

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie



# Kontaktní odpor na rozhraní různých typů tlustých vrstev

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Rostislav Hříbal

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

Rok: 2014

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Rostislav Hříbal**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Kontaktní odpor na rozhraní různých typů tlustých vrstev**

### Pokyny pro vypracování:


1. Popište strukturu a vlastnosti tlustých vrstev
2. Diskutujte vlivy materiálu a zpracování na výslednou kvalitu tlustovrstvých struktur. Zaměřte se především na struktury vícevrstvé.
3. Připravte vzorky vodivých a odporových vrstevových struktur, proveďte měření kontaktního odporu a výsledky vyhodnoťte.

### Seznam odborné literatury:

- [1] SLOVÁK, F.: Hodnocení vlastností kontaktů mezi různými vodivými a odporovými tlustými vrstvami, bakalářská práce, 2007
- [2] HNATEK, E. R.: Integrated circuit quality and reliability, New York, 1995, ISBN: 0824792831

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

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

  
doc. Ing. Pavel Mach, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 11. 3. 2014

## **Čestné prohlášení**

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

V Praze dne 21. května 2014

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Tímto děkuji vedoucí mé bakalářské práce Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D., za odborné rady, cenné připomínky a pomoc při práci v laboratoři.

## **Anotace**

Tato práce se zabývá tlustovrstvými strukturami, zejména vícevrstevnými. Autor se zaměřuje na základní vlastnosti tlustých vrstev, jejich dělení, metody jejich výroby a vlastnosti kontaktu mezi dvěma různými tlustými vrstvami. V rámci práce se autor také věnuje vytvoření vícevrstevných struktur a následnému měření kontaktních vlastností třibodovou metodou. Práce obsahuje výsledky a zhodnocení měření.

## **Klíčová slova**

tlusté vrstvy, vícevrstvé struktury, kontaktní odpor

## **Abstract**

This thesis looks into thick film structures, especially multi-layer. The author focuses on fundamental properties of thick films, its sorting, methods of its manufacture and properties of contact between two different types of thick films. Within the thesis, the author engages also in creating of thick film multi-layer structures and following measuring of contact properties with three-point method. The thesis includes the results and the evaluation of the measurement.

## **Keywords**

thick films, multi-layer structures, contact resistance

# Obsah

Úvod .....	8
1 Tlusté vrstvy .....	9
1.1 Dělení tlustých vrstev .....	9
1.2 Substráty pro tlusté vrstvy .....	10
1.3 Tvorba tlustovrstvých struktur .....	10
1.3.1 Sítotisk .....	11
1.3.1.1 Zařízení pro sítotisk .....	12
1.3.1.2 Síta .....	12
1.3.1.3 Tisk .....	14
1.3.1.4 Tepelné zpracování pasty .....	14
1.3.1.5 Přesnost tisku .....	15
1.3.1.6 Šablony pro sítotisk .....	16
1.3.1.7 Těrka .....	17
1.3.2 Šablonový tisk .....	17
1.3.2.1 Šablony pro šablonový tisk .....	18
1.3.3 Micro-Screen .....	19
1.3.4 Dispensing .....	20
1.3.5 Jetting .....	21
2 Parametry a kvalita tlustých vrstev .....	22
2.1 Odpor na čtverec .....	22
2.2 Vliv rozměrů na parametry vrstvy .....	23
2.3 Jevy na rozhraní rezistor – vodič .....	25
3 Tvorba tlustovrstvých struktur a jejich měření .....	30
3.1 Třibodová měřicí metoda .....	30
3.2 Tvorba vzorků .....	31
3.2.1 Síta .....	31
3.2.2 Podložky pro vrstvy .....	33
3.2.3 Tlustovrstvé pasty .....	33
3.2.3.1 Vodivá pasta .....	33
3.2.3.2 Odporová pasta .....	33
3.2.4 Tisk .....	33
3.2.5 Sušení .....	34
3.3 Rozměry vzorků a jejich značení .....	35
3.4 Měření vzorků .....	36
3.4.1 Měřicí přípravek .....	37

3.4.2	Frekvenční generátor Promax GB – 212 .....	38
3.4.3	Laboratorní multimetr Hewlett-Packard 34401A.....	38
3.4.4	Digitální multimetr G – 1004.501 .....	39
3.5	Vyhodnocení měření .....	39
3.5.1	Zpracování naměřených hodnot .....	40
3.5.2	Grafy závislostí kontaktního odporu a jejich vyhodnocení.....	41
	Závěr.....	52
	Seznam použité literatury .....	53
	Seznam obrázků.....	54
	Seznam tabulek.....	55
	Seznam grafů .....	56
	Seznam příloh.....	57
	Příloha A – Tabulky naměřených hodnot.....	I

## Úvod

Elektronika zasahuje do všech částí dnešního světa. Rozvoj elektroniky ovšem nespočívá pouze ve vývoji nových technologií, nýbrž i v inovování a vylepšování technologií, které byly zavedeny dříve. V posledních letech roste požadavek na co nejlevnější a nejsnadnější výrobu elektronických součástek. Zároveň je ale požadována co největší miniaturizace a spolehlivost. Aby bylo možné splnit tyto zdánlivě protichůdné požadavky, je zapotřebí používat technologie, které to umožňují. Nejznámější a nejhojněji používané takové technologie jsou dvě. Jedná se o technologie tlustých a tenkých vrstev.

Tato práce je zaměřena pouze na vrstvy tlusté. Výhoda tlustých vrstev oproti tenkým spočívá zejména v nižších nákladech na výrobu a ve snadnějším výrobním postupu. Proto se technologie tlustých vrstev neustále vyvíjí a stále vznikají nové typy tlustých vrstev, které vyhovují moderním trendům. Celé téma tlustých vrstev je ovšem velmi rozsáhlé a proto se práce zabývá pouze základní problematikou, jako jsou vlastnosti tlustých vrstev, jejich dělení a technologie výroby. Největší část práce se pak věnuje vícevrstevným strukturám a kontaktním vlastnostem na rozhraní dvou různých tlustých vrstev. Vytvoření takových struktur, následné měření jejich kontaktních vlastností a vyhodnocení naměřených dat je praktickou částí této práce. Právě dosažení dobrých kontaktních vlastností je totiž stěžejní pro použití tlustých vrstev ať už pro vytváření hybridních obvodů nebo např. elektrod fotovoltaických článků.



# 1 Tlusté vrstvy

Mluví-li se o tlustých vrstvách, jsou na mysli vrstvy s amorfni strukturou, jejichž tloušťka je větší než střední volná dráha elektronu. Zpravidla se tloušťka tlusté vrstvy pohybuje mezi 5 a 80 mikrometry. Využívají se pro vytváření vodivých, odporových, dielektrických, izolačních a ochranných vrstev. Teorie této kapitoly je povětšinou převzata z práce [4], která sloužila jako příprava pro bakalářskou práci a bylo v ní čerpáno zejména z [1] a [2]. Dále byla doplněna některá další fakta z [1] a [3].

Materiál pro tvorbu tlusté vrstvy je ve formě pasty, která je nehomogenní směsí čtyř základních složek. Jedná se o složku funkční, pojivovou, organickou a modifikující. Funkční složka zajišťuje požadované elektrické vlastnosti výsledné tlusté vrstvy. Pojivová neboli adhesní složka zajišťuje pevné spojení pasty s podložkou. Pojivová složka je někdy označována jako matrice. Organická složka v pastě hraje roli nosiče výše zmíněných složek. Konečně modifikující, technologická, složka zajišťuje dostatečnou viskozitu pasty po dobu skladování a nanášení.

