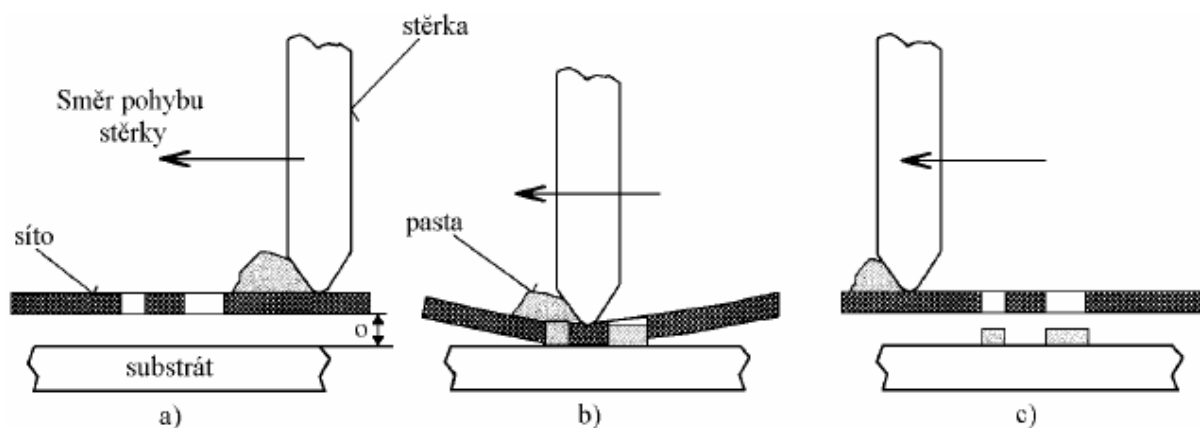
Nanášení tlustovrstvých past se provádí těmito způsoby:

- sítotiskem
- šablonovým tiskem
- popisem (writing)
- tryskáním (jetting)

### 1.3.1 Sítotisk

Sítotisk je nejznámější způsob nanesení tlustovrstvých past na substrát. Principem sítotisku je protlačení viskózní pasty přes síto, na kterém je fotoprocesem vytvořen požadovaný motiv vrstvy. Síto je napnuto v kovovém rámečku a umísťuje se v určité vzdálenosti od substrátu, který je uchycen v nastavitelném držáku. Tuto vzdálenost nazýváme, odtrh  $o$ . Velikost odtrhu se pohybuje od 0,25 – 1 mm a definuje nám výšku vrstvy.

Po upevnění síta a nastavení základny se substrátem, je nanášeno na sítku malé množství pasty. Pohybem stěrky s rychlostí  $V_s$ , která zároveň působí silou  $F_s$ , je docíleno proniknutí pasty do ok sítky. Po přesunutí stěrky na konec síta, dochází k odskoku síta do původní vzdálenosti a na substrát je přenesena pasta do požadovaného motivu. Proces je zobrazen na obr. 6 [7].

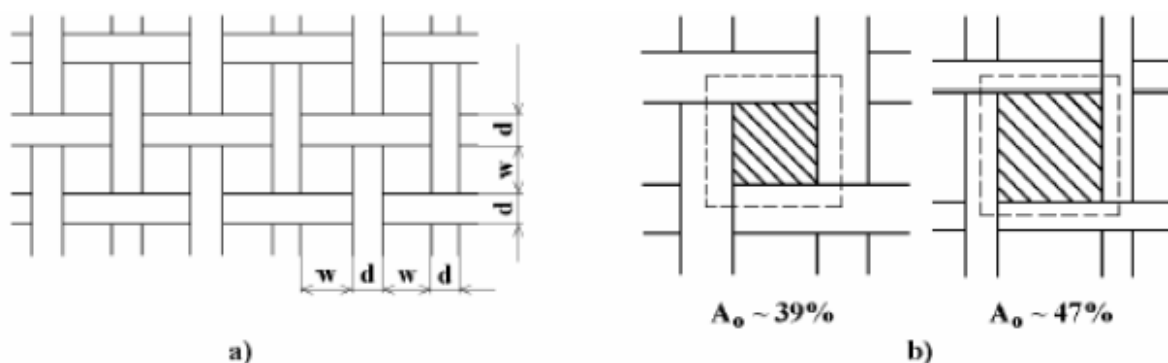


**Obr. 6** Princip sítotisku [6]

Síta jsou vyrobeny z nerezové oceli nebo polyesterové síťoviny s relativně otevřenou vazbou. Světlost síta je kolem 40%. Použití nerezové oceli nám dává nejlepší rozměrovou stabilitu a oproti polyesterovým sítům má větší i světlost (lepší průchodnost pasty). Polyester je zase odolnější, méně náchylný k poškození a má lepší odskok od substrátu [9].

Výběr síta by měl splňovat tato doporučení:

- Velikost oka by mělo být alespoň třikrát větší, než je velikost částice v použité pastě.
- Průměr vlákna by neměl být větší než jedna třetina šířky nejužšího tištěného obrazce.
- Velikost rámu by měla být alespoň jeden a půl až dvakrát větší, než velikost tištěného motivu (předejdeme nesprávnému natisknutí pasty na substrát, tisknutý obrazec by mohl být zdeformovaný).
- Tloušťka vytisknutého motivu (nevypáleného), je rovna přibližně tloušťce oka vynásobené procentuální světlostí síta [9].



**Obr. 7** a) Velikost ok vs. průměr drátu b) Světlost síta [7]

Aby výsledný tlustovrstvý obvod splňoval požadované hodnoty, vytisknutý motiv musí splňovat určitá kritéria.

- Šířka vytisknutých vodičů a rozměry vytisknutých součástek musí souhlasit s motivem.
- Pozice mezi substrátem a použitým sítem musí být v definované poloze. K tomuto účelu se používají soutiskové značky.
- Tloušťka vytisknuté pasty musí být konstantní, abychom dodrželi hodnoty rezistorů nebo abychom zaručily požadované dielektrické vlastnosti izolační vrstvy [9].

Požadovanou tloušťku tisknuté pasty nastavujeme hlavně zvolením tloušťky síta. Do určité míry ( $\pm 20\%$ ) můžeme tloušťku vytisknuté pasty změnit jiným nastavením tlaku a rychlosti stěrky [9].

### 1.3.2 Šablonový tisk

Princip šablonového tisku je stejný jako u sítotisku. Rozdíl spočívá v provedení šablony. Motiv šablony je vytvořen v pevném materiálu, nejčastěji z ocelové nebo bronzové planžety (např. CuSn<sub>6</sub>).

Při tisku je šablona přiložena přímo na substrát (není zde žádná velikost odtrhu). Po nanesení pasty stěrkou dojde k vyplnění motivu v šabloně a poté dochází k odtrhu šablony (zpravidla se odtrhne stolek tiskového stroje od šablony). Po odtrhu je na substrátu vytvořen požadovaný motiv.

Šablony se mohou vytvářet těmito způsoby:

#### a) Chemické leptání

Na plát nerezové oceli je nanese vrstva odolná leptacímu roztoku. Motiv šablony tvoří místa bez tohoto roztoku a jsou odleptána. Tato metoda vytváří šikmé hrany, které mohou způsobit zatékání past při velmi jemných strukturách.

#### b) Laserové řezání

Motiv šablony je vytvořen kontinuálním laserovým paprskem do kovové desky. Otvory mají lichoběžníkové hrany. Elektrolytickým leštěním vnitřních stěn docílíme hladkého povrchu. Tento typ šablony je vhodný pro velmi přesné aplikace, ale jsou oproti předešlému způsobu zhotovení dražší.

#### c) Galvanoplastické šablony

Šablona vzniká pokovováním niklu fotoaktivní plastové struktury, která se mění působením světla na požadovaný obraz. Jakmile je dosaženo požadované tloušťky niklové vrstvy, fotoaktivní vrstva je odstraněna. Šablona je 5-10x levnější než šablony zhotoveny laserovým řezáním [6].

### 1.3.3 Writing

Writing je nanášení tixotropních materiálů na podložku s pomocí dispenzeru, jehož hrot není v přímém dotyku se substrátem. Při dávkování kapalina zůstává na špičce hrotu a poté je teprve aplikována na substrát. Adheze a povrchové napětí substrátu způsobují uchycení pasty na substrát, avšak předtím, než se jehla posune do další pozice, musí nastat zřetelný pohyb v ose z.

Zařízení se skládá:

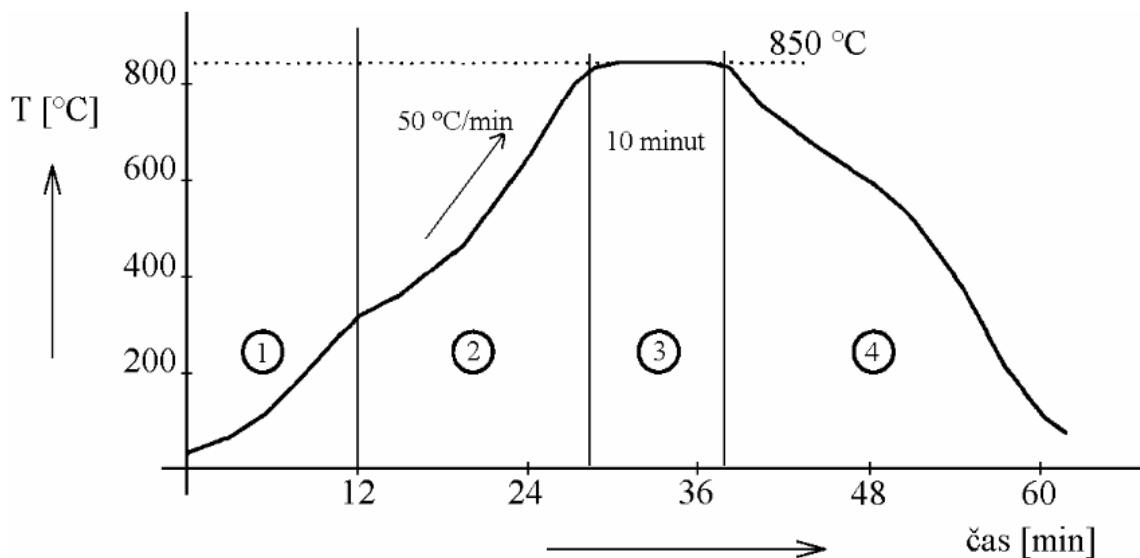
- z řídicí části, která generuje data pro řízení procesu
- depoziční jednotky (hlavy) se zásobníkem pasty a nanášecím hrotem
- poziční jednotky s ovládáním pohybu ve třech osách [11]

### 1.3.4 Jetting

Jetting je proces, kdy je kapalina v rychlé frekvenci vytlačována přes trysku tak, že se oddělí od vrcholu trysky předtím, než se spojí se substrátem. V každém cyklu tryskání je vytlačováno určité definované množství materiálu, který se spojí v požadovaný motiv. Obvyklá frekvence tryskání je 100-200 Hz, při krátkých periodách až 1000 Hz. Takovým způsobem lze nanášet viskózní materiály podobně jako tisk a s menším rozlišením oproti writingu [11].

## 1.4 Tepelné zpracování past

Dalším stupněm ve výrobě tlustovrstvého obvodu je tepelné zpracování natisknutých past neboli výpal. Při výpalu dochází k chemické reakci směsi pasty a k vytvoření vazby se substrátem. Každý typ pasty má výrobcem daný vypalovací profil. Aby mohly být tyto profily dodržovány, používají se průběžné tunelové pece. Pec je rozdělena na zóny, kde je regulován teplotní profil s vysokou přesností ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ). Typický teplotní profil je na obr. 8. Základní vlastnosti vypálených vrstev závisí na parametrech výpalu (teplotní profil a použitá atmosféra) [7].



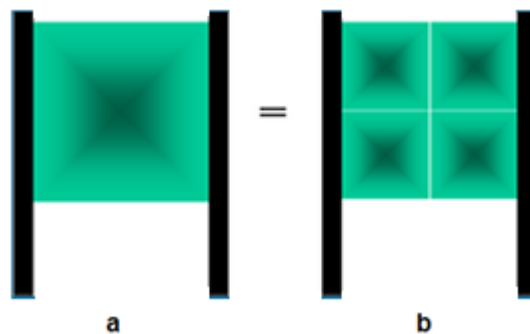
**Obr. 8** Teplotní profil pro výpal tlustých vrstev ve čtyřzónové peci [2]

Proces výpalu lze rozdělit na 4 základní fáze:

- 1) **Sušení** - teplota se pohybuje od 70°C do 150°C od 15 do 30 min. Dochází k odpaření organických těkavých ředidel. Tloušťka vrstvy po za sušení má být kolem 25μm.
- 2) **Zóna přehřívací** – teplota je kolem 350°C, kdy dochází k odpaření zbylých stop organických rozpouštědel, vyhořívá filmotvorný materiál.
- 3) **Zóna vypalovací** – teplota 850°C, začíná tvorba slitin a slinování funkčních složek pasty, probíhají důležité chemické reakce ovlivňující výsledné vlastnosti pasty.
- 4) **Zóna chladící** – dochází k ochlazování postupně až na teplotu okolí, tuhne roztavená skelná fáze [7].

## 1.5 Vrstvový odpor

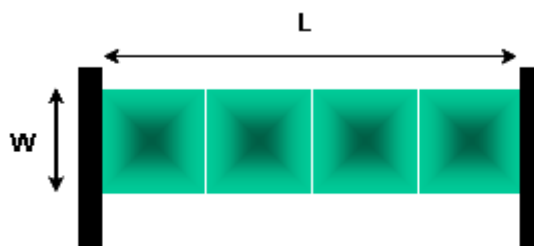
Vrstvový odpor  $R_v$  je důležitý elektrický parametr, který specifikuje odpor použité odporové pasty nanesené v definované tloušťce.  $R_v$  je specifikován jako odpor čtverce, měřený na protilehlých stranách (Obr. 9a). Na obr. 9b si můžeme představit dva rezistory složené ze dvou čtverců spojené paralelně. Každý rezistor má hodnotu  $2 \cdot R_v$ , ale pokud je spojíme paralelně, jejich hodnota je  $R_v$ . Každý čtverec vyrobený ze stejného materiálu, má tedy stejnou hodnotu odporu a tato hodnota odporu je nezávislá na jeho rozměrech. Jednotka tak může být specifikována jako ohm na čtverec ( $\Omega/\square$ ) [9].



Obr. 9 Odpor čtverce nezávisí na jeho velikosti [9]

Obdélníkový odpor  $R$  o délce  $L$  a šířce  $W$  potom bude

$$R = R_v \cdot \frac{L}{W} [\Omega] \quad (1)$$



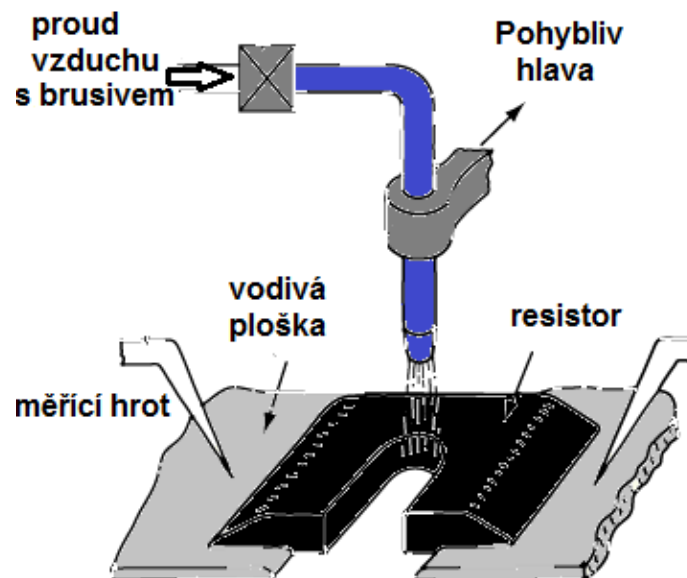
Obr. 10 Obdélníkový odpor [9]

## 1.6 Dostavování hodnot rezistorů

Dostavování hodnot rezistorů zajišťuje jejich konečné elektrické vlastnosti. Tato konečná fáze je nutná, protože sítotiskem není možné dosáhnout požadovaných přesností (přesnost sítotisku se pohybuje od 10 do 20%). Dostavování se provádí odnímáním malých plošek natisknutých rezistorů. Při dostavování se provádí současně měření rezistorů během procesu, aby se zkontrolovala konečná hodnota. Pomocí dostavování rezistorů můžeme hodnoty rezistorů pouze zvyšovat, protože dochází ke zvětšování proudových siločar, neboli dochází ke zvyšování počtu čtverců rezistoru [8].

### 1.6.1 Abrazivní dostavování

Principem je vytvoření miniaturního proudu vzduchu, který nese částice brusiva (křemenný písek). Velikost částic je 10 až 50 $\mu$ m. Tento proud brusiva se posunuje po povrchu odporové vrstvy, která je tímto proudem selektivně odstraňována. Tímto způsobem dochází ke zvětšení hodnoty tlustovrstvého odporu. Aby nedocházelo k poškození podložky, je nutné vhodně ovládat tlak proudu brusiva. Největší nevýhodou této metody je nebezpečí poškození sousedních částí dostavované vrstvy. Je to způsobeno bočním působením brusiva po dopadu na vrstvu [8].

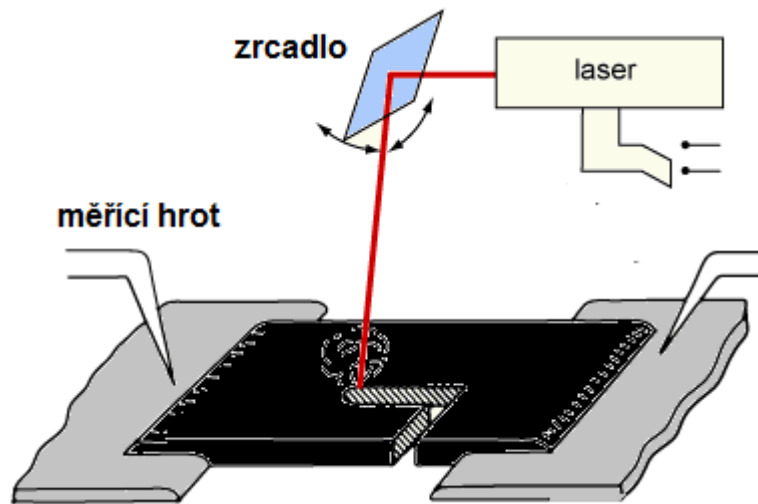


Obr. 11 Dostavování pomocí vzduchového proudu brusiva [9]

### 1.6.2 Dostavování pomocí laserového paprsku

Laserový paprsek pracující v impulsním režimu řeže velmi tenkou drážku, která vzniká odpařením materiálu z dostavované vrstvy. Laserový dostavovací systém může mít vychylování paprsku pomocí zrcátek, která jsou ovládány řídicím programem, nebo pevná zrcátka a pohyblivý stolek v osách x a y ovládaný programem. Při tomto procesu se používají dva druhy laseru. Laser typu YAG má kratší vlnovou délku a dá se zaostřit na hodnoty 10 až 12 $\mu$ m. Laser typu CO<sub>2</sub> má průměr paprsku 10x větší.

Dostavování laserem je velice rychlé a přesnost dostavovaných rezistorů může dosáhnout až 0,01% [8].



Obr. 12 Dostavování pomocí laseru [9]

## 1.7 Čtyřbodová metoda měření tlustovrstvých odporů

Čtyřbodová (Kelvinova) metoda se používá pro měření velmi malých hodnot odporů. Klasická dvou vodičová metoda je při měření malých hodnot zatížena chybou, která je způsobena odporem přírodních vodičů.

Principem metody je měření napětí přímo na povrchu vrstvy, kterou prochází proud. Tímto způsobem eliminujeme chybu způsobenou přírodnými vodiči.

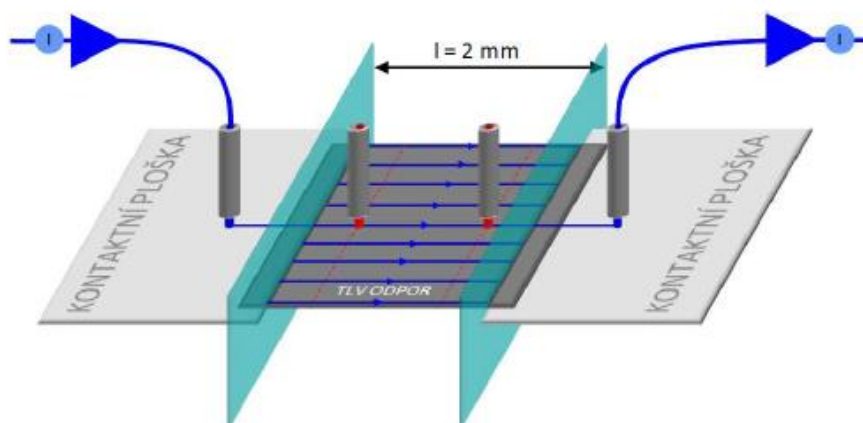
### 1.7.1 Ohraničená odporová vrstva

Uvažujeme-li konstantní tloušťku odporové vrstvy, pak motiv díky vodivým ploškám vytvoří v odporové vrstvě mezi kontakty přímé homogenní proudové i napěťové pole (proudová hustota vrstvy je konstantní). Napětí pro výpočet vrstevového odporu je měřeno vždy na konstantní délce odporové vrstvy, která je dána vzdáleností měřících hrotů  $s$ . Další neznámou je proud, který je částí celkového měřeného proudu procházejícího vzorkem. Pro správnou hodnotu odpovídající právě jednomu čtverci, je nutné naměřenou hodnotu proudu vynásobit vhodným koeficientem  $K_I$ . Ten dostaneme jako podíl celkové šířky odporové vrstvy  $w$  a aktivní šířky pro zvolený rozměr vrstevového odporu  $s$  [12].

$$K_I = \frac{s}{w} [-] \quad (2)$$

K výpočtu vrstevového odporu s ohraničenou plochou použijeme následující vztah.

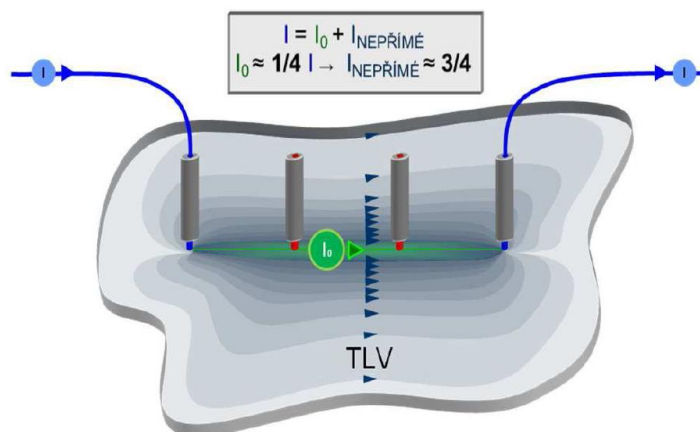
$$R_v = \frac{U}{I \cdot K_I} = \frac{U}{I \cdot \frac{s}{w}} = \frac{U}{I} \cdot \frac{w}{s} [\Omega/\square] \quad (3)$$



**Obr. 13** Model měření čtyřbodovou metodou  $R_v$  s ohraničenou plochou [12]

### 1.7.2 Neohraničená odporová plocha

Budeme-li měřit odporovou vrstvu bez kontaktních plošek, pravidlo homogenního pole již neplatí. Proud je do odporové vrstvy nyní přiváděn pouze kontaktem tvořeným hrotem sondy a nikoliv kontaktní ploškou. Proto jednotlivé proudové siločáry již nejsou shodné délky, ale tvoří pole s charakterem, který znázorňuje obr. 14. Zde již není pole homogenní, nejsme tedy schopni z geometrických rozměrů jednoduše stanovit pracovní proud pro výpočet vrstvého odporu [12].



**Obr. 14** Charakter nehomogenního proudového pole [12]

Pro vrstvý odpor zde platí zjednodušený vztah (rovnice 4), který potlačí nepřesnosti výpočtu pomocí korekčních faktorů. Pro tlustovrstvé odpory uvažujeme pouze korekční faktor plošného rozměru  $C$ , ostatní můžeme zanedbat [12].

$$R_v = \frac{U}{I \cdot K_I} = \frac{U}{I} \cdot C \quad [\Omega/\square] \quad (4)$$



## 1.8 Teplotní součinitel odporu TCR

Teplotní součinitel odporu rezistoru TCR umožňuje určit změnu odporu rezistoru způsobenou změnou jeho teploty. Udává největší poměrnou změnu odporu součástky odpovídající nárůstu oteplení o 1°C, v rozsahu teplot, ve kterých je tato změna vratná.

Teplotní součinitel odporu je definován jako:

$$TCR = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} \quad (5)$$

R – odpor rezistoru

dR – změna hodnoty odporu

dT – změna teploty

TCR se vyjadřuje v jednotkách %/°C nebo v ppm/°C. Teplotní koeficient odporu TCR je jedním z nejdůležitějších parametrů rezistorů. Jeho velikost je důležitá při volbě hodnoty odporu pro konkrétní aplikace, protože změna teploty vyvolá změnu odporu, což může vést k nežádoucím změnám ve funkci obvodu.

Velikost odporu u tlustovrstvého rezistoru je dána materiálem, ze kterého je odporová tlustovrstvá pasta vyrobena. Při návrhu rezistoru je volen materiál, který má vhodný průběh závislosti odporu na teplotě pro danou aplikaci a požadované provozní podmínky. Čisté kovy mají obvykle pozitivní TCR, uhlíkové a grafitové rezistory s polymerními plnidly mají negativní TCR [2].

U pozitivního TCR se s rostoucí teplotou zkracuje střední doba mezi srážkami a tím dochází k růstu odporu podle následujícího vztahu:

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)] \quad (6)$$

R<sub>0</sub> - hodnota odporu rezistoru na počátku (při teplotě 0°C)

T – teplota, při které je hodnota odporu právě R

T<sub>0</sub> - počáteční teplota při které je hodnota odporu právě R<sub>0</sub>

α - koeficient změny odporu TCR

Koeficient změny odporu je tedy:

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 \cdot (T - T_0)} \quad (7)$$

Rezistory s negativním koeficientem TCR jsou realizovány z polovodičových materiálů. Při zvyšování teploty dochází ke zvyšování koncentrace nosičů náboje a tudíž k snižování rezistivity.

Teplotní závislost odporu pro negativní teplotní koeficient TCR:

$$R = R_0 \cdot \exp^{[-\beta \cdot (\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})]} \quad (8)$$

$\beta$  - koeficient změny odporu TCR

$R_0$  - hodnota odporu rezistoru na počátku (při teplotě 0°C)

$T$  – teplota, při které je hodnota odporu právě  $R$

$T_0$  - počáteční teplota při které je hodnota odporu právě  $R_0$

Koeficient změny odporu je tedy:

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}} \quad (9)$$

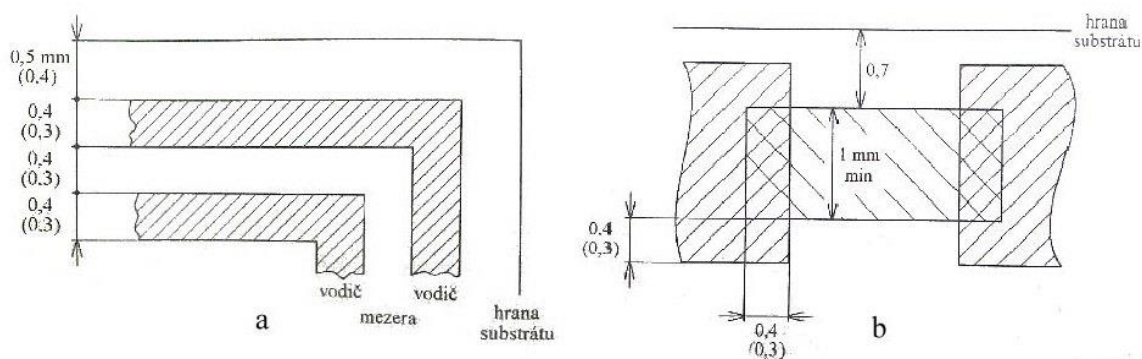
## 2 Návrh odporového monitoru

Odporový monitor je navržen pro testování elektrických vlastností odporových past. Zároveň musí být navržen tak, aby ho bylo možné testovat pomocí sondy, která se při měření přiloží na obvod.

Pro návrh odporového monitoru je zvolen program Eagle, ve kterém je možné navrhnout a vytisknout obvod v jednotlivých vrstvách.

### 2.1 Základní návrhová pravidla

Při navrhování pasivní odporové sítě musí být dodrženy určitá návrhová pravidla. Základní možnost vedení vodičů v pravoúhlém souřadnicovém systému je znázorněno na obr. 15a. V nezbytných případech je možné i šikmé vedení vodičů, ale musí to být zohledněno jak při volbě síta, tak při výrobě šablony. Minimální šířka vodiče závisí na příslušné technologii, ale musíme vzít v úvahu, že tlustovrstvé spoje mají oproti měděným vodičům vyšší odpor (1 až 20 mΩ/□). Proto je třeba u každého návrhu zvolit optimální délku vodičů a jejich šířka by neměla klesnout pod 0,3mm. Standartní šířka vodiče by měla být 0,5mm [2].



Obr. 15 a) rozměry vodičů b) rozměry rezistoru [2]

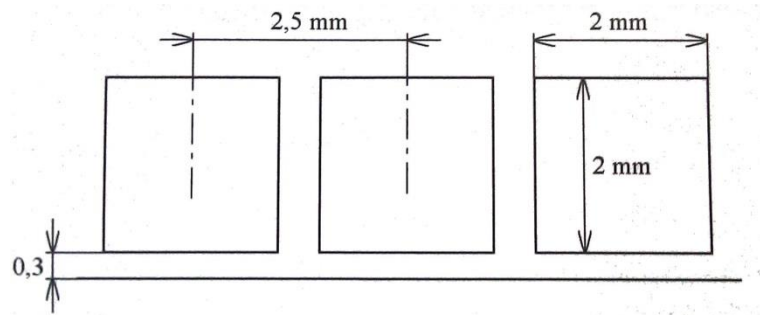
Na obr. 15b jsou znázorněny minimální rozměry při návrhu rezistoru. Minimální doporučená šířka rezistoru by měla být 1mm (ve výjimečných případech 0,8mm) s ohledem na rozptyl jmenovité hodnoty odporu v důsledku působení náhodných vlivů. Pro omezení rozptylu je doporučeno dodržet následující vztah [2].

$$\frac{1}{3,5} \leq \frac{l}{w} \leq 3,5 \quad (10)$$

w – šířka rezistoru

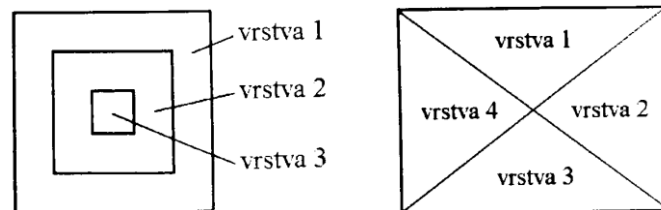
l – délka rezistoru

Návrhu plošek pro připájení vnějších vývodů zobrazuje obr. 16. Rozměry jsou zvoleny jak s ohledem na vyráběné rozteče vývodů, tak i dosáhnutí požadovaných mechanických vlastností [2].



**Obr. 16** Rozměry pájecích plošek [2]

Nezbytnou součástí každého vícevrstvého obvodu jsou soutiskové značky (obr. 17). Značky se umísťují do volného prostoru šablony tak, aby jednotlivé vrstvy tvořily souvislý obrazec a aby bylo možné provést kontrolu soutisku na substrátu [2].

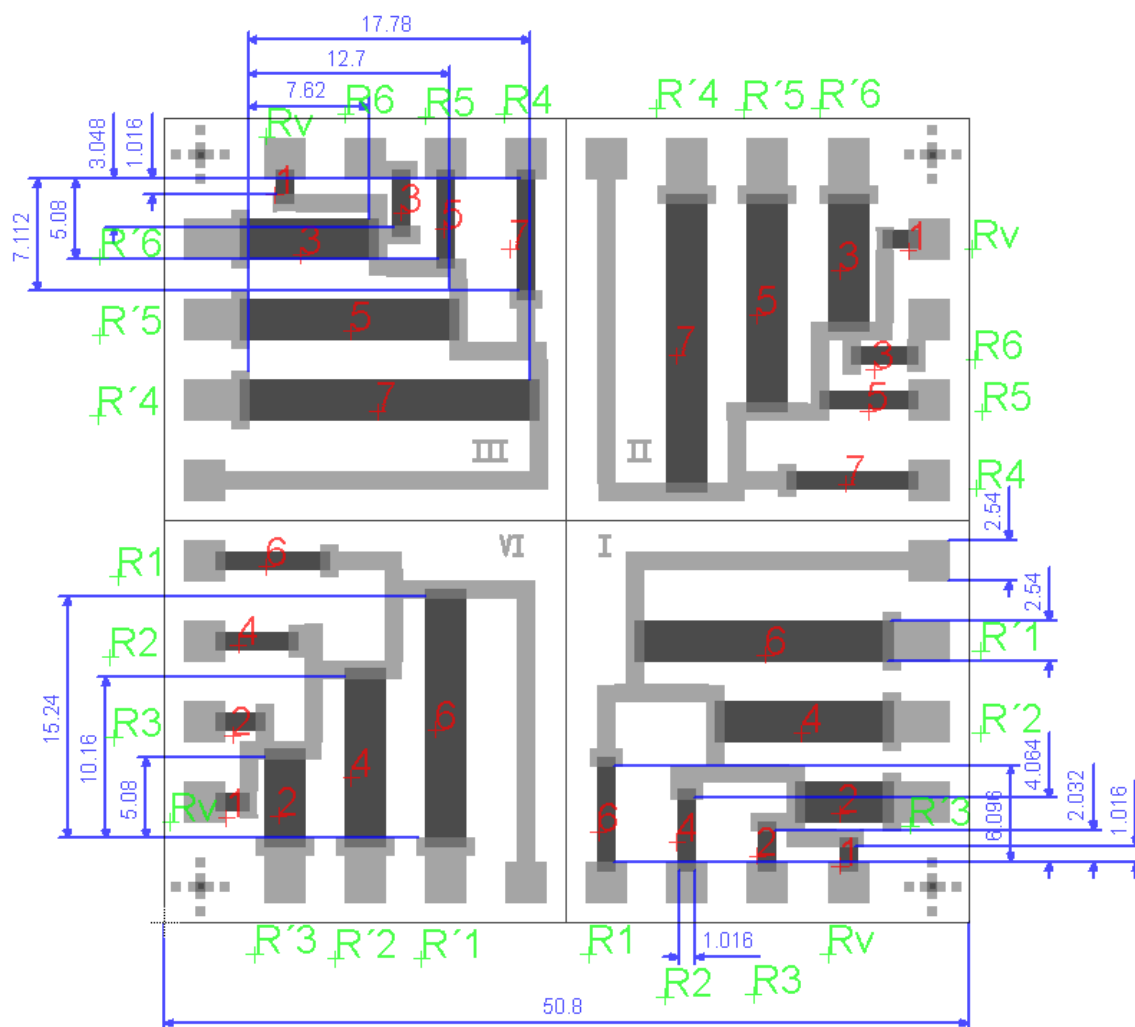


**Obr. 17** Soutiskové značky [2]

## 2.2 Návrh obvodu



**Obr. 18** Návrh vodivé a odporové vrstvy



**Obr. 19** Návrh odporového monitoru

Odporový monitor je navržen na substrátu, který výrobce dodává v rozměrech 50,8 x 50,8 mm. Celý obvod je tedy navržen a okótován v této jednotce. Obvod je rozdělen do čtyř sekcí (každá je pootočená o 90°), abychom po natisknutí past a vypálení mohli vyhodnotit kvalitu tisku v závislosti na orientaci vůči směru tisku. Sekce I a IV jsou identické (jen pootočené), stejně jako sekce II a III. Na jednom keramickém substrátu jsou tedy dva identické obvody. Rozměry jednotlivých odporů jsou navrhnutы tak, aby při použití jedné odporové pasty byly hodnoty R stejné jako hodnoty R'. Rozměr odporu Rv je jeden čtverec a při měření by měl tedy přímo odpovídat hodnotě použité odporové pasty. Červeně jsou vyznačeny počty čtverců, z kolika je každý rezistor sestaven. Pro sesouhlasení jednotlivých vrstev při tisku, jsou v rozích umístěny soutiskové značky. V příloze bakalářské práce jsou vloženy motivy vodivé a odporové vrstvy, které jsou určeny pro vytvoření motivu na síto.