## 1.1 Dělení tlustých vrstev

Tlusté vrstvy lze dělit z několika hledisek. První kritérium je materiál tvořící pojivovou složku pasty. Ta může být tvořena buď anorganickou látkou, nebo látkou polymerní. Anorganické vrstvy mají matrici nejčastěji z velmi jemně namletého skla, tzv. frity a jsou vypalovány při teplotě nad 800 °C. Proto se používají na substrátu z keramiky nebo skla. Organická složka se skládá z polymeru a rozpouštědla. Během sušení a výpalu organická i modifikující složka vyhoří. U polymerových vrstev přebírá funkci pojivové a modifikující složky složka organická, která je tvořena polymerem, např. polyester. Tyto vrstvy se využívají na substrátech, které by nevydržely vysokou vypalovací teplotu anorganických vrstev, například plastové folie nebo desky plošných spojů. Vytvrzovací teplota polymerových vrstev se pohybuje pod 200 °C. Nevýhoda polymerových vrstev spočívá v navlhavosti a v nižší elektrické i tepelné vodivosti, což v důsledku snižuje maximální pracovní teplotu a tím i výkonové zatížení.

Druhé kritérium je funkce tlusté vrstvy, o které rozhoduje funkční složka pasty. Podle ní jsou vrstvy děleny na vodivé, odporové, dielektrické, izolační a ochranné. U vodivých vrstev funkční složku tvoří jak u anorganických vrstev, tak u polymerových vrstev

ušlechtilé kovy s nízkou rezistivitou, jako je zlato, stříbro, platina atd., ale i měď pro svou dobrou hodnotu povrchové rezistivity a také nízké ceny oproti drahým kovům. Funkční složku u odporových anorganických vrstev tvoří kovy nebo oxidy kovů, jako je stříbro, palladium, oxid ruthenia, iridium nebo rhenium. U odporových polymerových vrstev se navíc vyskytuje uhlík. Pro výrobu dielektrických vrstev anorganických i polymerových se používá nejčastěji barium titanát nebo oxid hlinitý. U izolačních anorganických vrstev se používá opět oxid hlinitý, zatím co u polymerových izolačních vrstev se funkční složka zcela vynechává a izolační schopnosti tu má samotný polymer.

## **1.2 Substráty pro tlusté vrstvy**

Substrát musí mít několik důležitých vlastností. Požadují se u něj dobré izolační vlastnosti a koeficient teplotní roztažnosti pokud možno co nejshodnější s koeficientem roztažnosti tlusté vrstvy, kterou ponese. Také je vhodná vysoká tepelná vodivost, aby pro co nejlepší odvod tepla.

Materiál podložky závisí na tom, jaká tlustá vrstva na něm bude. Pro anorganické vrstvy se používá sklo a keramika. Sklo se aplikuje, pokud očekáváme nízké výkony. Jinak se používá keramika, která má relativní permitivitu menší než 12. Její výhody jsou dobrá tepelná vodivost, elektrická pevnost, mechanická tvrdost, odolnost vůči klimatickým jevům a mnoha chemikáliím. Také nemění tvar. Má ale také své nevýhody. Hlavně velkou křehkost a poměrně velkou permitivitu. Nejčastěji se používá korundová keramika vyrobená z alumina (oxid hlinitý). Její hlavní přednost je vysoká tepelná vodivost, až 25 W/mK. Další významná keramika je AlN (aluminium – nitrid). Tato keramika má extrémně velkou tepelnou vodivost – 180 W/mK. Pro polymerové vrstvy se nejčastěji využívají organické substráty. To jsou substráty založené na izolantu z organické pryskyřice. Hlavní podíl ve výrobě má pryskyřice fenolická a epoxidová, například FR4. Velkou nevýhodou těchto materiálů, stejně jako polymerových vrstev, je velká navlhavost.

## **1.3 Tvorba tlustovrstvých struktur**

Tvorba tlusté vrstvy v principu spočívá v nanášení pasty na substrát (podložku) a její následné vytvrzení. Způsob a kvalita přenosu obrazce tlustovrstvé struktury na substrát nejvíce ovlivňuje vlastnosti a spolehlivost výsledného elektrického zařízení. Proto se dbá na co nejdokonalejší technice vytváření těchto struktur. V dnešní době existuje mnoho

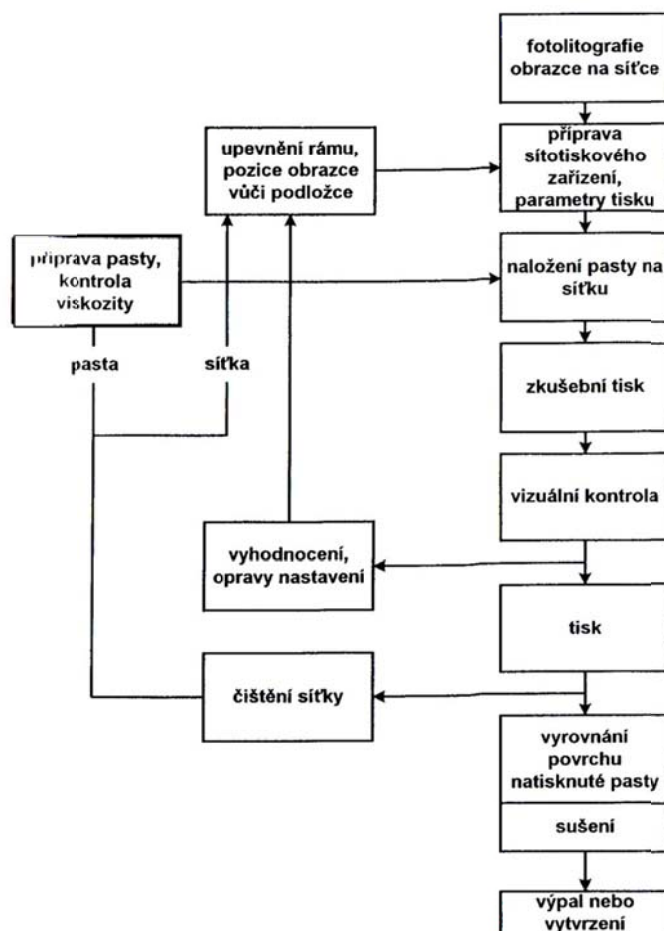
technologických postupů, nejčastěji je však stále používán sítotisk a šablonový tisk, popř. micro-screen. Dále se používají metody přímého nanášení jako dispensing a jetting. Existují i metody jiné, pro všechny ovšem není v této práci dostatek prostoru.

### 1.3.1 Sítotisk

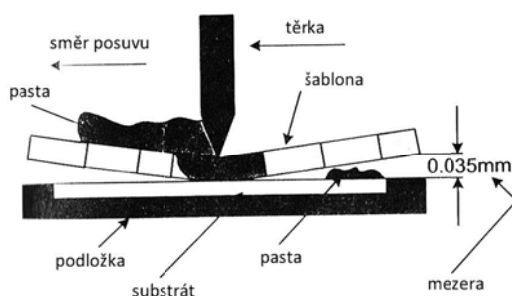
Sítotisk se neustále vyvíjí, je základní technologií v elektrotechnické výrobě a splňuje kritéria výkonnosti a hospodárnosti. Využívá se k nanášení mnoha médií, jako je leptuvzdorný rezist, pájecí pasty, lepidla, potisky, fotorezisty.