## 3 Realizace odporového monitoru

Realizace odporového monitoru byla provedena v laboratoři VUT Brno ústavu mikroelektroniky. Bylo zhotoveno 18ks monitorů na korundové keramice  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a na každých šest monitorů byla použita jiná odporová pasta. Tímto způsobem vzniklo 12 obvodů s jedním druhem odporové pasty, protože jeden keramický substrát obsahuje dva identické obvody.

### 3.1 Zhotovení předloh na síta

Pro realizaci odporového monitoru bylo potřeba vytvořit jednotlivé předlohy na síta. Síto z nerezových vláken je napnuto v hliníkovém rámu a pro jejich ovrstvení pomocí kapilárního filmu pro sítotisk je potřeba dodržet tento postup:

#### a) Příprava síta

Před nanesením samotného fotocitlivého filmu na síto je potřeba síto zbavit nečistot a mastnoty. Pro čištění použijeme líh a nanese ho štětečkem na obě strany síta. Líh necháme působit min. 30s a opláchneme tekoucí vodou.

Po očištění lihem nanese štětečkem na obě strany síta také přípravek, který zlepšuje smáčivost povrchu síta. Necháme působit 90s a opět opláchneme vodou.

#### b) Nanesení fotocitlivého filmu

V následující fázi vyhotovení síta musíme pracovat v temné komoře, protože budeme pracovat s fotocitlivým filmem.

Před nanesením filmu ponoříme síto do nádoby s vodou. Síto musí být ponořené pod hladinou vody. Poté pomalu vytahujeme síto tak, aby voda zůstala mezi oky síta. Dále necháme síto minimálně 30s okapat.

Fotocitlivý film ořízneme na velikost síta a přiložíme tmavou stranou na okapané síto. Následně pomocí válečku film navalíme do síta.

#### c) Sušení síta s naneseným filmem

Síto s filmem sušíme malým proudem studeného vzduchu až do úplného vysušení. Nyní je možné sloupnout krycí folii z naneseného filmu.

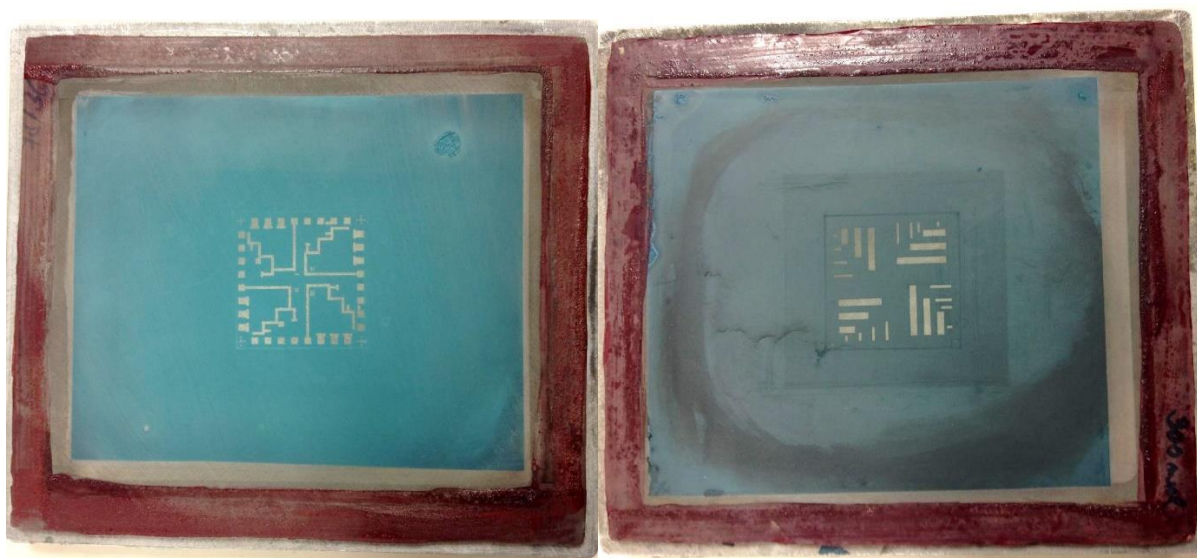
#### d) Osvit síta

Osvit síta byl proveden na přípravku se zdrojem ultrafialového světla. Na skleněnou pracovní plochu umístíme předlohu a síto s aplikovaným filmem. Do rámečku síta přiložíme tkanici od ústí vývěvy. Přiklopíme a na čelní straně zajistíme horní víko. Zapneme vývěvu a aktivujeme UV lampu. Po náběhu lampy (30s) otevřeme clony a osvítíme síto s naneseným filmem. Doba osvitu je 30s. Tímto způsobem dochází k vytvrzení osvětlených částí naneseného fotocitlivého filmu.

#### e) Vyvolání motivu

Osvětlený motiv vyvoláme jemným proudem vody, který odplaví neosvětlené části fotocitlivého filmu.

Po procesu ovrstvení a vysušení, můžeme takto připravená síta umístit do sítotiskového stroje. Tímto způsobem vznikla síta zobrazená na obr. 20.



**Obr. 20** Zhotovené předlohy na sítích

### **3.2 Sítotisk**

Sítotisk byl proveden na sítotiskovém poloautomatu AUREL MOD C880 (obr. 21). Po upevnění rámu se sítím do poloautomatu, bylo potřeba nastavit parametry, které ovlivňují kvalitu tisku na substrát. Jsou to zejména tyto parametry:

- přítlak stěrky
- úhel stěrky
- odtrh
- poloha síta vůči keramickému substrátu





**Obr. 21** Sítotiskový poloautomat AUREL C880 [13]

Pro správnou kombinaci nastavení těchto parametrů bylo zhotoveno několik zkušebních obvodů. Substrát je vložen na posuvný stolek, který je opatřen dorazy, které zajišťují stejnou polohu všech substrátů vůči sítu. Po posunutí stolku se aktivuje vakuum, které udržuje substrát při tisku ve stejné poloze. Po nalezení vhodné kombinace parametrů a dosažení požadované kvality tisku, došlo k tisku vodivé pasty na všechny připravené substráty.

Po sušení a vypálení vodivé vrstvy na substrátech mohl začít tisk odporových vrstev. Před tiskem odporové pasty je potřeba důkladně očistit stěrku, aby nemohlo dojít ke kontaminaci odporové pasty. Po výměně síta je velice důležité sesouhlasit polohu síta a substrátu s vodivou vrstvou. K tomuto účelu nám slouží soutiskové značky. Pro prvních šest substrátů byla použita odporová pasta s hodnotou  $1 \text{ k}\Omega/\square$ , pro dalších šest  $10 \text{ k}\Omega/\square$  a posledních šest  $1 \text{ M}\Omega/\square$ . Před použitím jiné odporové pasty muselo dojít opět k důkladnému vyčištění stěrky a nyní i k důkladnému vyčištění síta.

### **3.2.1 Použité pasty**

Před použitím každé pasty je nutné nádobu s pastou důkladně promíchat. Promícháním pasty dochází k poklesu její viskozity a ke zlepšení jejích tixotropních vlastností. Tím můžeme dosáhnout lepších tiskových vlastností (např. ostrost natisknutých rezistorů, jejich rozměrová stálost nebo rovinnost).



### **Vodivá pasta:**

- stříbrná pasta CSP-1381
  - zasušení 10 až 15min při 150 až 180°C
  - vypálení 10 až 15min při 800 až 850°C
  - obsah pevných částic: 83±2%
  - viskozita: 200±20 Pa·s
  - váha: 3,8±0,2 g/cc

### **Odporové pasty:**

- Tesla TT 506I
  - vrstvý odpor: 1 MΩ/□
  - TCR = -150/-100 ppm/°C
  - hmotnost 50g/87g
- ESL Europe Typ 2714 Lot No: K535-59
  - vrstvý odpor: 10kΩ/□
  - hmotnost: 25g
  - TCR = -16 ppm/°C (25 až 125°C)  
-83 ppm/°C (25 až -55°C)
- ESL Europe Typ 2713 Lot No: K535-73
  - vrstvý odpor: 1kΩ/□
  - hmotnost: 25g
  - TCR = 93 ppm/°C (25 až 125°C)  
52 ppm/°C (25 až -55°C)

### **3.2.2 Optická kontrola natisknutých obvodů**

Po každém jednotlivém tisku bylo potřeba zkontrolovat natisknutou vrstvu. Při této kontrole je nutné hlídat:

- rovnoměrně nanesená vrstva pasty
- dodržení rozměrů natisknutých obrazců
- správné sesouhlasení tisku (přesná poloha a natočení vůči sítu)

Při tisku vodivé vrstvy na substráty bylo zjištěno nerovnoměrné natisknutí obrazce, ale to se podařilo odstranit nastavením sklonu stěrky a odtrhu již při tisku zkušebních obvodů. Po tomto nastavení u vodivé vrstvy už nebyla zjištěna žádná vada.

Při tisku odporových past bylo důležité sledovat správný soutisk s vodivou vrstvou. První nastavení sesouhlasení s vodivou vrstvou bylo provedeno vůči čistému sítu s motivem

pro odporovou pastu. Po tisku prvního obvodu byla odporová vrstva mírně posunuta a pootočena. Ke zmenšení této odchylky bylo nutné zpřesnit soutisk jemným nastavením posuvného stolku a k úplnému sesouhlasení došlo až na obvodu, který byl tisknut jako čtvrtý v pořadí. K narušení funkčnosti obvodu však nedošlo, protože všechny natisknuté rezistory dostatečně dosedaly na plošky vodivé vrstvy.

Po natisknutí odporové pasty bylo také zjištěno, že povrch rezistorů vykazuje určitou nerovnost. Tato nerovnost je způsobena pomalým slinováním odporové pasty, která je stěrkou protlačena přes síto na substrát. Před tepelným zpracováním obvodů bylo tedy nutné dodržet min. 15 min. prodlevu, aby nerovnost zmizela. Tato prodleva je nazývána leveling a je nezbytnou součástí technologického procesu výroby tlustovrstvých obvodů.

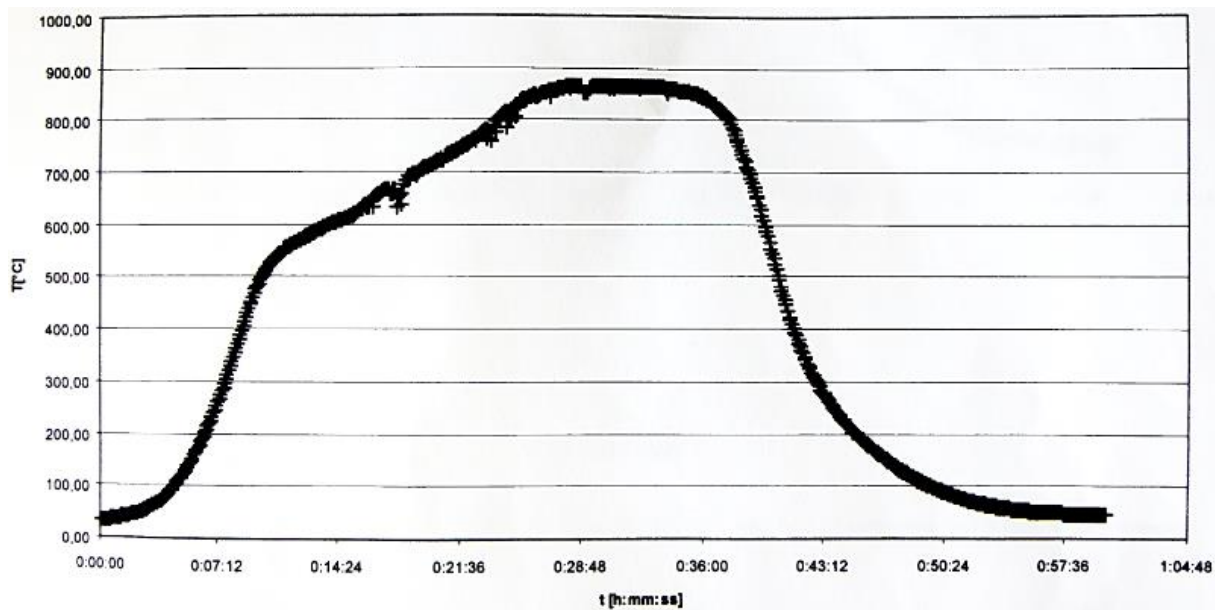
### 3.3 Výpal

Před samotným výpalem se odporové monitory vloží do pece, kde dochází k prvotnímu tepelnému zpracování obvodů při teplotě 150°C po dobu 15 minut. Zde se také odpařují těkavá organická ředidla z nanesené pasty.

Následující operace je samotný výpal odporových monitorů podle teplotního profilu, který je zobrazen na obr. 23. Výpal byl proveden v průběžné peci BTU TFF51 (obr. 22), která je vybavena regulovatelnými zónami a vypalovací profil se zde zadává pomocí řídicího PC.



**Obr. 22** Přetavovací pec BTU [13]

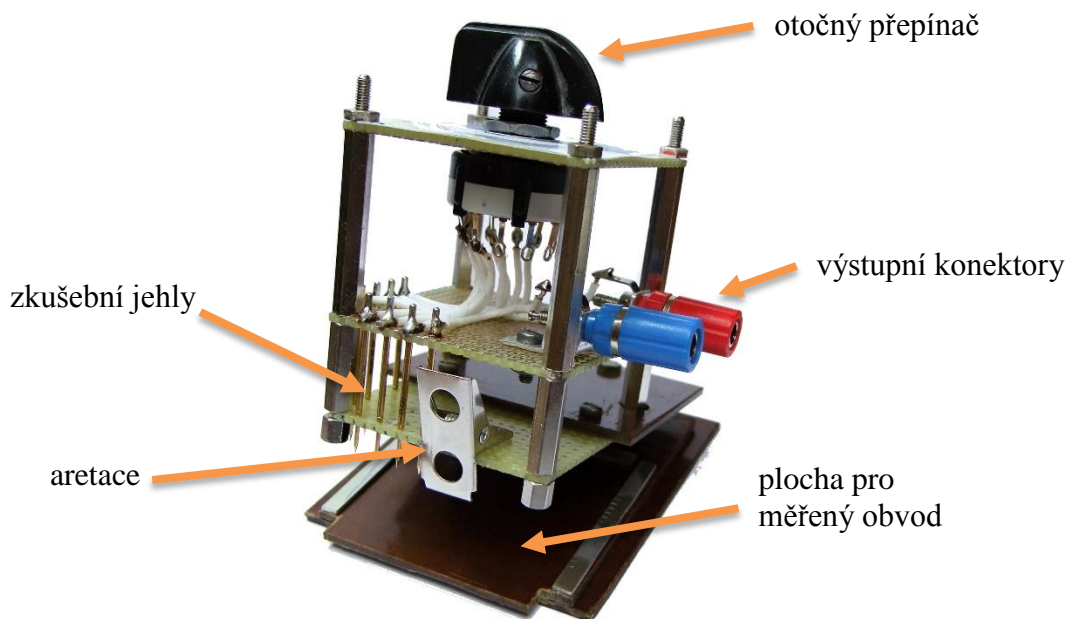


**Obr. 23** Vypalovací profil

Z uvedeného profilu vidíme, že začátek profilu je charakteristický rychlým nárůstem teploty, kde je dosaženo teploty 500°C během 10 minut. Dále už teplota roste pozvolněji a dochází zde k vyhoření filmtvorného materiálu a k odpaření zbytků rozpouštědel. Po dosažení teploty 850°C se růst teploty zastaví a udržuje se po dobu 10 minut na konstantní hodnotě. Zde dochází k samotnému výpalu, kde se slinují funkční složky pasty a vytvářejí se slitiny. Pasty zde dosáhne požadovaných vlastností. Dále dochází k ochlazení až na teplotu okolí. Celý proces tepelného zpracování v průběžné peci trvá 60 minut.

## 4 Zhotovení měřícího přípravku

Pro zjednodušení měření hodnot všech vytvořených rezistorů, byl navrhnut a vytvořen jednoduchý měřící přípravek. Mezi základní požadavky na tento přípravek patří jednoduchost a rychlost měření a také malý odpor měřícího obvodu, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků při měření. Zhotovený přípravek je na obr. 20.



**Obr. 24** Části měřícího přípravku

Použité zkušební jehly jsou vyrobeny z beryliového bronzu s nikl-zlatou povrchovou úpravou. Zkušební jehla se skládá ze dvou částí: hrotu a dutinky. V dutince je vložena pružinka a tím je umožněno stlačení hrotu při dotyku s měřeným kontaktem. To zaručuje dokonalý kontakt. Výrobce udává maximální odpor kontaktu  $2,5 \text{ m}\Omega$ .

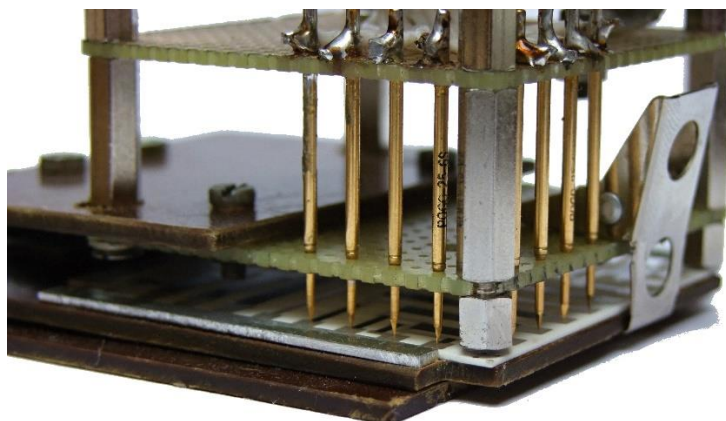
Měřící přípravek je opatřen otočným přepínačem, který umožňuje přepínat mezi sedmi kontakty (jedna sekce odporového monitoru). Max. odpor výrobce udává  $50 \text{ m}\Omega$ .

Další součástí přípravku jsou výstupní konektory, které slouží pro připojení měřícího přístroje. Zde výrobce udává max. odpor  $3 \text{ m}\Omega$ .

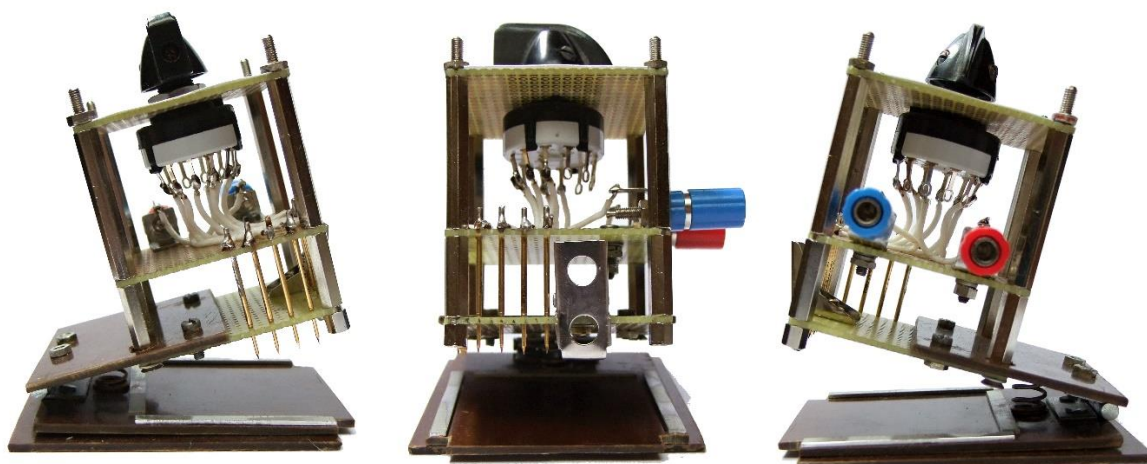
Při měření představuje přípravek nežádoucí odpor v sérii s měřeným tlustovrstvým rezistorem. Celkový elektrický odpor přípravku je tedy max.  $61 \text{ m}\Omega$ . Tato hodnota je vzhledem k měřeným rezistorům zanedbatelná a nebude ovlivňovat výsledek měření.

## 4.1 Použití měřícího přípravku

1. Měřený odporový monitor vložíme do určeného místa tak, aby měřená sekce byla pod zkušebními jehlami. Vodící lišty zaručí správné umístění pod jehlami.
2. V zadní části umístěný pant nám umožní sklopení vrchní části přípravku a zkušební jehly tak dosednou na vytvořené měřicí plošky na monitoru. Pomocí aretačního mechanismu uzamkneme přípravek v této poloze.
3. Nyní provedeme měření sekce odporového monitoru pomocí otočného přepínače.
4. Po ukončení měření uvolníme odporový monitor a otočíme ho pro měření další sekce.



Obr. 25 Detail při měření odporového monitoru



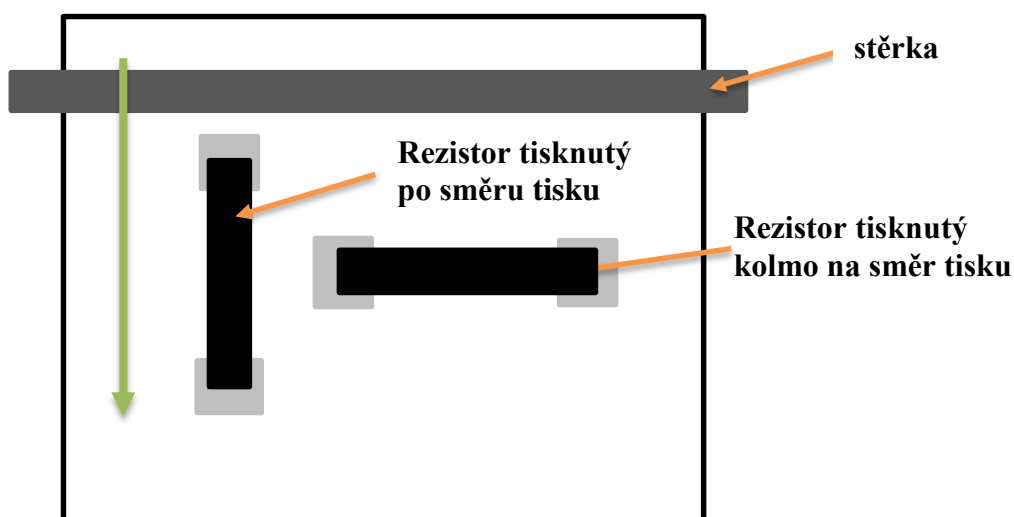
Obr. 26 Měřící přípravek

## 5 Měření hodnot rezistorů

Měření bylo provedeno za účelem vyhodnocení závislosti rozměrů vytvořených rezistorů na jejich elektrickém odporu a také k porovnání jejich navrhnutých hodnot s hodnotami změřených na obvodech. Rezistory jsou navrženy v různých délkách a ve dvou šířkách a vyhodnocení bude zaměřeno právě na tyto uvedené parametry.

Všechny rezistory byly nejdříve proměřeny a jejich hodnoty byly zapsány do tabulek, které jsou uvedeny v příloze. V této kapitole jsou uvedeny hodnoty, které byly vytvořeny jako průměrná hodnota rezistorů na odporovém monitoru pro jednu odporovou pastu.

Jednotlivé hodnoty rezistorů jsou uvedeny v tabulce, kde jsou seřazeny podle jejich navrhnuté hodnoty. Tabulka je rozdělena na dvě části, na sekci I a II a sekci III a IV, kde sekce I, II jsou oproti III, IV pootočené o 90°. Srovnáním potom můžeme vyhodnotit vliv směru tisku na hodnotu rezistoru. V tabulce jsou žlutě zvýrazněny hodnoty rezistorů, které jsou tisknuty po směru pohybu stěrky při tisku.



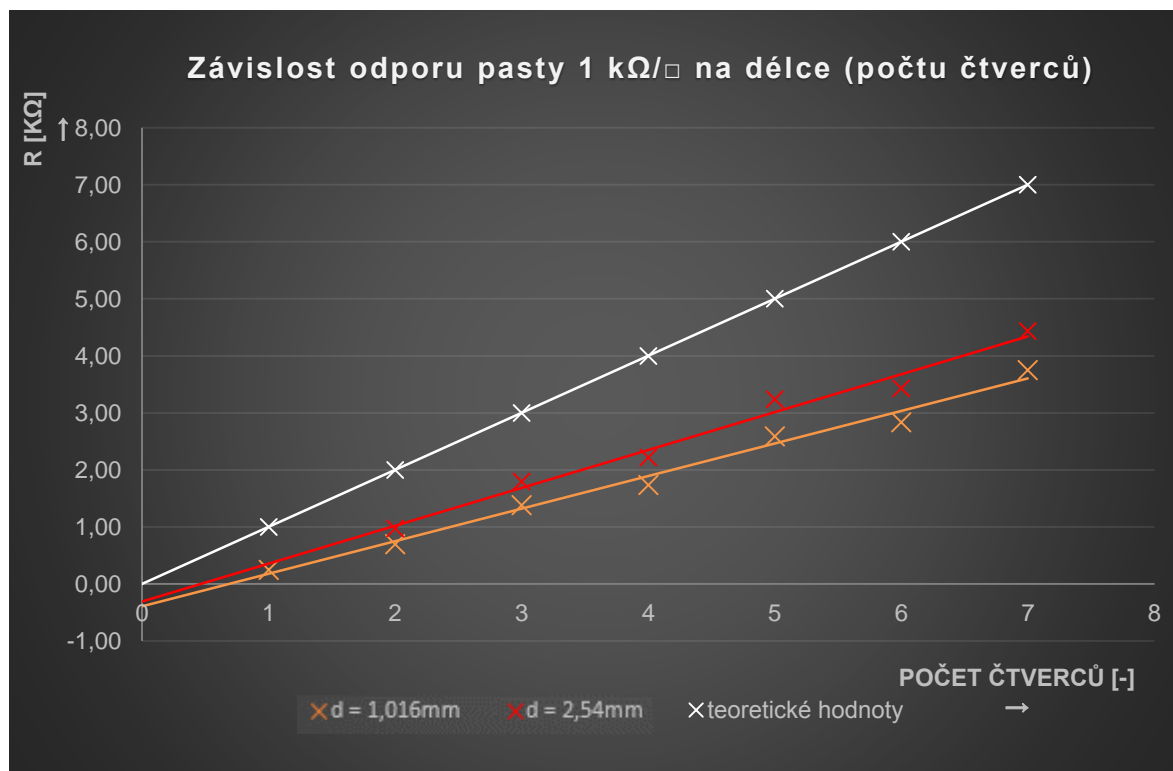
Obr. 27 Znáznornění směru tisku

V tabulce jsou dále uvedené procentuálně vyjádřené odchylky hodnot od hodnot navrhnutých. Ve spodní části tabulky jsou také uvedeny průměrné hodnoty odchylek všech rezistorů, které jsou dále rozděleny na rezistory tisknuté po směru a kolmo na směr tisku a na rezistory s šířkou  $d = 1,016\text{mm}$  a  $d = 2,54\text{mm}$ .

## 5.1 Odporová pasta 1 kΩ/□

Průměr hodnot pro pastu 1 kΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[kΩ]	[kΩ]	[%]	[kΩ]	[%]
Rv	1	0,22	77,92	0,25	75,22
R'v	1	0,28	72,33	0,25	74,98
R3	2	0,68	65,93	0,71	64,45
R'3	2	0,97	51,51	0,97	51,26
R6	3	1,40	53,27	1,36	54,61
R'6	3	1,79	40,19	1,80	39,98
R2	4	1,69	57,69	1,78	55,49
R'2	4	2,24	44,04	2,20	45,00
R5	5	2,59	48,20	2,59	48,20
R'5	5	3,25	35,07	3,23	35,43
R1	6	2,78	53,61	2,89	51,81
R'1	6	3,47	42,17	3,39	43,47
R4	7	3,69	47,31	3,81	45,55
R'4	7	4,50	35,74	4,38	37,50
rezistory d = 1,016mm tisknuté po směru pohybu stěrky					59,81
rezistory d = 2,54mm tisknuté po směru pohybu stěrky					41,79
rezistory d = 1,016mm tisknuté kolmo na směr pohybu stěrky					56,53
rezistory d = 2,54mm tisknuté kolmo na směr pohybu stěrky					41,77

Tab. 5 Průměrné hodnoty pro pastu 1kΩ/□



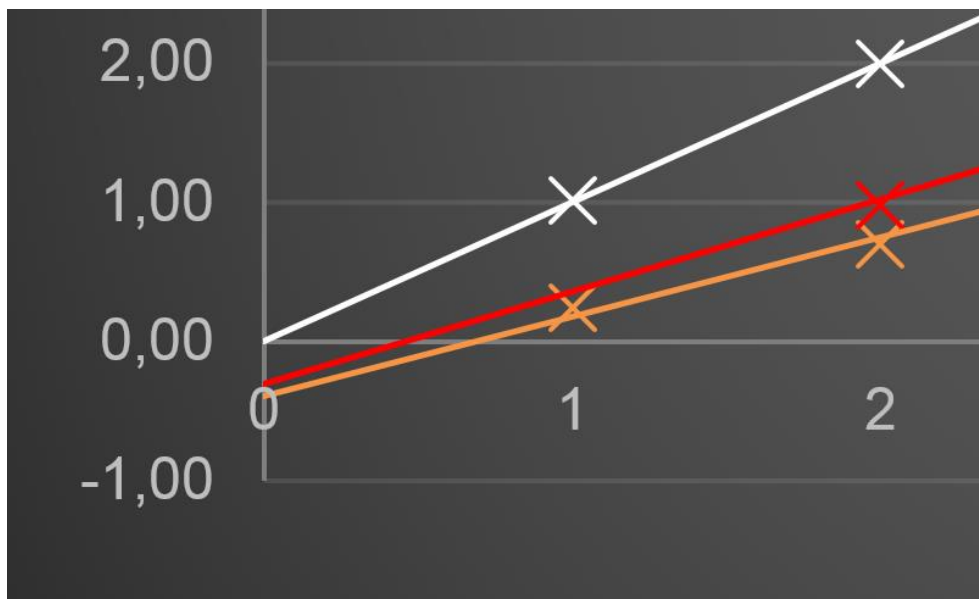
Obr. 28 Závislost pasty 1kΩ/□ na délce



Ze závislosti odporu pasty  $1\text{k}\Omega/\square$  na délce vidíme (obr. 25), že veškeré hodnoty jsou menší, než hodnoty teoretické. Při použití v reálném obvodu, nám tato vlastnost umožňuje rezistory dostavit na jejich požadovanou hodnotu. Natisknutým rezistorům můžeme jejich odpor pouze zvyšovat, protože při dostavování odebíráme malé plošky rezistoru, což má za následek zmenšení rozměru  $W$  v rovnici pro výpočet vrstevového odporu (1) a tím zvýšení odporu rezistoru.

Natisknuté rezistory s šířkou  $d = 2,54\text{mm}$  mají menší odchylku od teoretických hodnot, než rezistory s šířkou  $d = 1,016\text{mm}$ . Z grafu je také patrné, že při minimální reálné délce rezistory vykazují nulový odpor (detail je uveden na obr. 26). Tento jev je způsoben difúzí částic vodivé pasty do pasty odporové. Tím dochází ke zmenšení reálné hodnoty odporu rezistoru, protože je zkrácena jeho délka. Z tabulky hodnot potom vidíme, že vliv difúze se zmenšuje s růstem délky natisknutých rezistorů. Tento jev nám také vysvětluje, proč rezistory s větší šířkou mají menší odchylku od teoretické hodnoty. Je to způsobeno jejich geometrickými rozměry, protože pro dodržení stejné hodnoty elektrického odporu, musí být odpory s větší šířkou delší, než rezistory s menší šířkou. Musí být dodržen poměr  $\frac{L}{W}$ , který je obsažen v rovnici (1) uvedené v teoretické části, a proto je vliv difúze menší u širších rezistorů.

Porovnáme-li vliv směru tisku na hodnoty rezistorů, z tab. 5 vidíme, že odchylky jsou mezi rezistory minimální a můžeme je zanedbat. Rozhodující je zde vliv jejich geometrických rozměrů.



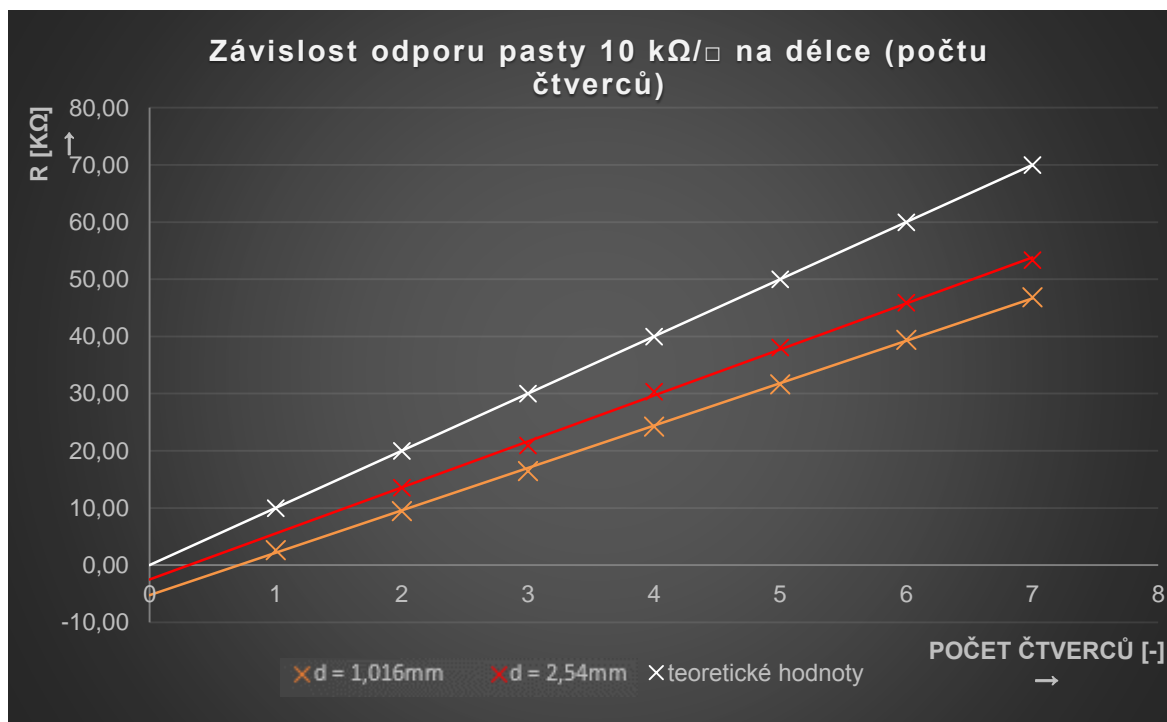
**Obr. 29** Difúze vodivých částic do odporové pasty  $1\text{k}\Omega/\square$



## 5.2 Odporová pasta 10 kΩ/□

Průměr hodnot pro pastu 10 kΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[kΩ]	[kΩ]	[%]	[kΩ]	[%]
Rv	10	2,55	74,48	3,01	69,92
Rv	10	2,68	73,17	2,43	75,72
R3	20	9,21	53,93	9,72	51,41
R3	20	13,65	31,73	13,45	32,73
R6	30	16,96	43,47	16,02	46,59
R6	30	21,17	29,44	20,75	30,83
R2	40	24,48	38,79	24,07	39,83
R2	40	30,62	23,46	30,12	24,71
R5	50	32,50	35,00	30,85	38,30
R5	50	38,68	22,63	37,47	25,07
R1	60	39,82	33,64	39,08	34,86
R1	60	46,18	23,03	45,65	23,92
R4	70	47,35	32,36	46,40	33,71
R4	70	54,33	22,38	52,38	25,17
rezistory d = 1,016mm tisknuté po směru pohybu stěrky					49,40
rezistory d = 2,54mm tisknuté po směru pohybu stěrky					25,97
rezistory d = 1,016mm tisknuté kolmo na směr pohybu stěrky					43,84
rezistory d = 2,54mm tisknuté kolmo na směr pohybu stěrky					26,55

Tab. 6 Průměrné hodnoty pro pastu 10kΩ/□

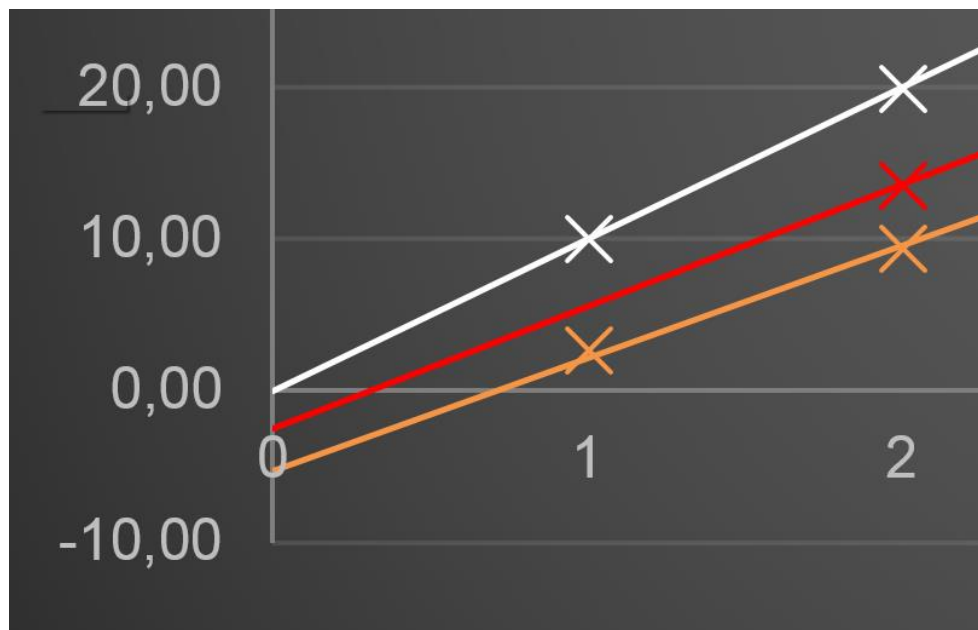


Obr. 30 Závislost pasty 10kΩ/□ na délce

Závislost odporové pasty  $10\text{k}\Omega/\square$  zobrazené na obr. 27 je velice podobná průběhu závislosti předešlé odporové pasty. Srovnáme-li ale hodnoty odchylek této pasty s předešlou, tak tato pasta vykazuje menší odchylky reálných hodnot od teoretických. Naměřené hodnoty jsou menší než teoretické a také nám tedy umožňují případné dostavení hodnot trimováním.