Technologie sítotisku se skládá ze tří základních částí. A to ze sítoviny s otvory, která má za úkol řídit tvar, pozici a množství nanášené pasty na substrát, pak pasty, která má být nanášena, a konečně ze zařízení zajišťující aplikaci pasty na substrát. Na obr. č. 1 je zachycen postup sítotisku a na obr. č. 2 je jeho princip.

Obr. č. 1 Příklad vývojového diagramu technologie výroby tlustých vrstev sítotiskem [1]



Obr. č. 2 Princip sítotisku [1]



### 1.3.1.1 Zařízení pro sítotisk

Samotné zařízení pro sítotisk může být vcelku jednoduché, pokud se jedná o zařízení pro ruční tisk. Důležité je hlavně, aby konstrukce byla pevná a aby rám se sítem byl neustále paralelně s podložkou. Také musí umožňovat nastavení vzdálenosti síta od podložky. Pokud se jedná o poloautomatické a automatické zařízení, je už značně komplikovanější, jelikož kromě výše uvedeného musí umožnit nastavení rychlosti a přítlaku těrky, přesné umístění motivu, snadnou výměnu rámců atd.

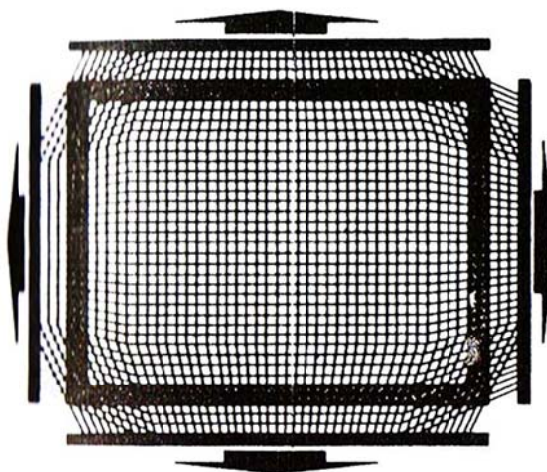
### 1.3.1.2 Síta

Sítová šablona vzniká napnutím síťoviny z nerezové oceli nebo polyesterových vláken na rám z hliníku nebo oceli, které odolávají tahu síťoviny lépe než dříve používané rámy ze dřeva. Hlavním úkolem rámu je udržet síto napnuté po celou dobu jeho životnosti. Důležitá vlastnost rámu je teplotní dilatace, která musí být co nejmenší. Rám také musí udržovat během mechanického namáhání přísnou rovinnost. Dále je důležitý poměr mezi velikostí rámu a tištěného motivu.

Správné napnutí tkaniny na rámu je hlavní předpoklad kvalitního tisku. Toho se docílí respektováním výrobcem doporučeného napětí, jeho rovnoměrností po celé tkanině a jeho stabilitou v čase. Za účelem splnění těchto požadavků byla vyvinuta řada zařízení, zejména s pneumatickým nebo mechanickým principem. Pro optimální napnutí tkaniny musí být zajištěno, aby byla tkanina napínána s vlákny rovnoběžnými s rámem, aby napětí bylo zvyšováno postupně minimálně během 15 minut, aby napětí bylo průběžně měřeno v obou osách a aby bylo síto přilepeno až po ustálení napětí cca po 15 minutách. Také musí být bráno v úvahu, že tkaniny časem podléhají různému poklesu napětí. Nejvíce napětí poklesne během prvních 4 hodin po napnutí a ustálí se až po cca 48 hodinách. Proto je

možné rámy používat až po jednom až dvou dnech po napnutí. Náčrt napínání síťoviny na rám je na obr. č. 3.

Obr. č. 3 Napínání síta [1]



Pro výrobu sít se používá monofilní polyesterová tkanina, VA – tkanina, metalizovaná monofilní polyesterová tkanina nebo monofilní nylonová tkanina. Výběr tkaniny se řídí podle požadavků na přesnost rozměrů, tloušťku tisku, jemnost motivu, ostrost obrazce, použitou pastu, velikost částic pasty a strukturu povrchu. Tloušťka tisku závisí na technických vlastnostech tkaniny, jako je počet vláken na cm, tloušťka vláken, velikost ok, volná plocha tkaniny nebo tloušťka tkaniny. Tloušťka a volná plocha tkaniny určuje přibližné množství spotřebované pasty. Na uvedených parametrech závisí jemnost čar a mezer, a proto se tkaniny dělí do tří kategorií. Buď má tkanina velikost oka větší než tloušťku vlákna, menší, nebo stejnou. Pro zajištění co nejideálnějšího průchodu pasty tkaninou, musí být velikost oka tkaniny nejméně 2,5 krát větší než je velikost částic pasty.

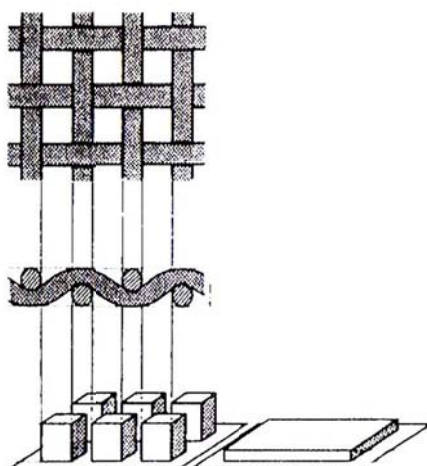
Monofilní polyesterová tkanina má dobrou pevnost v tahu a pružnost a navíc má dobrou rozměrovou stálost. VA – tkanina má ocelová vlákna, a proto má téměř nulovou pružnost, což ale na druhou stranu poskytuje vynikající rozměrovou stálost. Proto se musí při použití této tkaniny dávat pozor na správné nastavení vzdálenosti síta od podložky a přítlaku těrky, jinak bude výsledný motiv velice poruchový. Metalizovaná polyesterová tkanina je kompromis mezi vlastnostmi monofilní polyesterové tkaniny a VA – tkaniny. Je totiž pevnější než polyesterová tkanina ale pružnější než VA – tkanina. Protože ale

metalizovaná vlákna mají větší průměr, prochází sítím méně pasty a tím je výsledný motiv nižší. Toho se využívá u UV tvrditelných past.

### **1.3.1.3 Tisk**

Sítotisková stavba vrstvy má tři etapy. V první etapě se na substrát nanese kvádry pasty, jejichž rozměry jsou dány průměrem vláken, velikostí ok a tloušťkou tkaniny. V druhé etapě se tyto kvádry slejí do jedné vrstvy, čímž se celková výška sníží. Tento proces je nakreslen na obr. č. 4. Při kvalitním tisku a vhodné tekutosti pasty vznikne jediná vrstva bez mezer a bublin. Konečná tloušťka vrstvy tedy závisí na tekutosti pasty, tloušťce vláken, velikosti ok, tloušťce tkaniny a struktuře povrchu podložky. Tloušťka vrstvy se navíc ještě sníží o těkavé složky během sušení, což je třetí etapa.

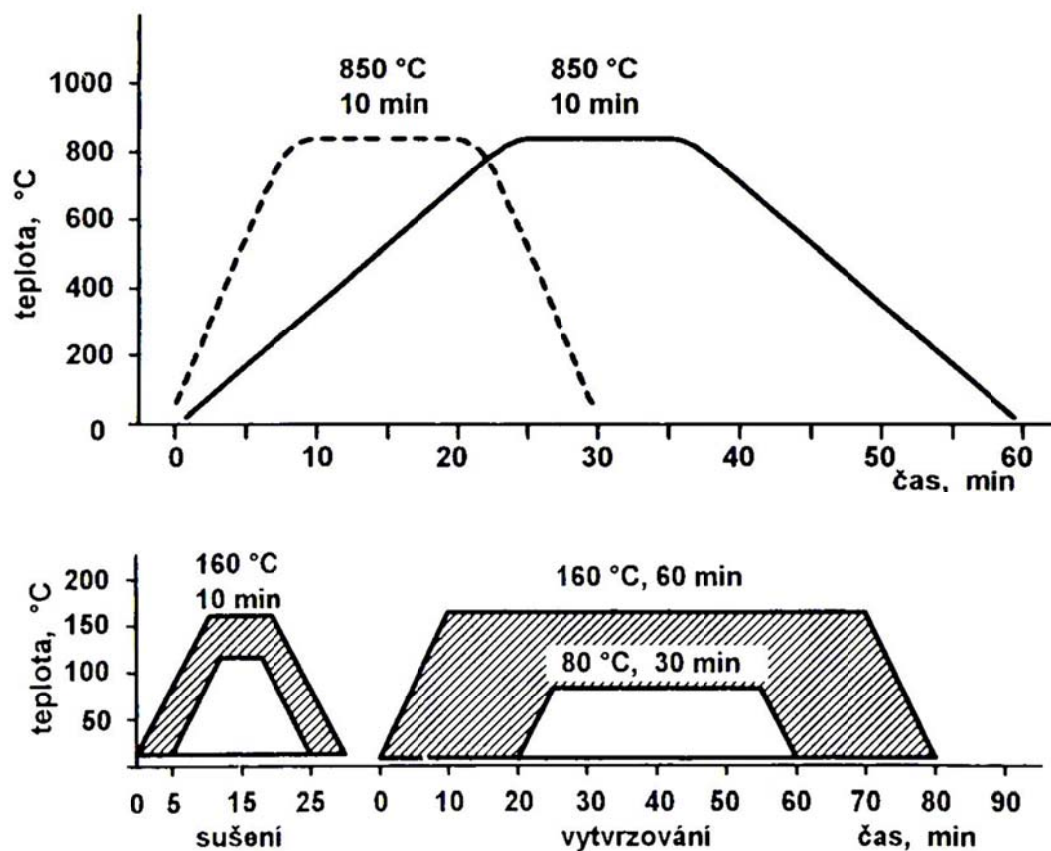
Obr. č. 4 Protlačení pasty na podložku [1]



### **1.3.1.4 Tepelné zpracování pasty**

Tepelné zpracování pasty závisí na typu pasty. Pasty jsou vypalovány buď v oxidační, redukční nebo oxidačně-redukční atmosféře. Nebo vypalovány nejsou a jsou jen vytvrzovány jako v případě polymerních past. Po natisknutí se pasty nejprve suší a teprve pak se vypalují, případně vytvrzují. Při výpalu vyhoří organická složka pasty. Dále měkne skleněná frit, čímž se vytvoří konečná struktura tlusté vrstvy a vazba s podložkou, a dojde k chemickým změnám funkční složky. Teploty výpalu jsou takové, aby nedocházelo k tavení složek, ale jen k jejich uvedení do plastického stavu. Na obr. č. 5 jsou uvedeny příklady používaných teplotních profilů.

Obr. č. 5 Teplotní profily zpracování tlustovrstvých past (nahore současně používaná anorganická pasta, dole polymerová pasta) [1]

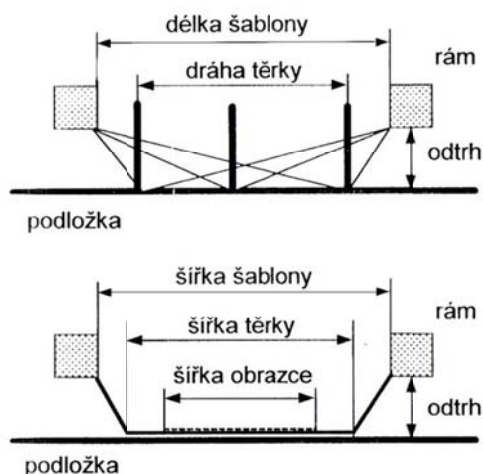


### 1.3.1.5 Přesnost tisku

Co se týče přesnosti rozměru tisku, ten závisí na několika parametrech. Důležitá je správná volba poměru rámu a obrazce, šířka a délka dráhy těrky, vzdálenost síta od podložky a zachování elasticity vláken síta, která může být porušena nadměrně velkým tlakem těrky nebo přílišným napnutím síta v rámu. Hranice elastického prodloužení je u každého typu vlákna jiná. U metalizovaného to je 2,5 %, u polyesterového 3 % a u VA 1 %. Minimální šíře čáry, která lze realizovat sítotiskem je cca 70 $\mu$ m. Konkrétní šíře čáry a kvalita jejích okrajů jsou dány počtem a průměrem vláken, velikostí ok a volnou plochou tkaniny. Kvalita motivu také závisí na úhlu směru vláken síta a motivu. Experimentálně bylo zjištěno, že optimální úhel natočení je 22,5°. Vedle plošných rozměrů motivu je také důležitá tloušťka vrstvy. Ta se odvíjí od použité tkaniny, její vzdálenosti od substrátu, pastě, tvrdosti, náklonu a rychlosti těrky, ale také na struktuře a nasákavosti podložky. Z těchto parametrů má na tloušťku největší vliv tkanina, jelikož množství spotřebované pasty závisí na průměru vláken a velikosti ok tkaniny.

Důležitou roli v ovlivnění kvality tisku má také vzdálenost síta od podložky, označovaná jako odtrh. Odtrh a míra napnutí síta ovlivňuje věrnost motivu na podložce. Při nanášení pasty na substrát tlak těrky prohne síto až na podložku a způsobí protlačení pasty na substrát v místě kontaktu. Malý nebo naopak velký odtrh znemožňuje kvalitní přenos motivu. Celkové prodloužení síta je závislé na velikosti odtrhu, délce šablony, tištěného motivu, posuvu těrky a šířce šablony, tištěného motivu a těrky. Postavení síta při tisku je na obr. č. 6. Vztah mezi tlakem těrky a velikostí odtrhu, abychom zajistili stejné podmínky, je  $P_2/h_2^2 = P_1/h_1^2$ , kde  $P$  je tlak na těrku a  $h$  je velikost odtrhu. Z toho vyplývá, že při dvojnásobném zvýšení odtrhu se nutný tlak na těrku zčtyřnásobí. Aby byly splněny požadavky na tvar a polohu motivu, je nutné dodržovat následující doporučení. Vždy nastavovat co nejmenší odtrh, snažit se, aby poměr mezi velikostí šablony a motivu byl co nejmenší a nenastavovat příliš velký tlak na těrku. Motiv se umísťuje centricky ve směru kolmém na pohyb těrky a v ose pohybu těrky je motiv umístěn blíže k místu nasazení těrky. Směr pohybu těrky je volen ve směru kratších stran šablony a pohyb těrky je vystředěn jak k ose tisku, tak k ose motivu.