Natisknuté rezistory s šířkou  $d = 2,54\text{mm}$  mají také menší odchylky než s šířkou  $d = 1,016\text{mm}$  jako u předešlého obvodu a je to také způsobeno díky difúzi vodivých částic do odporové pasty (obr 28). Velikost odchylek reálných hodnot od teoretických tedy také klesají s rostoucí délkou rezistoru.

Vliv směru tisku na hodnoty rezistorů je zanedbatelný, rozhodující je tedy vliv geometrických rozměrů rezistorů.

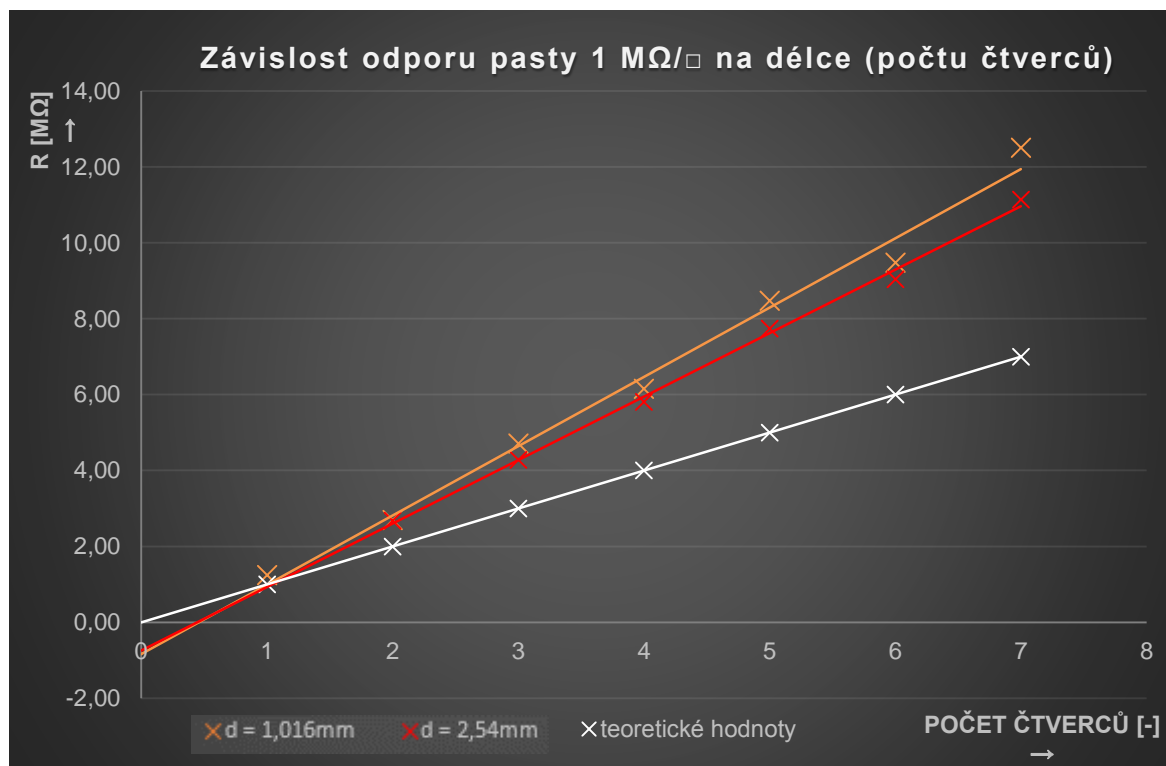


**Obr. 31** Difúze vodivých částic do odporové pasty  $10\text{k}\Omega/\square$

### 5.3 Odporová pasta 1 MΩ/□

Průměr hodnot pro pastu 1 MΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[MΩ]	[MΩ]	[%]	[MΩ]	[%]
Rv	1	1,43	42,57	0,98	2,28
Rv	1	1,35	35,42	1,22	21,82
R3	2	3,33	66,28	2,07	3,67
R3	2	2,93	46,55	2,43	21,29
R6	3	5,02	67,25	4,41	46,99
R6	3	4,97	65,83	3,58	19,48
R2	4	7,47	86,75	4,84	20,90
R2	4	6,12	53,00	5,49	37,35
R5	5	8,91	78,11	8,04	60,85
R5	5	8,74	74,89	6,74	34,81
R1	6	11,00	83,33	7,96	32,63
R1	6	9,26	54,29	8,83	47,11
R4	7	12,15	73,50	12,86	83,74
R4	7	12,60	80,03	9,67	38,14
rezistory d = 1,016mm tisknuté po směru pohybu stěrky					61,54
rezistory d = 2,54mm tisknuté po směru pohybu stěrky					54,42
rezistory d = 1,016mm tisknuté kolmo na směr pohybu stěrky					39,76
rezistory d = 2,54mm tisknuté kolmo na směr pohybu stěrky					41,04

Tab. 7 Průměrné hodnoty pro pastu 1MΩ/□

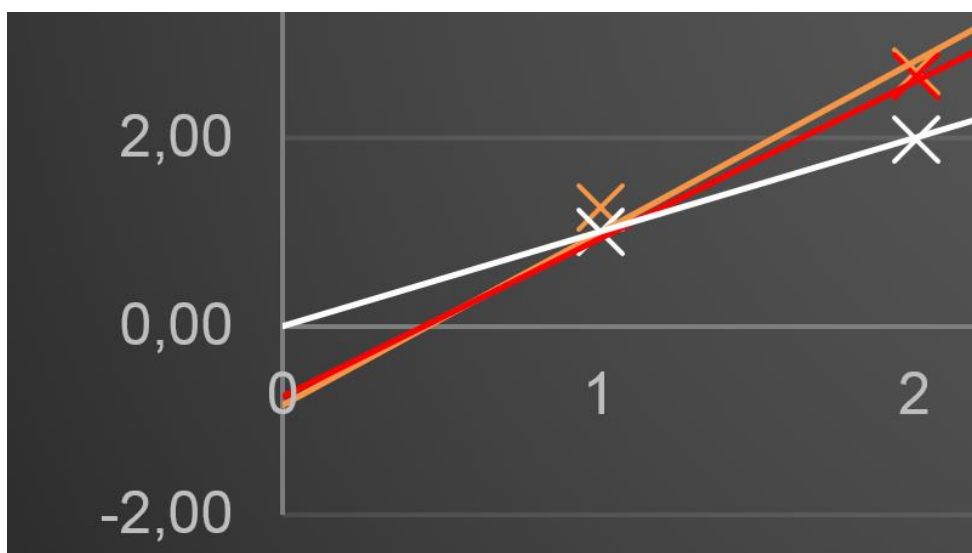


Obr. 32 Závislost pasty 1MΩ/□ na délce

Z tabulky naměřených hodnot a grafu závislosti odporové pasty  $1\text{M}\Omega/\square$  je patrné, že její hodnoty jsou odlišné od předešlých dvou past. Z grafu závislosti odporu na délce vidíme, že reálné hodnoty natisknutých past jsou větší než teoretické a není tedy možné použít dostavování hodnot.

Zde se také projevuje difúze vodivých částic do odporové pasty, ale na rozdíl od předešlých odporových past je u obou šířek rezistorů skoro stejná, jak můžeme vidět na detailu obrázku 30. S rostoucí délkou se vliv difúze opět zmenšuje, ale tím, že jsou reálné hodnoty větší než teoretické, tak díky jevu difúze jsou odchylky menší u rezistorů s kratší délkou.

Z tabulky hodnot dále vidíme, že rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky vykazují větší procento odchylky, než rezistory tisknuté proti směru. Příčinou tohoto těchto odchylek může být špatné nastavení parametrů sítotiskového stroje nebo také nedostatečné rozmíchání pasty před jejím použitím.



**Obr. 33** Difúze vodivých částic do odporové pasty  $1\text{M}\Omega/\square$

## 5.4 Statistické vyhodnocení

Pro statistické vyhodnocení naměřených hodnot rezistorů, jsou zde použity některé statistické nástroje, které nám lépe interpretují dosažené výsledky. Tyto výsledky jsou shrnuty v následujících tabulkách č. 8, 9 a 10. V tabulkách jsou zvlášť uvedeny výsledky pro rezistory s  $d = 1,016\text{mm}$  (R<sub>v</sub>, R1 až R6) a rezistory s  $d = 2,54\text{mm}$  (R'1 až R'6).

V tabulkách jsou použity tyto statistické nástroje:

### 5.4.1 Průměrná hodnota $\bar{x}$

Průměrná hodnota vyjadřuje typickou hodnotu popisující soubor dat a zároveň má tu vlastnost, že součet odchylek naměřených hodnot od průměru je roven nule.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (11)$$

Hodnota průměru může být ale silně ovlivněna jednou odlehlou hodnotou a proto může být hodnota průměru zavádějící. Proto se užívají i jiné nástroje, jako např. medián.

### 5.4.2 Medián $\tilde{x}$

Medián je hodnota, která je uprostřed, uspořádáme-li hodnoty podle jejich velikosti. Oproti průměru má medián výhodu, že není citlivý na odlehlé (extrémní) hodnoty.

### 5.4.3 Rozptyl $s^2$ a směrodatná odchylka $s$

Rozptyl a směrodatná odchylka nám charakterizují variabilitu naměřených hodnot. Udávají, jak jsou hodnoty rozloženy kolem průměru.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (12)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

Směrodatná odchylka vypovídá o tom, jak moc se od sebe navzájem liší typické případy v souboru zkoumaných čísel. Je-li malá, jsou si prvky souboru většinou navzájem podobné, a naopak velká směrodatná odchylka signalizuje velké vzájemné odlišnosti [14].

V tabulkách jsou také uvedeny hodnoty s maximální a minimální odchylkou od navrhnuté hodnoty a jejich procentuální vyjádření. Tyto hodnoty nám dávají informaci o rozpětí naměřených hodnot.

Statistické hodnoty pro pastu 1 k $\Omega$ /□										
	navrhnutá hodnota	průměrná hodnota	prům. odchylka	hodnota s max. odchylkou	max. odchylka	hodnota s min. odchylkou	min. odchylka	rozptyl	směrodatná odchylka	medián
	[k $\Omega$ ]	[k $\Omega$ ]	[%]	[k $\Omega$ ]	[%]	[k $\Omega$ ]	[%]	[k $\Omega$ ]	[k $\Omega$ ]	[k $\Omega$ ]
Rv	1	0,249	75,113	0,191	80,900	0,297	70,300	0,001	0,026	0,247
R3	2	0,696	65,188	0,586	70,700	0,751	62,450	0,002	0,044	0,718
R3	2	0,972	51,383	0,835	58,250	1,039	48,050	0,003	0,055	0,988
R6	3	1,382	53,939	1,175	60,833	1,501	49,967	0,008	0,090	1,406
R6	3	1,798	40,083	1,580	47,333	1,940	35,333	0,010	0,101	1,802
R2	4	1,736	56,592	1,500	62,500	1,860	53,500	0,010	0,098	1,746
R2	4	2,219	44,521	1,970	50,750	2,340	41,500	0,014	0,118	2,250
R5	5	2,590	48,200	2,230	55,400	2,790	44,200	0,027	0,163	2,645
R5	5	3,238	35,250	2,900	42,000	3,490	30,200	0,031	0,177	3,270
R1	6	2,838	52,708	2,500	58,333	3,010	49,833	0,020	0,143	2,870
R1	6	3,431	42,819	3,060	49,000	3,670	38,833	0,034	0,185	3,480
R4	7	3,750	46,429	3,170	54,714	4,090	41,571	0,064	0,252	3,825
R4	7	4,437	36,619	3,960	43,429	4,790	31,571	0,055	0,234	4,480

**Tab. 8** Statistické hodnoty pro pastu 1 k $\Omega$ /□

Statistické hodnoty pro pastu 10 k $\Omega$ /□										
	navrhnutá hodnota	průměrná hodnota	prům. odchylka	hodnota s max. odchylkou	max. odchylka	hodnota s min. odchylkou	min. odchylka	rozptyl	směrodatná odchylka	medián
	[k $\Omega$ ]	[k $\Omega$ ]	[%]	[k $\Omega$ ]	[%]	[k $\Omega$ ]	[%]	[k $\Omega$ ]	[k $\Omega$ ]	[k $\Omega$ ]
Rv	10	2,668	73,321	2,150	78,500	3,200	68,000	0,092	0,304	2,705
R3	20	9,466	52,671	8,510	57,450	10,140	49,300	0,216	0,465	9,595
R3	20	13,553	32,233	12,410	37,950	14,380	28,100	0,478	0,691	13,810
R6	30	16,490	45,033	14,850	50,500	17,930	40,233	0,911	0,954	16,580
R6	30	20,958	30,139	19,100	36,333	23,100	23,000	1,647	1,284	20,500
R2	40	24,275	39,313	22,500	43,750	26,300	34,250	1,145	1,070	24,400
R2	40	30,367	24,083	28,400	29,000	32,200	19,500	1,794	1,339	30,900
R5	50	31,675	36,650	29,100	41,800	34,700	30,600	2,859	1,691	31,850
R5	50	38,075	23,850	35,400	29,200	40,800	18,400	3,177	1,782	37,850
R1	60	39,450	34,250	36,500	39,167	41,700	30,500	2,634	1,623	39,200
R1	60	45,917	23,472	43,200	28,000	48,200	19,667	2,296	1,515	46,450
R4	70	46,875	33,036	42,800	38,857	50,500	27,857	5,310	2,304	46,300
R4	70	53,358	23,774	50,400	28,000	57,000	18,571	3,717	1,928	53,500

**Tab. 9** Statistické hodnoty pro pastu 10 k $\Omega$ /□

Statistické hodnoty pro pastu 1 M $\Omega$ /□										
	Navrhnutá hodnota	Prům. hodnota	Prům. odchylka	hodnota s max. odchylkou	max. odchylka	hodnota s min. odchylkou	min. odchylka	rozptyl	směrodatná odchylka	medián
	[M $\Omega$ ]	[M $\Omega$ ]	[%]	[M $\Omega$ ]	[%]	[M $\Omega$ ]	[%]	[M $\Omega$ ]	[M $\Omega$ ]	[M $\Omega$ ]
Rv	1	1,244	24,379	1,720	72,000	0,990	1,000	0,074	0,272	1,227
R3	2	2,700	34,975	3,750	87,500	1,970	1,500	0,500	0,707	2,415
R3	2	2,678	33,921	3,110	55,500	2,160	8,000	0,094	0,307	2,690
R6	3	4,714	57,119	5,360	78,667	3,430	14,333	0,266	0,516	4,754
R6	3	4,280	42,653	5,400	80,000	3,190	6,333	0,570	0,755	4,180
R2	4	6,153	53,823	10,910	172,750	4,350	8,750	3,034	1,742	5,835
R2	4	5,807	45,175	6,570	64,250	4,950	23,750	0,237	0,487	5,887
R5	5	8,474	69,480	9,360	87,200	6,780	35,600	0,501	0,708	8,495
R5	5	7,743	54,852	9,130	82,600	6,110	22,200	1,146	1,070	7,835
R1	6	9,479	57,982	13,980	133,000	6,990	16,500	3,546	1,883	9,840
R1	6	9,042	50,700	10,810	80,167	7,910	31,833	0,552	0,743	8,913
R4	7	12,503	78,618	15,770	125,286	11,010	57,286	1,231	1,109	12,256
R4	7	11,090	58,426	13,240	89,143	9,010	28,714	2,164	1,471	11,220

Tab. 10 Statistické hodnoty pro pastu 1 M $\Omega$ /□

## 6 Měření teplotního koeficientu TCR

Měření bylo provedeno na třech vybraných odporových monitorech. Každý odporový monitor je vyroben z jiné odporové pasty, aby bylo možné porovnat výslednou hodnotu TCR.

### 6.1 Postup měření

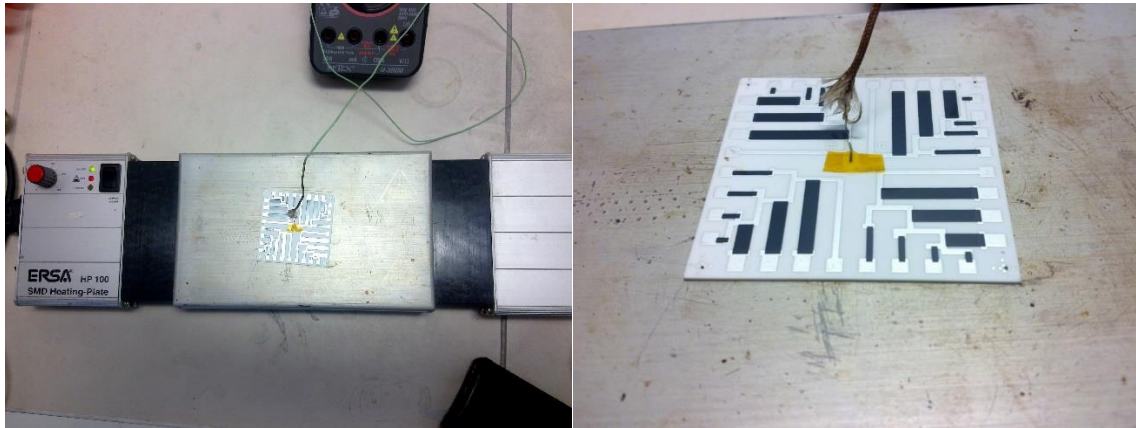
- 1) Odporový monitor byl umístěn na vyhřívanou destičku, na které můžeme regulovat teplotu.
- 2) Na odporový monitor byl umístěn měřicí termočlánek spojený s měřicím přístrojem.
- 3) Z odporového monitoru byly změřeny hodnoty jednotlivých rezistorů při teplotách v tomto pořadí: T = 25°C, 70°C, 100°C, 150°C, 200°C a 250°C. Před změřením každé hodnoty odporu bylo potřeba nechat rezistor ustálit na požadované teplotě a až poté odečíst z multimetru jeho hodnotu. Jednotlivé hodnoty byly zapsány do následujících tabulek.