Obr. č. 6 Schéma síta při tisku [1]



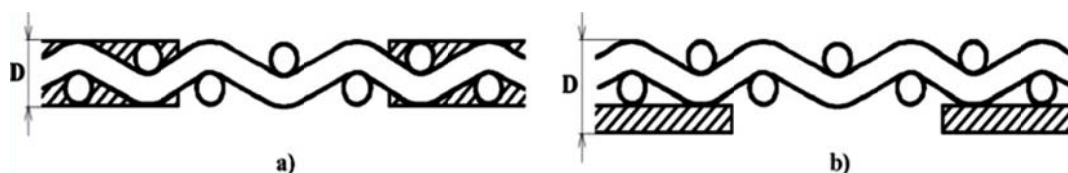
### 1.3.1.6 Šablony pro sítotisk

Šablony pro sítotisk se tvoří za pomoci fotocitlivé emulze, přičemž některá oka tkaniny zůstanou zaplněna emulzí a některá zůstanou prázdná, čili průchozí pro pastu. Používají se tři základní typy šablon. Přímá šablona se vytváří nanesením emulze přímo na oka sítě, expozicí a vyvíjením. Má nejdelší životnost, až 100 tisíc tisků. U nepřímé šablony je emulze ve formě listu a je exponována a vyvíjena před samotnou aplikací na síto. Tato



šablona má životnost 2 – 4 tisíce tisků. Kombinovaná šablona kombinuje přímou a nepřímou šablonu, čili emulze ve formě listu je aplikována na síto před expozicí a vyvíjením. Výhoda těchto šablon je, že emulze může vyplnit jen část oka tkaniny. Její životnost je 60 – 80 tisíc cyklů. Rozdíl mezi přímou a nepřímou šablonou je na obr. č. 7.

Obr. č. 7 *Přímá šablona (a) a nepřímá šablona (b) [2]*



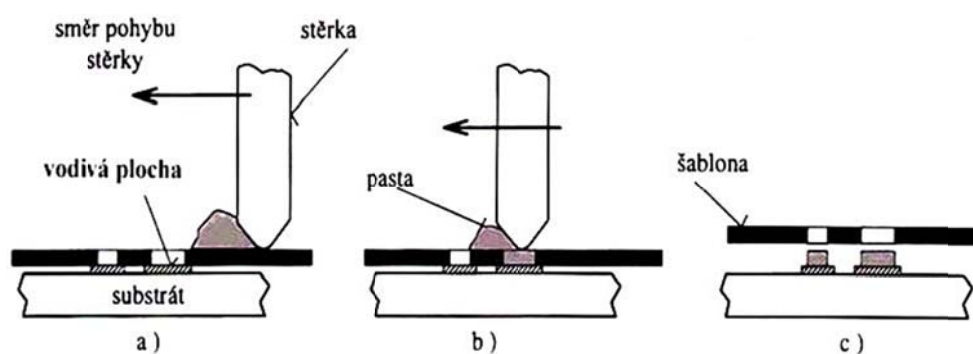
### 1.3.1.7 *Těrka*

Již několikrát byla v textu zmíněna těrka. To je nástroj, kterým je pasta roztírána po síti nebo šabloně a vtlačována do jejích otvorů. Je to deska opatřená břitem na spodní straně, jímž se pohybuje po síti či šabloně a je přitlačována předepsanou silou. Těrky se vyrábějí ze dvou základních materiálů, buď z pryže, nebo z kovu. Výběr materiálu závisí na vlastnostech pasty a šablony. Výhoda pryžové těrky je snadná a levná výroba a možnost použití pro víceúrovňové šablony a nerovné šablony. Nevýhoda je, že nabírají pastu z otvorů, a proto nejsou vhodné na šablony s velkými otvory. Kovové těrky pastu z otvorů nenabírají, poskytují velmi rovnou vrstvu tisku, není nutné na ně působit velkým tlakem a jsou velmi odolné proti poškození. Na druhou stranu jsou ale dražší a způsobují vyšší opotřebení šablon. Při používání těrky je důležitá rychlost jejího posuvu, její přítlak, kvalita povrchu a úhel náklonu vůči šabloně.

### 1.3.2 **Šablonový tisk**

V případě šablonového tisku není použito síto, ale fólie s otvory pro průchod pasty. To přináší odlišné vlastnosti. Fólie má lepší rozměrovou stabilitu, přesnost a odpadájí některé problémy s vytvářením obrazců, na druhou stranu má ale fólie nižší pružnost než síto. Tloušťka tisku je dána tloušťkou folie, která se přikládá přímo na podložku, takže zde je nulový odtrh. Odtrh je realizován nakonec, kdy se celá šablona zvedne z podložky. Princip šablonového tisku je na obr. č. 8.

Obr. č. 8 Schéma šablonového tisku [2]



Co se týče zařízení a techniky pro šablonový tisk, obojí je velmi podobné nebo stejné jako pro sítotisk. Zařízení jsou většinou konstruována tak, že zvládají obě tyto technologie.

### 1.3.2.1 Šablony pro šablonový tisk

Šablony se vyrábějí z mosazi, nerezové oceli, mědi, molybdenu a v posledních době se začíná i s použitím plastů. Nejvíce se používá mosaz z důvodu snadného leptání a možnosti volby tloušťky podle požadavků tisku. Někdy se pokovuje niklem, pro zlepšení kvality tisku, protože otvory jsou poté hladší a umožňují lepší průchod pasty na substrát. Otvory se většinou vytvářejí leptáním. Nerezová ocel je tvrdší než mosaz a šablony z ní mají delší životnost. Otvory se vytvářejí leptáním nebo se vyřezávají laserem. Měděné šablony se také leptají a kvůli nízké tvrdosti mědi se pokovují niklem. Niklové šablony se vyrábějí galvanoplasticky. Molybden se používal na výrobu šablon v USA kvůli snadné leptatelnosti, a protože umožňuje výrobu jemných motivů. Plastové šablony jsou novinka a zatím nemají širší uplatnění, vzhledem k jejich dobré pružnosti a nízké ceně se ale jejich další vývoj očekává.