#### 6.1.1 Použité přístroje

Vyhřívací destička ERSA HP 100

Ohm metr UNI-T UT33C

Teploměr METEX M-3860M

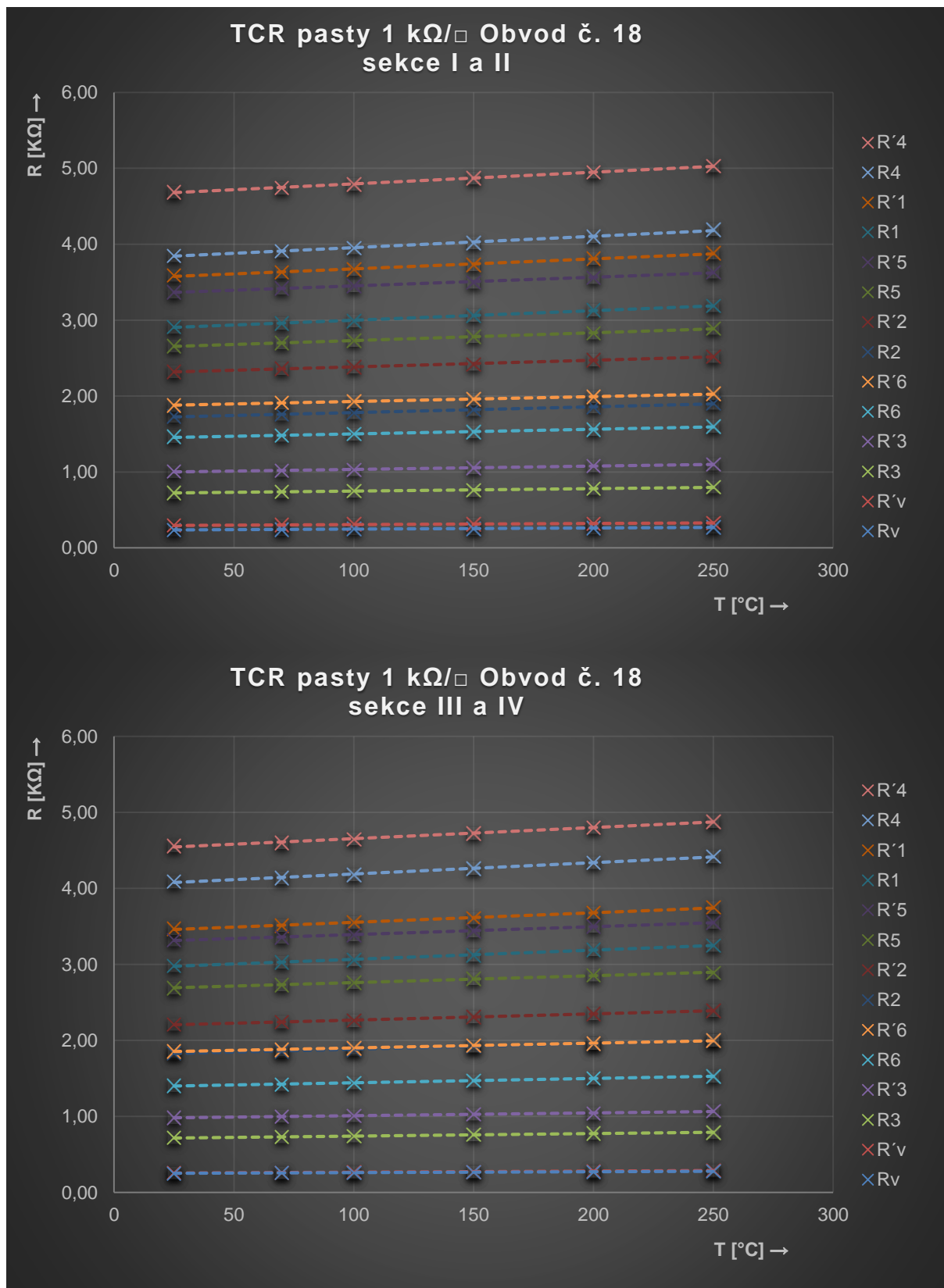


Obr. 34 Měření TCR

		Pasta 1 kΩ/□						Obvod č. 18	
		T = 25°C	T = 70°C	T = 100°C	T = 150°C	T = 200°C	T = 250°C	TCR (ΔT=250-25°C)	TCR (ΔT=150-25°C)
		sekce I a II						[ppm/°C]	[ppm/°C]
		[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]		
1	Rv	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	640,30	474,58
1	R'v	0,30	0,30	0,31	0,31	0,32	0,33	493,83	350,17
2	R3	0,72	0,74	0,75	0,76	0,78	0,80	473,34	409,41
2	R'3	1,01	1,02	1,03	1,05	1,08	1,10	415,29	349,90
3	R6	1,46	1,48	1,50	1,53	1,56	1,60	419,52	372,09
3	R'6	1,88	1,91	1,93	1,96	1,99	2,03	354,61	340,43
4	R2	1,73	1,76	1,78	1,82	1,86	1,90	439,56	421,05
4	R'2	2,32	2,36	2,38	2,42	2,47	2,52	383,14	344,83
5	R5	2,66	2,70	2,73	2,78	2,83	2,89	384,29	360,90
5	R'5	3,37	3,42	3,45	3,50	3,56	3,63	342,89	308,61
6	R1	2,91	2,96	2,99	3,06	3,13	3,19	427,64	412,37
6	R'1	3,59	3,63	3,67	3,73	3,81	3,88	359,02	311,98
7	R4	3,85	3,91	3,95	4,02	4,10	4,19	392,50	353,25
7	R'4	4,69	4,74	4,79	4,87	4,95	5,03	322,20	307,04
		sekce III a IV							
		[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[ppm/°C]	[ppm/°C]
1	Rv	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	533,33	640,00
1	R'v	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29	590,28	437,50
2	R3	0,72	0,73	0,74	0,76	0,78	0,79	438,88	456,19
2	R'3	0,98	1,00	1,01	1,03	1,04	1,07	398,28	391,04
3	R6	1,40	1,42	1,44	1,47	1,50	1,53	398,86	376,07
3	R'6	1,86	1,88	1,90	1,93	1,96	2,00	334,53	301,08
4	R2	1,83	1,86	1,88	1,92	1,96	2,00	412,87	393,44
4	R'2	2,21	2,24	2,26	2,31	2,35	2,39	361,99	361,99
5	R5	2,69	2,73	2,76	2,81	2,86	2,89	330,44	356,88
5	R'5	3,32	3,36	3,39	3,44	3,50	3,55	307,90	289,16
6	R1	2,98	3,03	3,06	3,12	3,19	3,25	402,68	375,84
6	R'1	3,47	3,51	3,55	3,61	3,68	3,75	358,63	322,77
7	R4	4,09	4,14	4,18	4,26	4,34	4,42	358,60	332,52
7	R'4	4,56	4,60	4,65	4,72	4,80	4,88	311,89	280,70

Tab. 11 Hodnoty pro pastu 1 kΩ/□

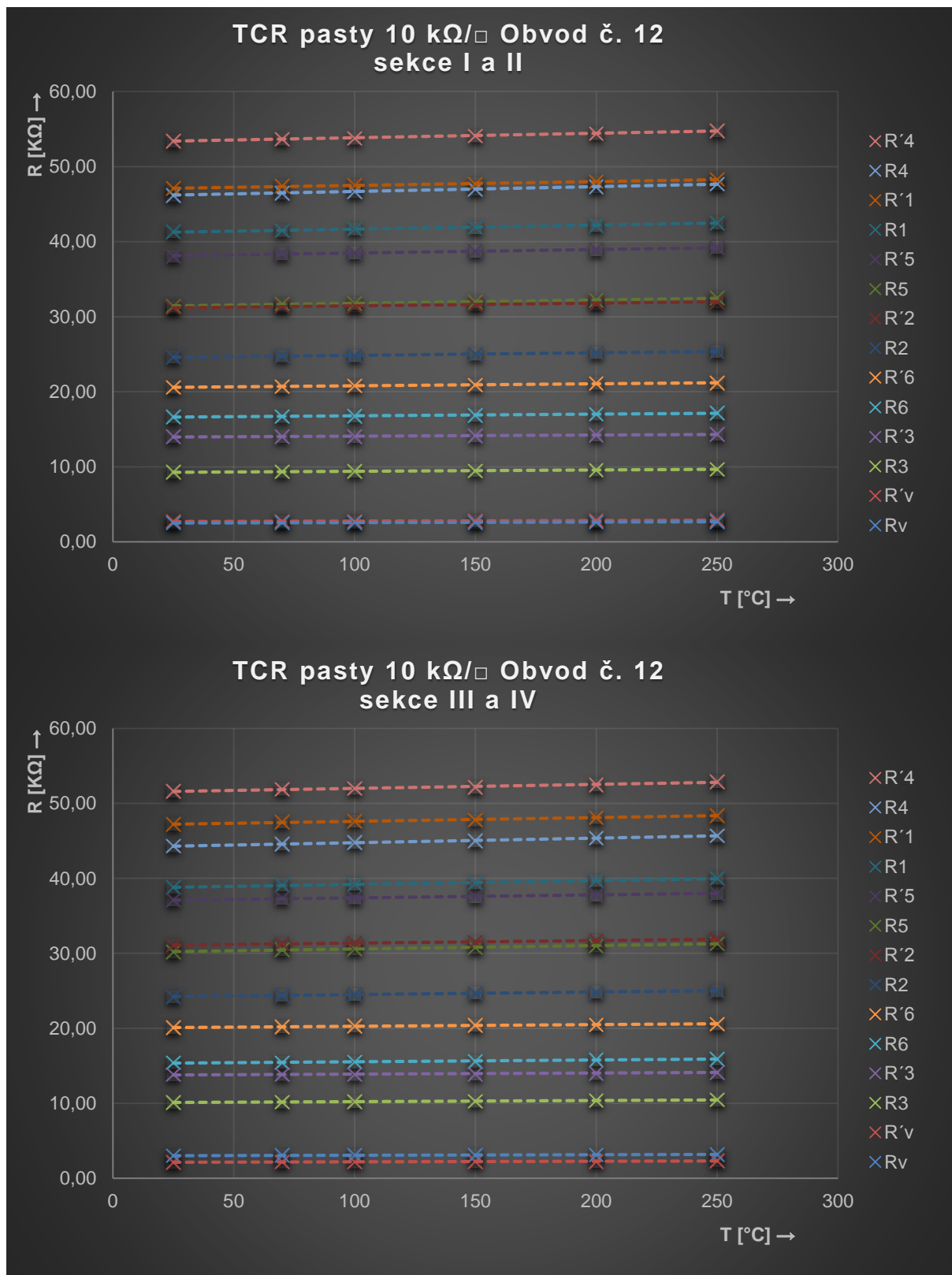




**Obr. 35** Závislost odporu na teplotě pasty 1 kΩ/□

Pasta 10 kΩ/□ Obvod č. 12									
		T = 25°C	T = 70°C	T = 100°C	T = 150°C	T = 200°C	T = 250°C	TCR (ΔT=250-25°C)	TCR (ΔT=150-25°C)
		sekce I a II							
		[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[ppm/°C]	[ppm/°C]
1	Rv	2,52	2,55	2,58	2,61	2,65	2,69	299,82	285,71
1	R'v	2,72	2,75	2,77	2,81	2,85	2,89	277,78	264,71
2	R3	9,30	9,35	9,39	9,48	9,58	9,67	176,82	154,84
2	R'3	14,03	14,04	14,07	14,15	14,25	14,35	101,37	68,42
3	R6	16,68	16,71	16,77	16,88	17,02	17,17	130,56	95,92
3	R'6	20,60	20,70	20,80	20,90	21,10	21,20	129,45	116,50
4	R2	24,60	24,80	24,80	25,00	25,20	25,40	144,53	130,08
4	R'2	31,20	31,40	31,40	31,60	31,80	32,00	113,96	102,56
5	R5	31,40	31,70	31,80	32,00	32,20	32,50	155,70	152,87
5	R'5	38,10	38,40	38,50	38,70	38,90	39,20	128,32	125,98
6	R1	41,30	41,50	41,70	41,90	42,20	42,50	129,14	116,22
6	R'1	47,10	47,40	47,50	47,70	48,00	48,30	113,23	101,91
7	R4	46,20	46,50	46,70	47,00	47,30	47,70	144,30	138,53
7	R'4	53,40	53,70	53,80	54,10	54,40	54,80	116,52	104,87
		sekce III a IV							
		[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[kΩ]	[ppm/°C]	[ppm/°C]
1	Rv	3,03	3,06	3,08	3,11	3,15	3,20	249,36	211,22
1	R'v	2,15	2,18	2,20	2,23	2,27	2,31	330,75	297,67
2	R3	10,14	10,17	10,21	10,28	10,37	10,47	144,64	110,45
2	R'3	13,83	13,85	13,88	13,95	14,04	14,13	96,41	69,41
3	R6	15,43	15,46	15,51	15,63	15,78	15,92	141,14	103,69
3	R'6	20,10	20,20	20,30	20,40	20,50	20,60	110,56	119,40
4	R2	24,20	24,40	24,50	24,70	24,80	25,00	146,92	165,29
4	R'2	31,10	31,30	31,40	31,50	31,70	31,90	114,33	102,89
5	R5	30,20	30,50	30,60	30,80	31,00	31,30	161,88	158,94
5	R'5	37,10	37,30	37,40	37,60	37,80	38,00	107,82	107,82
6	R1	38,80	39,10	39,20	39,40	39,70	40,00	137,46	123,71
6	R'1	47,20	47,50	47,60	47,80	48,10	48,40	112,99	101,69
7	R4	44,30	44,60	44,80	45,00	45,40	45,70	140,46	126,41
7	R'4	51,60	51,90	52,00	52,20	52,50	52,90	111,97	93,02

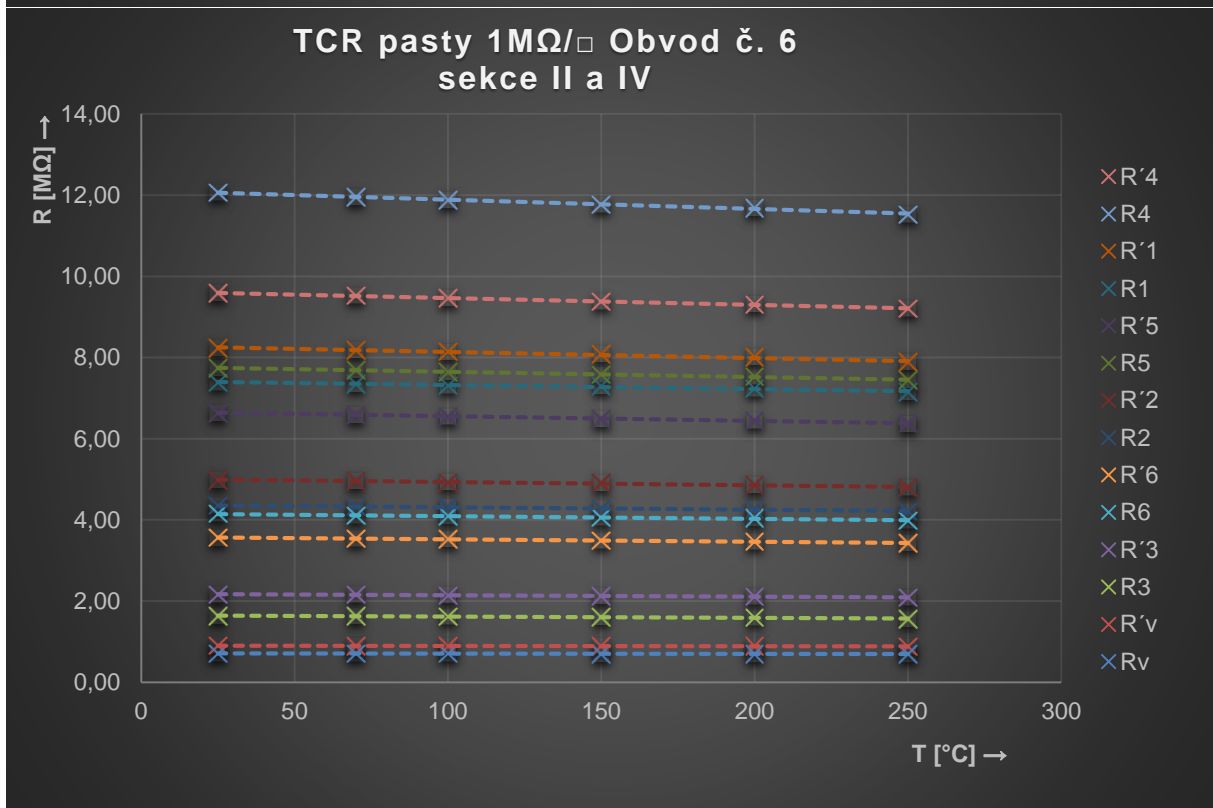
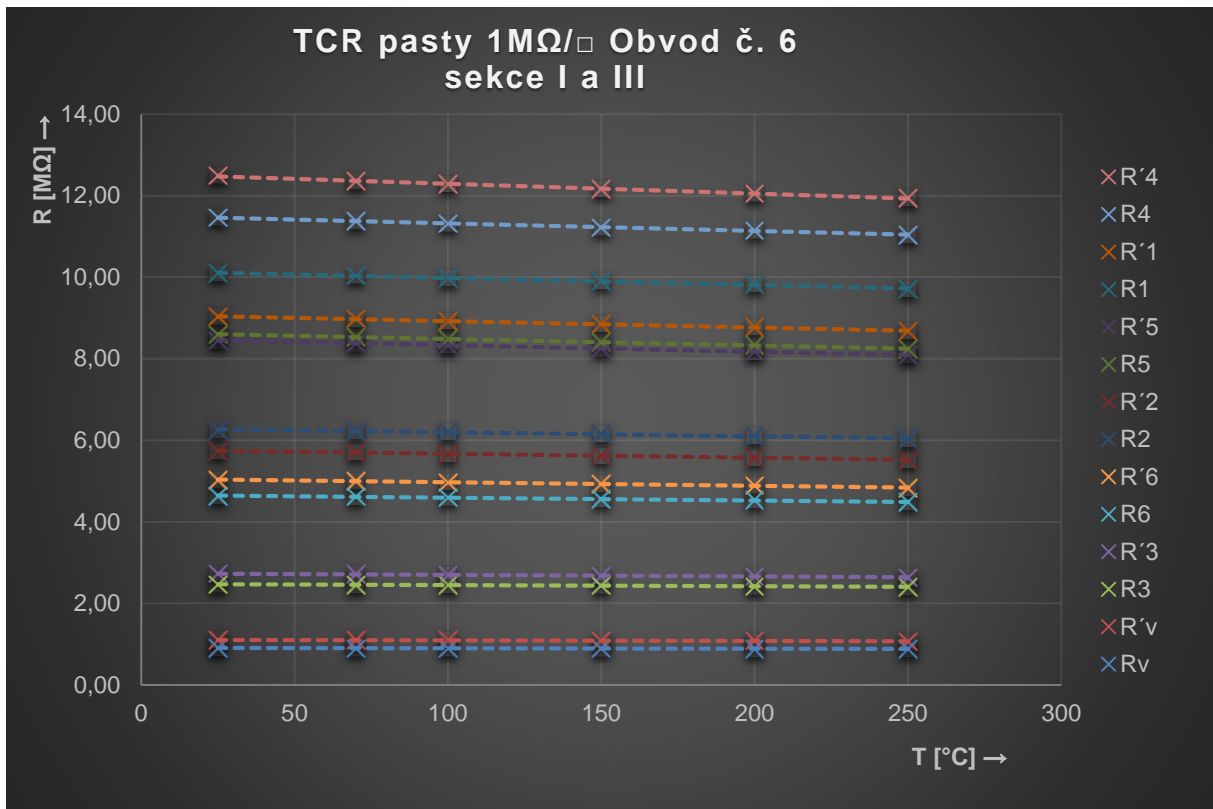
**Tab. 12** Hodnoty pro pastu 10 kΩ/□