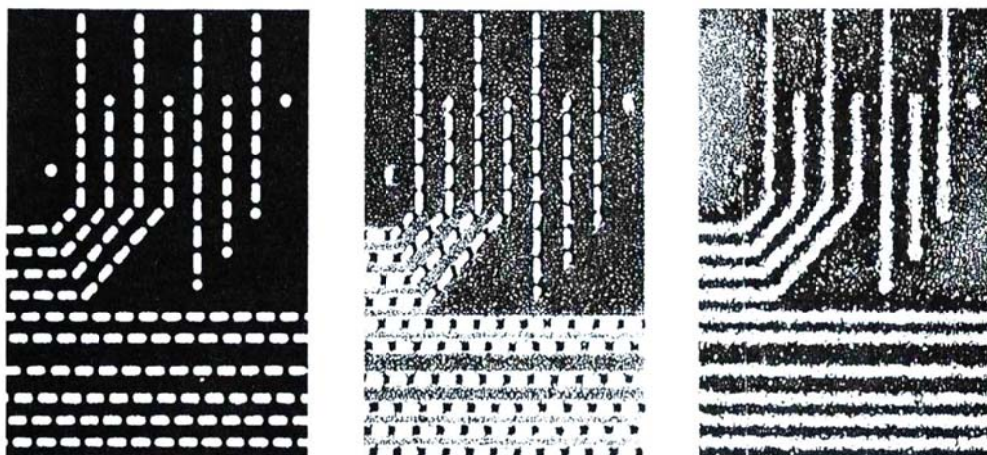
Šablony se tedy vyrábějí buď leptáním, řezáním laserem nebo galvanoplastikou. Leptání je velmi rozšířená a levná metoda. Šablony jsou leptány z obou stran současně a tím se ve středu tvoří zúžení, které může ztížit průchod pasty otvorem. Proto se otvory zpravidla nevytvářejí užší než 1,5 násobek tloušťky šablony. Šablona má většinou tloušťku 0,15 mm, tzn., že otvor by měl být velký minimálně 0,225 mm, a proto se tyto šablony nedají použít pro součástky s roztečí nožiček pod 0,4 mm. Řezání laserem je velice přesné a čím dál tím více konkuruje leptání. Přesnost a opakovatelnost rozměrů je lepší než u leptání a díky tomu, že řezání probíhá jen z jedné strany, nenastává zde zmiňovaný problém se zúžením. Nevýhoda však je, že laserová výroba šablony je dražší než u leptání, zvláště u větších

šablon. Řezání je použitelné pro součástky s roztečí pod 0,5 mm. Někdy se tyto dvě technologie kombinují. Velké otvory se rychle a levně vyleptají a potom se laserem vytvoří otvory malé a vyrovnají se nerovnosti po leptání. Při výrobě galvanoplastikou se šablona vyrábí nárůstem kovové vrstvy na podkladu z nerezové oceli, na které byly předem fotorezistem vytvořeny obrazce otvorů. Všude tam, kde není fotorezist, pak elektrolyticky narůstá kovová vrstva. Po dosažení požadované tloušťky se nerezový podklad oddělí a šablona je hotova. Zúžení stěn otvorů se tu projevuje jen málo a cena této metody je mezi leptáním a laserovým řezáním. Kovové šablony se usazují do litých nebo svařovaných rámců pro dobré uchycení šablony. Také lze šablonu upevnit do polyesterové nebo nylonové sítě a až ta je poté upevněna do rámu. To se praktikuje, pokud chceme zvýšit pružnost šablony. V poslední době se rozšiřuje bezrámová technologie, kdy se šablony neusazují do rámců, ale jsou uchyceny do tiskového zařízení speciálními držáky. To snižuje náklady a zjednodušuje výrobu.

### 1.3.3 Micro-Screen

Micro-Screen je speciálně vyvinutá metoda šablonového tisku, při kterém se používá jako šablona fólie z nerezové oceli. Do této fólie je leptána řada mikrootvorů, které tvoří předlohu. Na spodku šablony je ještě těsnicí vrstva z organického materiálu. Tato těsnicí vrstva umožňuje pastě téci po přesně daných plochách a zatékat tak do správných otvorů, viz obr. č. 8. Výhoda této metody je vysoké rozlišení výsledného obrazce (až 50  $\mu\text{m}$ ), který má i při tak malých rozměrech ostré ohraničení. Proto se tato metoda používá zejména v hybridních obvodech, v BGA čípech apod.

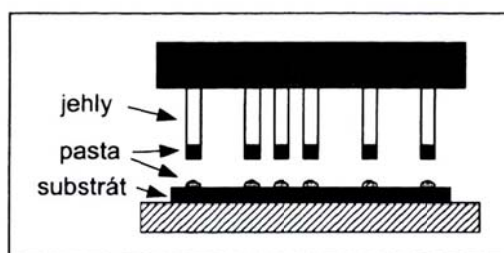
Obr. č. 9 *Micro-screen, vlevo nerezová fólie, uprostřed těsnicí vrstva, vpravo výsledný obrazec [1]*



### 1.3.4 Dispensing

Dispensing je metoda tvorby tlustovrstvých struktur, při které se na substrát pasta nanáší vytlačáním ze zásobníku nebo dotykem. To se provádí buď plnými, nebo dutými jehlami. Použití plných jehel je nejjednodušší způsob dispensingu. Plná jehla je ponořena do pasty, z které je přesunuta na substrát, kterého se dotkne v místě, kde se požaduje nanést pastu. Tím pasta steče na substrát a vytvoří plochu, která závisí na viskozitě pasty, tvaru jehly a hloubce ponoru jehly do pasty, čili na množství pasty, které bylo na jehle. Rychlost ani přesnost této metody není nijak velká, nicméně pro nenáročný přenos např. lepidla je dostačující. Rychlost se navíc dá zvýšit tzv. vícejehlovým polem, kde se nanáší více bodů najednou. Na obr. č. 10 je princip dispensingu plnou jehlou a také je na něm vidět vícejehlové pole.

Obr. č. 10 *Dispensing plnou jehlou [1]*

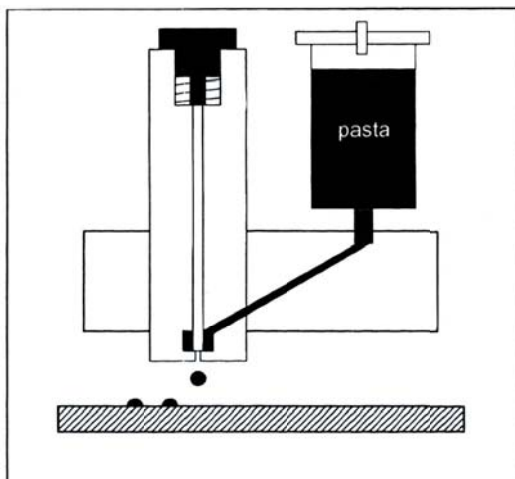


Častějším a rychlejším typem dispensingu je však nanášení pomocí duté jehly. Přitom se jehlou vytlačuje předem dané množství pasty. Kromě přesnosti umístění jsou důležitými parametry viskozita pasty a vzdálenost mezi jehlou a podložkou. Dnes nejpoužívanější technologie využívá zásobník pasty ve tvaru injekční stříkačky včetně jehly příslušné velikosti. Tento zásobník s jehlou se pohybuje programově řízeným mechanismem, případně ručně na požadované místo a tam vytlačí pastu. Pasta se vytlačuje ze zásobníku buď tlakem vzduchu pístové pumpy, nebo tlakem pístu se šroubovým posuvem. Rychlost nanášení se dá prakticky ovlivnit pouze dvěma způsoby. Buď zvýšením počtu současně pracujících hlav, nebo zvýšením rychlosti nanášení (tj. pohybu a vytlačování).

Pro zrychlení nanášecího procesu byl vyvinut bezkontaktní dispensing. Používá se zejména pro aplikaci lepidel při povrchové montáži. Jeho výhoda tkví v eliminaci jehel a v konstantní výšce vypouštěcího otvoru nad podložkou. Navíc je možné temperovat pastu v komoře a tím regulovat její viskozitu. Lepidlo se na podložku vypouští z výšky 1 až 3,5 mm a množství lepidla se řídí počtem vypuštěných dávek na jeden bod, obvykle 1 až 5.