**Obr. 36** Závislost odporu na teplotě pasty 10 kΩ/□

		Pasta 1 MΩ/□						Obvod č. 6	
		T = 25°C	T = 70°C	T = 100°C	T = 150°C	T = 200°C	T = 250°C	TCR (ΔT=250-25°C)	TCR (ΔT=150-25°C)
		sekce I a II							
		[MΩ]	[MΩ]	[MΩ]	[MΩ]	[MΩ]	[MΩ]	[ppm/°C]	[ppm/°C]
1	Rv	0,90	0,90	0,90	0,90	0,89	0,88	-108,40	-53,22
1	R'v	1,10	1,10	1,10	1,09	1,09	1,07	-136,88	-101,45
2	R3	2,47	2,46	2,45	2,44	2,42	2,40	-125,96	-97,17
2	R'3	2,73	2,72	2,70	2,68	2,66	2,64	-146,52	-146,52
3	R6	4,64	4,62	4,59	4,56	4,53	4,48	-153,26	-137,93
3	R'6	5,03	5,00	4,97	4,93	4,89	4,83	-176,72	-159,05
4	R2	6,26	6,23	6,20	6,15	6,11	6,04	-156,19	-140,58
4	R'2	5,74	5,71	5,67	5,62	5,57	5,52	-170,34	-167,25
5	R5	8,60	8,53	8,49	8,41	8,34	8,24	-186,05	-176,74
5	R'5	8,45	8,38	8,33	8,25	8,17	8,09	-189,35	-189,35
6	R1	10,10	10,04	9,98	9,90	9,83	9,71	-171,62	-158,42
6	R'1	9,04	8,98	8,92	8,85	8,78	8,68	-176,99	-168,14
7	R4	11,46	11,38	11,31	11,22	11,15	11,04	-162,89	-167,54
7	R'4	12,49	12,36	12,28	12,16	12,05	11,94	-195,71	-211,37
		sekce III a IV							
		[MΩ]	[MΩ]	[MΩ]	[MΩ]	[MΩ]	[MΩ]	[ppm/°C]	[ppm/°C]
1	Rv	0,71	0,71	0,71	0,70	0,70	0,69	-112,99	-90,40
1	R'v	0,90	0,90	0,89	0,89	0,89	0,88	-103,59	-97,67
2	R3	1,63	1,63	1,62	1,61	1,60	1,56	-190,87	-98,16
2	R'3	2,16	2,16	2,14	2,13	2,11	2,09	-144,03	-111,11
3	R6	4,15	4,11	4,09	4,06	4,04	3,99	-171,35	-173,49
3	R'6	3,56	3,54	3,52	3,49	3,47	3,43	-162,30	-157,30
4	R2	4,35	4,33	4,31	4,28	4,26	4,21	-143,04	-128,74
4	R'2	4,99	4,96	4,93	4,90	4,86	4,80	-169,23	-144,29
5	R5	7,74	7,69	7,64	7,58	7,53	7,44	-172,27	-165,37
5	R'5	6,64	6,59	6,55	6,49	6,45	6,37	-180,72	-180,72
6	R1	7,39	7,35	7,31	7,29	7,24	7,15	-144,34	-108,25
6	R'1	8,24	8,19	8,14	8,08	8,01	7,89	-188,78	-155,34
7	R4	12,06	11,96	11,88	11,77	11,68	11,53	-195,32	-192,37
7	R'4	9,59	9,52	9,46	9,38	9,31	9,21	-176,11	-175,18

Tab. 13 Hodnoty pro pastu 1 MΩ/□



Obr. 37 Závislost odporu na teplotě pasty 1 MΩ/□

### 6.1.2 Výpočet TCR

Pro výpočet TCR byla použita rovnice 5, která je uvedena v teoretické části.

Příklad výpočtu pro TCR rezistoru R'4 obvodu č. 6 sekce III s pastou 1 MΩ/□:

$$TCR = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = \frac{1}{R_{T=25^{\circ}C}} \cdot \frac{R_{250^{\circ}C} - R_{25^{\circ}C}}{\Delta T} = \frac{1}{9,59} \cdot \frac{9,21 - 9,59}{250 - 25} = -1,7611 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^6 = -176,11 \text{ ppm}/^{\circ}C$$

Z naměřených výsledků a sestavených grafů můžeme usoudit, že všechny tři použité odporové pasty vykazují lineární závislost hodnoty TCR. Výrobce u past 1 kΩ/□ a 10 kΩ/□ udává dvě hodnoty TCR v rozmezí teplot -55°C až 25°C a 25°C až 125°C. Pro porovnání použijeme tedy výrobcem udanou hodnotu v rozmezí 25°C až 125°C a vypočítané hodnoty v rozmezí 25°C až 150°C. Srovnáním tedy vidíme, že u pasty 1 kΩ/□ je vypočtena hodnota TCR pozitivní a je v rozmezí 280,7 až 640 ppm. Výrobce udává 93 ppm a od vypočítané hodnoty se značně liší. TCR u pasty 10 kΩ/□ je v rozmezí 68,42 až 297,67 ppm. Výrobce udává -16 ppm. U této pasty se hodnoty také liší a je zde navíc zjištěn rozdíl ve znaménku hodnoty ppm. Výrobce udává negativní TCR a při měření byl zjištěn pozitivní. U pasty 1MΩ/□ je výrobcem udávaná hodnota TCR v rozmezí -100 až -150 ppm. Výpočtem byl zjištěn negativní TCR -103,59 až -195,71 ppm pro teploty 25°C až 250°C a -53,22 až 211,37 ppm pro teploty 25°C až 150°C. Můžeme tedy usoudit, že u této pasty hodnoty naměřené odpovídají hodnotám udávané výrobcem.

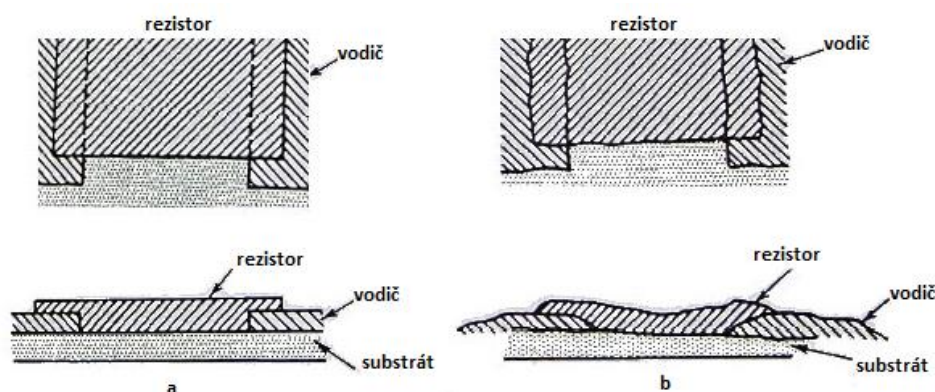
Hodnota TCR také závisí na relativním příspěvku vodivé a izolační fáze při průchodu elektrického náboje rezistorem. Rezistory s malou hodnotou odporu obecně obsahují velké objemy elektricky vodivých částic a takto vytvořené vodivé vedení mezi těmito částicemi způsobuje pozitivní hodnoty TCR. Na rozdíl od rezistorů s vysokou hodnotou odporu, je objem vodivých částic malý a tyto částice jsou navzájem od sebe separovány skelnou fritou. K přenosu náboje mezi vodivými částicemi pak dochází buď tunelováním, nebo přes polovodivé nečistoty ve skle. To má za následek negativní hodnoty TCR.[15]



## 7 Závěr

První část bakalářské práce nás seznamuje s technologií tlustovrstvých obvodů a problematikou jednotlivých operací při jejich výrobě. Každá jednotlivá operace má své specifické vlastnosti a technologický postup a právě dodržení těchto postupů potom můžeme dosáhnout výsledku, který bude vyhovovat našim požadavkům.

Před započítáním sledu operací výroby tlustovrstvého obvodu je vytvořen návrh obvodu. Při návrhu obvodu, kde dochází k výpočtu rozměrů jednotlivých součástek, vycházíme z toho, že součástka bude mít ideální rozměry. Na obr. 38 můžeme vidět rozdíl mezi ideálním rezistorem (obr. 38a) a rezistorem, který vznikne po procesu výpalu (obr. 38b). Z obrázku vidíme, že i povrch reálného substrátu není rovinný a vykazuje určitou hrboľatost a zvlňení. Tyto nerovnosti jsou ovlivňeny výběrem materiálu a také technologickým postupem, který je pro výrobu substrátu zvolen. Dále můžeme vidět, že i nanosená a poté vypálená vodivá a odporová vrstva neodpovídá ideálnímu tvaru. Tento výsledný tvar jednotlivých past je dán jejich viskózními a tixotropními vlastnostmi a metodou, jakou jsou nanoseny na substrát. Vliv na výsledný tvar má také tepelné zpracování, kdy dochází ke slnutí funkčních vrstev. Z porovnání ideálního a reálného rezistoru nám tedy vyplývá, že hodnota reálného odporu nebude odpovídat hodnotě vypočítané v návrhu. Při návrhu rezistorů tedy volíme hodnoty menší než požadované a rozdíl je poté minimalizován trimováním natisknutého rezistoru.



Obr. 38 Rozdíl mezi ideálním a vypáleným rezistorem [1]

Druhá část práce je zaměřena na návrh, vyhotovení, proměření a vyhodnocení jednotlivých odporových monitorů.

Odporový monitor v této bakalářské práci je navržen tak, aby na něm mohly být proměřeny elektrické vlastnosti tlustovrstvých odporových past, aby bylo možné opticky vyhodnotit kvalitu tisku a aby mohly být proměřeny hodnoty TCR rezistorů na vybraných monitorech. Rozměry rezistorů, vodivých plošek a jejich rozložení na substrátu jsou navrženy s ohledem na to, aby zhotovený obvod bylo možné proměřit pomocí měřicího přípravku, jehož zhotovení je součástí práce.

Navržené odporové monitory byly vyhotoveny sítotiskovou metodou pomocí sítotiskového poloautomatu. Před samotným tiskem bylo vždy třeba přesně nastavit parametry poloautomatu, aby mohlo být dosaženo co nejpřesnějších rozměrů rezistorů. První byla vytisknuta vodivá vrstva pomocí pasty, jejíž funkční složku tvoří stříbrné částice. Nanesená vrstva byla vypálena a poté se mohlo přejít k tisku odporových past. Po natisknutí třech různých past byly monitory opět vypáleny podle přesně stanoveného teplotního profilu.

Po zhotovení monitorů byl sestaven měřicí přípravek, který umožnil jednoduché proměření všech obvodů. Výsledné hodnoty byly zapsány do tabulek a byly vyneseny grafy, které popisují závislost délky rezistoru na jejich hodnotě. Při vyhodnocení bylo zjištěno, že výsledné naměřené hodnoty vykazují odchylky od teoretických hodnot. Tyto odchylky jsou dány vlivem difúze vodivých částic do odporové pasty a chybami měření. Velkou část odchylek mohlo také způsobit špatné nastavení parametrů síťotiskového poloautomatu, nedostatečná příprava odporových past pro síťotisk (nedostatečné rozmíchání pasty), stáří použité pasty, nebo také nerovnoměrný povrch substrátu.

Pro měření hodnot TCR byly vybrány tři odporové monitory, každý s jinou odporovou pastou. Monitory byly vystaveny šesti různým teplotám v rozmezí od 25°C do 250°C a na každé teplotě byly odečteny hodnoty jednotlivých odporů. Na základě těchto hodnot byly sestaveny grafy, které nám dokazují, že všechny použité odporové pasty mají v daném rozmezí teplot lineární charakter TCR. Pozitivní TCR bylo zjištěno u pasty 1 k $\Omega$ /□ a 10 k $\Omega$ /□ a negativní TCR u pasty 1 M $\Omega$ /□.

U použitých odporových past výrobce neudává jejich složení. Pro výrobu tlustovrstvých odporových past se ale nejčastěji používá oxid ruthenia RuO<sub>2</sub>, který se stal standardním materiálem pro vytváření tlustovrstvých rezistorů. Oxid ruthenia má nízkou rezistivitu a pozitivní TCR. Má také velké rozpětí vodivé fáze, které umožňuje vytvoření širokého spektra odporových past. Sloučeniny ruthenia, které mají vodivé, polovodivé nebo izolační vlastnosti, lze pak získat dosazením vhodných prvků na vhodné místo krystalové mřížky (Pb, Bi, Ba, Ta, Sr, Ca). Přidáním těchto prvků potom dostáváme schopnost ovlivnit hodnoty odporu a TCR.

Výsledky této bakalářské práce prokázaly, že pro dosažení požadovaných vlastností natisknutých rezistorů, musíme volit vhodné materiály a dodržovat přesné technologické postupy, a to už od procesu návrhu až po proces výpalu tlustovrstvých obvodů.



## Seznam literatury

- [1] HILL, McGraw. *Handbook of thick film hybrid microelectronics: a practical sourcebook for designers, fabricators, and users*. Editor Charles A Harper. New York,: McGraw-Hill, 1974, ISBN 00-702-6680-8.
- [2] SZENDIUCH, Ivan. *Mikroelektronika a technologie součástek*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2009, 190 s. ISBN 9788021439603.
- [3] SZENDIUCH, Ivan. *Vytváření tlustovrstvé pasivní sítě* [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/L03\\_Vytváření\\_tlustovrstvé\\_pasivní\\_sítě.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/L03_Vytváření_tlustovrstvé_pasivní_sítě.pdf)
- [4] TRNKA, P. a M. BUJALOBOKOVÁ. *Progresivní keramika v elektronických aplikacích* [online]. 2007 [cit. 2012-11-28]. ISSN 1336-1376. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/83892>
- [5] STARÝ, Jiří, Petr KAHLE a Petr BAČA. *Plošné spoje a povrchová montáž*. 1. 12. 2003, 200 s.
- [6] SZENDIUCH, Ivan. *Tlusté vrstva* [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/05a\\_tluste\\_vrstvy.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/05a_tluste_vrstvy.pdf)
- [7] ADÁMEK, Martin, Edita HEJÁTKOVÁ, Marek NOVOTNÝ, Jan PRÁŠEK a Cyril VAŠKO. *Moderní technologie elektronických obvodů a systémů: Laboratorní cvičení*. Brno, 2011.
- [8] MERUNKA, František a Josef SVETLÍK. *Technologie součástek a obvodů I: Hybridní integrované obvody*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1987, 72 s.
- [9] TARR, Martin. *Thick film technology*. *The University of Bolton* [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z: [http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0255\\_tft/](http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0255_tft/)
- [10] ADÁMEK, Martin, Radimír VRBA, Jan JAROŠ, Edita HEJÁTKOVÁ a Jan PRÁŠEK. *Mikrosenzory a mikromechanické systémy* [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/menufram.htm>
- [11] SZENDIUCH, Ivan. *Moderní technologie pro konstrukci elektronických systémů* [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/04\\_moderni\\_tehnologie.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/04_moderni_tehnologie.pdf)
- [12] BURŠÍK, Martin. *Mikroelektronika a technologie součástek: Laboratorní cvičení* [online]. Brno, 2008 [cit. 2012-11-28]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/L02-mereni-vrstvoveho-odporu.pdf>
- [13] VUT BRNO. *LabSensNano* [online]. Brno: VUT Brno, Ústav mikroelektroniky, 2004-2013 [cit. 2013-02-22]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/LabSensNano/Facilities.aspx>
- [14] TVRDÍK, Josef. OSTRAVSKÁ UNIVERZITA. *Základy matematické statistiky*. 2. upravené vydání. Ostrava, 2008.
- [15] MINGES, Merrill L. *Electronic materials handbook*. Materials Park, OH: ASM International, 1989-, v. <1 >. ISBN 08717028511.