Bezkontaktní dispensing je zobrazen na obr. č. 11. Použitím bezkontaktního dispensingu se zrychlí proces, odpadá používání jehel a zlepší se opakovatelnost o cca 5 % a tím se sníží i celkové náklady. Klasické jednohlavé poloautomatické systémy pracují s rychlostí 10 až 15 tisíc bodů za hodinu. Bezkontaktní systémy však pracují s rychlostí až 140 tisíc bodů za hodinu, což znamená cca desetinásobné zrychlení.

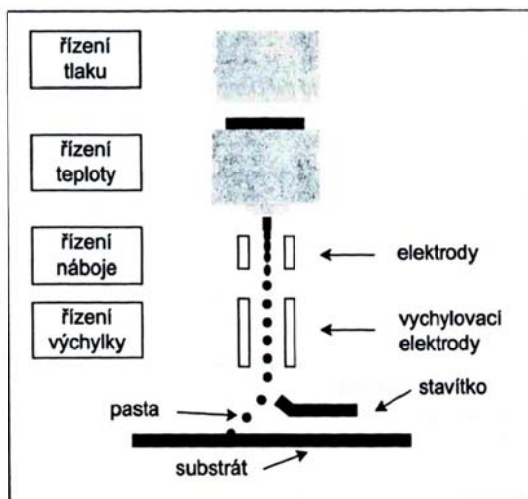
Obr. č. 11 Bezkontaktní dispensing [1]



### 1.3.5 Jetting

Jetting je složitější a dokonalejší metoda dispensingu. Zdokonalení spočívá v ovládnutí letu kapky pasty z dispenseru pomocí elektrického pole, jak lze vidět na obr. č. 12. Výhoda této technologie je v rychlosti a přesnosti nanášení a také v schopnosti ovrstvit velmi malé plošky. Toho se využívá např. při nanášení pájky na kontakty flip-chipů.

Obr. č. 12 Jetting [1]



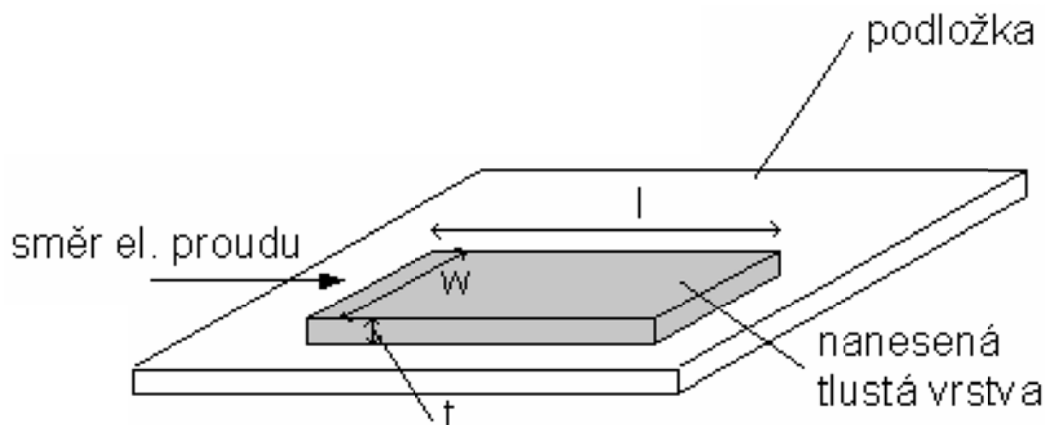
## 2 Parametry a kvalita tlustých vrstev

Je-li nutné zhodnotit kvalitu tlusté vrstvy, je potřeba vědět, podle jakého kritéria hodnotit. Kvalita vrstev je ovlivněna jednak použitou pastou, ale také postupem při nanášení a následném vypalování. U jednovrstvých struktur se posuzuje zejména měrný odpor, respektive rezistivita. U vícevrstevných struktur navíc přibývá kontaktní odpor mezi jednotlivými vrstvami. U vodivých vrstev je požadován co nejmenší měrný odpor, u tlustovrstvých rezistorů je požadováno, aby velikost měrného odporu byla co nejbližší k teoretické hodnotě vzhledem k rozměrům rezistoru. Co se týče kontaktního odporu, u toho je požadována vždy co nejmenší velikost. Rezistivita se spočte dle známého vzorce  $\rho = RS/l$ , kde  $\rho$  je rezistivita v  $\Omega/m$ ,  $R$  je odpor v ohmech,  $S$  je průřez vrstvy a  $l$  je délka vrstvy. U tlustých vrstev se však nepoužívá rezistivita, nýbrž jiná měrná veličina, tzv. odpor na čtverec. Fakta pro tuto kapitolu byla čerpána zejména z [5], [3] a [4].

### 2.1 Odpor na čtverec

Odpor na čtverec je velikost odporu čtvercové tlusté vrstvy za předpokladu, že tato vrstva má konstantní tloušťku. Nejčastěji se předpokládá tloušťka 10 – 20  $\mu m$ . Vztah pro jeho výpočet odpovídá názvu, tedy  $R_{\square} = R/\square = Rw/l$ , jednotkou je  $\Omega/\square$ . Z tohoto zápisu vyplývá, že počet čtverců odpovídá poměru délek stran vrstvy  $l/w$ . Pokud je tedy vrstva s rozměry  $w$  a  $l$ , kde  $w$  je šířka vrstvy a  $l$  je délka vrstvy, a pasta má definovaný odpor na čtverec  $R_{\square}$ , pak se její odpor spočítá  $R = R_{\square}l/w$ . Pro názornost je přiložen obr. č. 13.

Obr. č. 13 Značení rozměrů tlusté vrstvy [3]



Tento jednoduchý vztah však neplatí pro příliš tenké nebo naopak příliš široké vrstvy z důvodu, který bude zmíněn později.

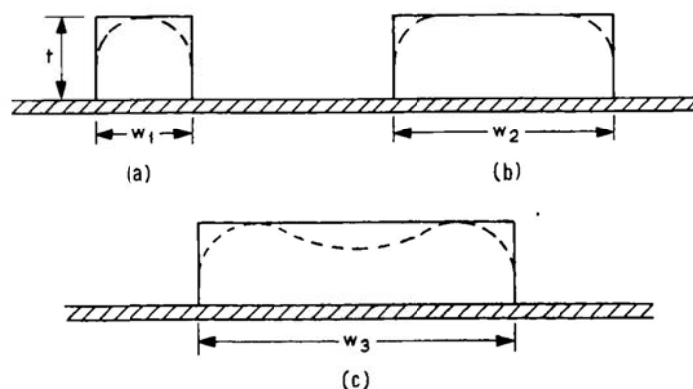
Jak bylo uvedeno výše, odpor na čtverec je platný pouze pro pevně danou konstantní tloušťku vrstvy. Proto někteří výrobci zavedli jednotku jinou, a to  $\Omega/\square.\text{mil}$ , kde mil je anglická jednotka reprezentující tisícinu palce. Pak platí vztah pro odpor vrstvy  $R = R_{\square}/wt$ , kde  $t$  je tloušťka dané vrstvy,  $w$  a  $l$  mají stejný význam jako v předešlém vztahu.  $R_{\square}$  je v tomto vztahu však zmíněný odpor na čtverec a mil. Ze vzorce také vyplývá, že odpor s rostoucí tloušťkou klesá. To není nic překvapivého, pro představu to je analogické ke dvěma rezistorům zapojených paralelně. Výpočtu, který obsahuje tloušťku, se lze vyhnout použitím tiskové metody, která zachovává konstantní tloušťku vrstvy.