## **Seznam zkratk**

TCR - teplotní součinitel odporu (Temperature Coefficient of Resistance)

VCR – napěťový koeficient odporu (Voltage Coefficient of Resistance)

TCE – teplotní součinitel délkové roztažnosti (Thermal Coefficient of Expansion)

NTC – termistor s negativním koeficientem

PTC – termistor s pozitivním koeficientem

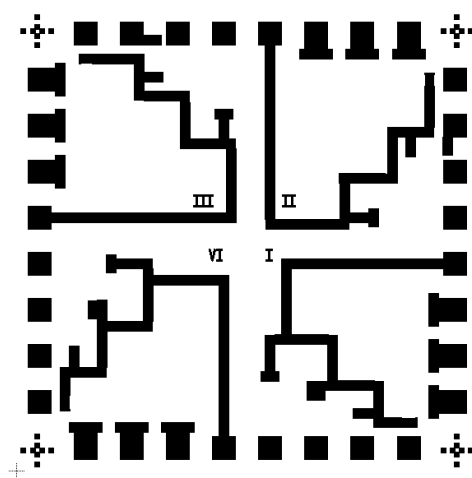
## **Seznam příloh**

Příloha č. 1: motiv vodivé vrstvy

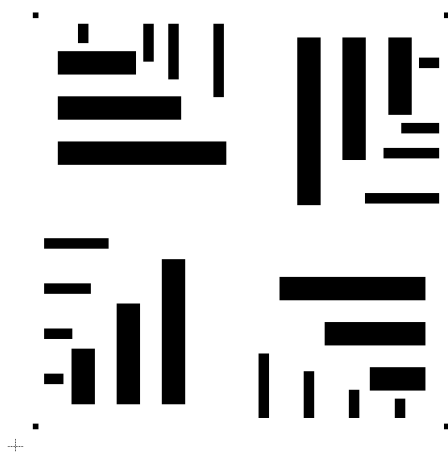
Příloha č. 2: motiv odporové vrstvy

Příloha č. 3: tabulky hodnot všech naměřených odporových monitorů

Příloha č. 1: motiv vodivé vrstvy



Příloha č. 2: motiv odporové vrstvy



Příloha č. 3: tabulky hodnot všech naměřených odporových monitorů

Obvod č. 1 pasta 1 MΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[MΩ]	[MΩ]	[%]	[MΩ]	[%]
Rv	1	1,70	70,00	1,12	12,40
R1	6	13,98	133,00	9,58	59,67
R2	4	10,91	172,75	5,41	35,25
R3	2	3,75	87,50	2,36	18,00
R4	7	12,21	74,43	15,77	125,29
R5	5	9,36	87,20	8,67	73,40
R6	3	4,84	61,33	5,18	72,67
R'v	1	1,53	52,60	1,54	54,00
R'1	6	9,34	55,67	10,81	80,17
R'2	4	6,38	59,50	6,13	53,25
R'3	2	3,11	55,50	2,65	32,50
R'4	7	12,05	72,14	9,65	37,86
R'5	5	8,82	76,40	6,48	29,60
R'6	3	4,39	46,33	3,25	8,33
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					98,58
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					60,13
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					50,11
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					41,08

Obvod č. 2 pasta 1 MΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[MΩ]	[MΩ]	[%]	[MΩ]	[%]
Rv	1	1,54	53,80	1,13	13,20
R1	6	10,48	74,58	7,78	29,60
R2	4	7,07	76,75	4,87	21,63
R3	2	3,40	70,05	2,23	11,60
R4	7	12,54	79,09	12,80	82,91
R5	5	9,51	90,20	8,29	65,82
R6	3	5,36	78,60	4,67	55,57
R'v	1	1,32	32,40	1,47	47,30
R'1	6	9,76	62,72	8,88	48,02
R'2	4	6,57	64,13	5,77	44,20
R'3	2	2,99	49,30	2,63	31,55
R'4	7	12,41	77,27	9,74	39,17
R'5	5	9,13	82,64	6,84	36,70
R'6	3	5,40	79,93	3,74	24,73
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					65,85
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					60,60
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					44,54
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					46,12

Obvod č. 3 pasta 1 MΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[MΩ]	[MΩ]	[%]	[MΩ]	[%]
Rv	1	1,39	38,90	0,99	1,00
R1	6	10,49	74,87	7,94	32,33
R2	4	6,79	69,63	4,99	24,75
R3	2	3,43	71,45	2,22	11,00
R4	7	12,28	75,44	12,87	83,86
R5	5	9,22	84,38	8,45	69,00
R6	3	5,29	76,37	4,59	53,00
R'v	1	1,72	71,70	1,27	26,90
R'1	6	8,94	49,07	8,37	39,50
R'2	4	6,11	52,70	5,27	31,75
R'3	2	2,96	48,10	2,21	10,50
R'4	7	13,24	89,10	10,39	48,43
R'5	5	9,12	82,44	7,46	49,20
R'6	3	5,12	70,70	3,97	32,33
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					60,95
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					54,00
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					47,12
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					46,64

Obvod č. 4 pasta 1 MΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[MΩ]	[MΩ]	[%]	[MΩ]	[%]
Rv	1	1,49	48,50	0,93	7,10
R1	6	10,67	77,88	8,07	34,52
R2	4	7,20	80,10	5,01	25,28
R3	2	3,48	74,15	2,03	1,45
R4	7	12,15	73,61	12,66	80,79
R5	5	8,20	64,08	8,32	66,48
R6	3	4,98	65,87	4,44	48,03
R'v	1	1,23	22,60	1,04	4,10
R'1	6	8,83	47,12	8,75	45,82
R'2	4	5,92	47,90	5,86	46,43
R'3	2	2,76	37,90	2,58	29,20
R'4	7	12,29	75,63	9,64	37,66
R'5	5	8,73	74,66	6,92	38,38
R'6	3	4,98	66,00	3,79	26,47
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					60,00
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					56,29
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					36,81
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					39,24

Obvod č. 5 pasta 1 MΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[MΩ]	[MΩ]	[%]	[MΩ]	[%]
Rv	1	1,54	54,00	0,98	2,00
R1	6	10,28	71,33	6,99	16,50
R2	4	6,59	64,75	4,39	9,75
R3	2	3,42	71,00	1,97	1,50
R4	7	12,23	74,71	11,01	57,29
R5	5	8,54	70,80	6,78	35,60
R6	3	5,00	66,67	3,43	14,33
R'v	1	1,23	22,80	1,09	8,50
R'1	6	9,63	60,50	7,91	31,83
R'2	4	6,01	50,25	4,95	23,75
R'3	2	3,04	52,00	2,32	16,00
R'4	7	12,58	79,71	9,01	28,71
R'5	5	8,21	64,20	6,11	22,20
R'6	3	4,93	64,33	3,19	6,33
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					47,10
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					46,64
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					33,09
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					36,67

Obvod č. 6 pasta 1 MΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[MΩ]	[MΩ]	[%]	[MΩ]	[%]
Rv	1	0,90	9,80	0,71	29,20
R1	6	10,10	68,33	7,39	23,17
R2	4	6,26	56,50	4,35	8,75
R3	2	2,47	23,50	1,63	18,50
R4	7	11,46	63,71	12,06	72,29
R5	5	8,60	72,00	7,74	54,80
R6	3	4,64	54,67	4,15	38,33
R'v	1	1,10	10,40	0,90	9,90
R'1	6	9,04	50,67	8,24	37,33
R'2	4	5,74	43,50	4,99	24,75
R'3	2	2,73	36,50	2,16	8,00
R'4	7	12,49	78,43	9,59	37,00
R'5	5	8,45	69,00	6,64	32,80
R'6	3	5,03	67,67	3,56	18,67
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					41,68
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					47,53
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					35,05
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					36,52

Obvod č. 7 pasta 10 kΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[kΩ]	[kΩ]	[%]	[kΩ]	[%]
Rv	10	2,85	71,50	3,20	68,00
R1	60	41,70	30,50	38,80	35,33
R2	40	26,30	34,25	24,60	38,50
R3	20	9,59	52,05	9,94	50,30
R4	70	46,30	33,86	44,30	36,71
R5	50	32,30	35,40	29,40	41,20
R6	30	16,65	44,50	15,42	48,60
R'v	10	2,59	74,10	2,39	76,10
R'1	60	48,20	19,67	47,10	21,50
R'2	40	32,20	19,50	31,50	21,25
R'3	20	14,38	28,10	14,16	29,20
R'4	70	53,60	23,43	51,60	26,29
R'5	50	37,60	24,80	35,70	28,60
R'6	30	20,40	32,00	19,60	34,67
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					48,86
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					25,36
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					47,50
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					26,14

Obvod č. 8 pasta 10 kΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[kΩ]	[kΩ]	[%]	[kΩ]	[%]
Rv	10	2,29	77,10	2,85	71,50
R1	60	37,70	37,17	38,70	35,50
R2	40	22,80	43,00	23,20	42,00
R3	20	8,89	55,55	8,98	55,10
R4	70	48,80	30,29	50,20	28,29
R5	50	34,70	30,60	32,40	35,20
R6	30	17,93	40,23	17,56	41,47
R'v	10	3,14	68,60	2,69	73,10
R'1	60	44,30	26,17	43,20	28,00
R'2	40	28,40	29,00	28,50	28,75
R'3	20	12,52	37,40	12,41	37,95
R'4	70	57,00	18,57	54,70	21,86
R'5	50	40,80	18,40	39,90	20,20
R'6	30	23,10	23,00	22,70	24,33
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					48,86
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					25,78
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					46,73
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					26,49

Obvod č. 9 pasta 10 kΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[kΩ]	[kΩ]	[%]	[kΩ]	[%]
Rv	10	2,32	76,80	2,77	72,30
R1	60	36,50	39,17	37,70	37,17
R2	40	22,50	43,75	24,00	40,00
R3	20	8,51	57,45	9,64	51,80
R4	70	48,70	30,43	50,50	27,86
R5	50	33,30	33,40	33,80	32,40
R6	30	17,91	40,30	16,93	43,57
R'v	10	2,78	72,20	2,80	72,00
R'1	60	44,50	25,83	43,90	26,83
R'2	40	28,80	28,00	28,70	28,25
R'3	20	12,64	36,80	12,99	35,05
R'4	70	56,20	19,71	54,10	22,71
R'5	50	40,30	19,40	39,90	20,20
R'6	30	22,00	26,67	22,70	24,33
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					49,12
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					25,99
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					47,20
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					26,31

Obvod č. 10 pasta 10 kΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[kΩ]	[kΩ]	[%]	[kΩ]	[%]
Rv	10	2,65	73,50	3,16	68,40
R1	60	41,50	30,83	40,90	31,83
R2	40	25,50	36,25	24,70	38,25
R3	20	9,35	53,25	10,01	49,95
R4	70	47,90	31,57	46,30	33,86
R5	50	32,30	35,40	30,20	39,60
R6	30	16,51	44,97	15,94	46,87
R'v	10	2,38	76,20	2,17	78,30
R'1	60	46,90	21,83	46,80	22,00
R'2	40	31,80	20,50	30,70	23,25
R'3	20	14,06	29,70	13,79	31,05
R'4	70	54,20	22,57	51,90	25,86
R'5	50	38,90	22,20	36,80	26,40
R'6	30	21,00	30,00	20,30	32,33
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					49,06
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					25,18
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					47,07
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					26,10

Obvod č. 11 pasta 10 kΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[kΩ]	[kΩ]	[%]	[kΩ]	[%]
Rv	10	2,68	73,20	3,04	69,60
R1	60	40,20	33,00	39,60	34,00
R2	40	25,20	37,00	23,70	40,75
R3	20	9,64	51,80	9,60	52,00
R4	70	46,20	34,00	42,80	38,86
R5	50	31,00	38,00	29,10	41,80
R6	30	16,07	46,43	14,85	50,50
R'v	10	2,49	75,10	2,37	76,30
R'1	60	46,10	23,17	45,70	23,83
R'2	40	31,30	21,75	30,20	24,50
R'3	20	14,29	28,55	13,54	32,30
R'4	70	51,60	26,29	50,40	28,00
R'5	50	36,40	27,20	35,40	29,20
R'6	30	19,90	33,67	19,10	36,33
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					50,31
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					27,96
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					48,74
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					27,83

Obvod č. 12 pasta 10 kΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[kΩ]	[kΩ]	[%]	[kΩ]	[%]
Rv	10	2,52	74,80	3,03	69,70
R1	60	41,30	31,17	38,80	35,33
R2	40	24,60	38,50	24,20	39,50
R3	20	9,30	53,50	10,14	49,30
R4	70	46,20	34,00	44,30	36,71
R5	50	31,40	37,20	30,20	39,60
R6	30	16,68	44,40	15,43	48,57
R'v	10	2,72	72,80	2,15	78,50
R'1	60	47,10	21,50	47,20	21,33
R'2	40	31,20	22,00	31,10	22,25
R'3	20	14,03	29,85	13,83	30,85
R'4	70	53,40	23,71	51,60	26,29
R'5	50	38,10	23,80	37,10	25,80
R'6	30	20,60	31,33	20,10	33,00
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					50,17
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					25,55
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					47,78
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					26,41



Obvod č. 13 pasta 1 kΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[kΩ]	[kΩ]	[%]	[kΩ]	[%]
Rv	1	0,19	80,90	0,23	77,10
R1	6	2,50	58,33	2,64	56,00
R2	4	1,50	62,50	1,64	59,03
R3	2	0,59	70,70	0,65	67,65
R4	7	3,17	54,71	3,35	52,14
R5	5	2,23	55,40	2,30	54,00
R6	3	1,18	60,83	1,24	58,60
R'v	1	0,22	77,70	0,22	77,60
R'1	6	3,06	49,00	3,09	48,50
R'2	4	1,97	50,75	2,05	48,75
R'3	2	0,84	58,25	0,92	54,20
R'4	7	4,04	42,29	3,96	43,43
R'5	5	2,90	42,00	2,95	41,00
R'6	3	1,58	47,33	1,66	44,73
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					64,35
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					47,18
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					63,55
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					47,86

Obvod č. 14 pasta 1 kΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[kΩ]	[kΩ]	[%]	[kΩ]	[%]
Rv	1	0,22	77,70	0,24	75,80
R1	6	2,88	52,00	2,95	50,83
R2	4	1,76	55,93	1,84	54,00
R3	2	0,72	63,80	0,72	63,85
R4	7	3,82	45,43	4,06	42,00
R5	5	2,77	44,60	2,79	44,20
R6	3	1,50	49,97	1,45	51,77
R'v	1	0,29	71,10	0,28	72,50
R'1	6	3,67	38,83	3,57	40,50
R'2	4	2,34	41,50	2,33	41,75
R'3	2	1,02	48,80	1,04	48,05
R'4	7	4,79	31,57	4,59	34,43
R'5	5	3,49	30,20	3,48	30,40
R'6	3	1,93	35,67	1,94	35,33
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					57,49
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					37,96
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					56,95
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					38,22

Obvod č. 15 pasta 1 kΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odchylka	sekce III a IV	Odchylka
	[kΩ]	[kΩ]	[%]	[kΩ]	[%]
Rv	1	0,22	78,40	0,24	75,70
R1	6	2,71	54,83	2,86	52,33
R2	4	1,65	58,85	1,71	57,18
R3	2	0,66	66,85	0,70	64,85
R4	7	3,65	47,86	3,69	47,29
R5	5	2,56	48,80	2,52	49,60
R6	3	1,41	53,07	1,37	54,50
R'v	1	0,29	71,40	0,25	74,70
R'1	6	3,39	43,50	3,31	44,83
R'2	4	2,16	46,00	2,11	47,25
R'3	2	0,95	52,65	0,93	53,40
R'4	7	4,38	37,43	4,31	38,43
R'5	5	3,12	37,60	3,14	37,20
R'6	3	1,78	40,63	1,73	42,23
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					60,63
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					43,52
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					58,90
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					43,34

Obvod č. 16 pasta 1 kΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odhylka	sekce III a IV	Odhylka
	[kΩ]	[kΩ]	[%]	[kΩ]	[%]
Rv	1	0,23	76,70	0,27	73,20
R1	6	2,86	52,33	3,01	49,83
R2	4	1,79	55,33	1,86	53,50
R3	2	0,72	64,15	0,75	62,45
R4	7	3,83	45,29	3,83	45,29
R5	5	2,66	46,80	2,63	47,40
R6	3	1,42	52,80	1,39	53,80
R'v	1	0,28	71,70	0,25	75,40
R'1	6	3,59	40,17	3,49	41,83
R'2	4	2,34	41,50	2,27	43,25
R'3	2	1,01	49,30	1,01	49,65
R'4	7	4,54	35,14	4,41	37,00
R'5	5	3,31	33,80	3,25	35,00
R'6	3	1,82	39,33	1,83	39,00
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					58,80
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					40,50
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					56,95
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					40,33

Obvod č. 17 pasta 1 kΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odhylka	sekce III a IV	Odhylka
	[kΩ]	[kΩ]	[%]	[kΩ]	[%]
Rv	1	0,23	77,40	0,26	74,50
R1	6	2,84	52,67	2,91	51,50
R2	4	1,73	56,78	1,80	55,00
R3	2	0,68	66,20	0,72	63,85
R4	7	3,81	45,57	3,85	45,00
R5	5	2,66	46,80	2,61	47,80
R6	3	1,45	51,67	1,33	55,80
R'v	1	0,28	71,80	0,25	75,30
R'1	6	3,52	41,33	3,42	43,00
R'2	4	2,30	42,50	2,23	44,25
R'3	2	0,99	50,35	0,97	51,35
R'4	7	4,55	35,00	4,42	36,86
R'5	5	3,29	34,20	3,23	35,40
R'6	3	1,78	40,83	1,78	40,57
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					59,62
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					41,44
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					57,59
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					41,17

Obvod č. 18 pasta 1 kΩ/□					
	Navrhnutá hodnota	sekce I a II	Odhylka	sekce III a IV	Odhylka
	[kΩ]	[kΩ]	[%]	[kΩ]	[%]
Rv	1	0,24	76,40	0,25	75,00
R1	6	2,91	51,50	2,98	50,33
R2	4	1,73	56,78	1,83	54,25
R3	2	0,72	63,85	0,72	64,05
R4	7	3,85	45,00	4,09	41,57
R5	5	2,66	46,80	2,69	46,20
R6	3	1,46	51,27	1,40	53,20
R'v	1	0,30	70,30	0,26	74,40
R'1	6	3,59	40,17	3,47	42,17
R'2	4	2,32	42,00	2,21	44,75
R'3	2	1,01	49,70	0,98	50,90
R'4	7	4,69	33,00	4,56	34,86
R'5	5	3,37	32,60	3,32	33,60
R'6	3	1,88	37,33	1,86	38,00
tenké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					57,99
široké rezistory tisknuté ve směru pohybu stěrky					40,13
tenké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					57,13
široké rezistory tisknuté proti směru pohybu stěrky					39,72