Na trhu jsou k dispozici odporové pasty s plošným odporem od méně než 10 ohmů na čtverec až po více než 10 megaohmů na čtverec. Dle nabídky firmy DuPont jsou však k dostání speciální pasty, které dosahují ještě nižších odporů – až 0,06 ohmů na čtverec [6]. Teplotní koeficient odporu se pohybuje od méně než  $\pm 50$  ppm/ $^{\circ}\text{C}$  do  $\pm 300$  ppm/ $^{\circ}\text{C}$ . Mění se od kladné hodnoty pro nízkoodporové pasty přes nulu k záporné hodnotě pro vysokoodporové pasty, kde reprezentuje přechod z kovového na polovodičový charakter.

## 2.2 Vliv rozměrů na parametry vrstvy

Návrh rezistoru pro přesně danou hodnotu odporu je komplikován odchylkami od nominálního plošného odporu, způsobených šířkou nebo délkou vrstvy. Vliv šířky rezistoru je zobrazen na obr. č. 14.

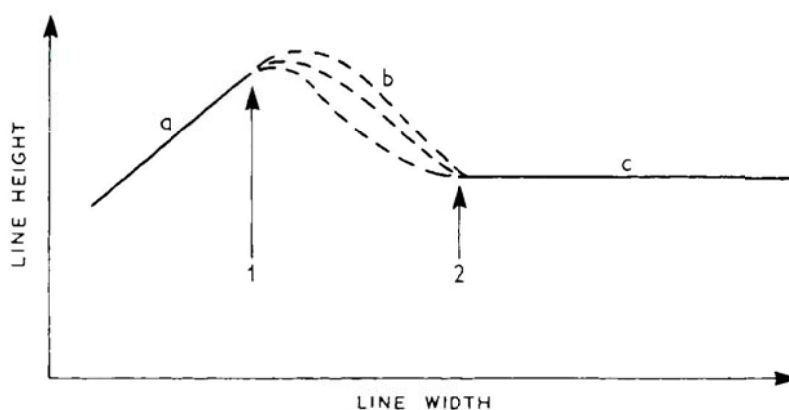
Obr. č. 14 Vliv délky rezistoru na jeho tvar [5]



Plná čára zde znázorňuje ideální obdélníkový tvar vrstvy. Čárkovaná čára reprezentuje skutečný tvar vrstvy, který závisí na faktorech zmíněných v odstavci 1.3.1.5, ale také na dosud nezmíněných faktorech jako je zadržování pasty na hranách tiskového vzoru nebo

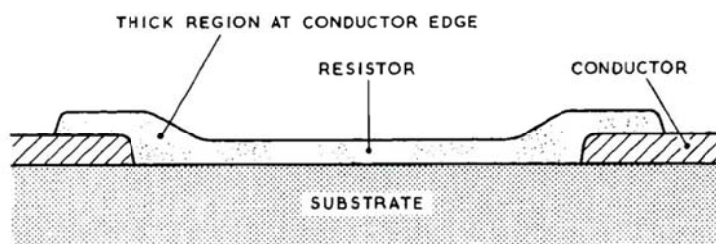
prohýbání šablony během tisku širokých vrstev. Efekt zadržování pasty je nejčastěji viditelný u vrstev s malou šířkou, tedy méně než 0,5 mm. Na obr. č. 15 je znázorněna závislost tloušťky vrstvy na její šířce.

Obr. č. 15 Závislost tloušťky vrstvy na její šířce. Významný bod 1 se nachází cca mezi šířkou 0,375 až 0,5 mm a bod 2 cca v šířce 1 mm. [5]



Na grafu jsou vidět dva různé úkazy. U vrstev s malou šířkou se s klesající šířkou plošný odpor zvyšuje a u vrstev s velkou šířkou se s rostoucí šířkou plošný odpor také zvyšuje. Rozsah šířek, kde k výskytu těchto dvou jevů nastává, je závislý jednak na hustotě síta, použité emulzi a také na reologii použité pasty. Pokud je kontakt rezistor-vodič dokonalý, tzn., že kontakt má malý kontaktní odpor, pak bude u krátkých rezistorů patrný malý pokles odporu. Na obr. č. 16 je znázorněno, jak vypadá podélný průřez rezistorem a tedy proč dochází ke zmíněnému poklesu odporu.

Obr. č. 16 Podélný řez rezistorem [5]

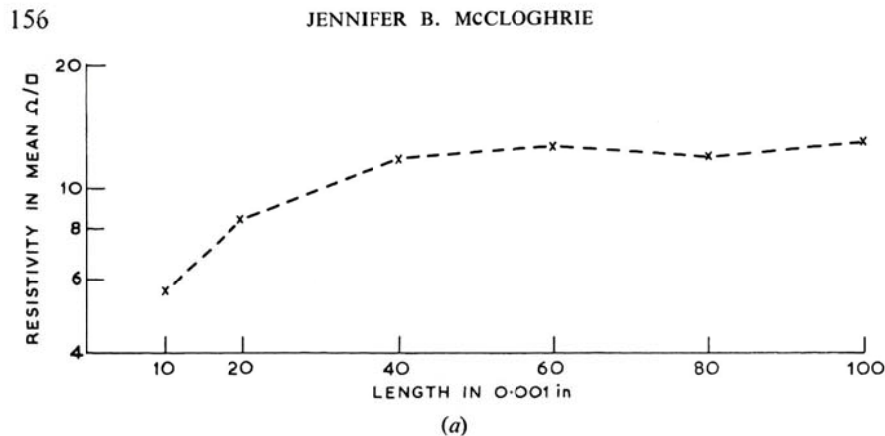


Lze si všimnout, že v oblasti kontaktů je lokálně zvýšená tloušťka vrstvy, proto se tento jev projevuje zejména u rezistorů s malou délkou. Tomuto jevu je však možné se vyhnout, a to použitím takové odporové pasty, která může být natištěna dříve než pasta vodivá. Na obr. č. 17 je vynesena závislost plošného odporu na délce rezistoru. Pokud by se neprojevovaly



žádné jevy související s délkou rezistoru, byla by závislostí konstantní hodnota odporu. Na reálné závislosti je však vidět, že délkové jevy v oblasti zakončení rezistoru zvyšují či zmenšují výsledný odpor krátkých rezistorů.

Obr. č. 17 Závislost plošného odporu rezistoru na jeho délce [1]

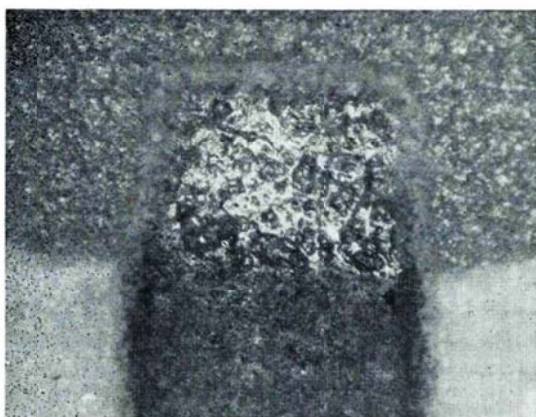


### 2.3 Jevy na rozhraní rezistor – vodič

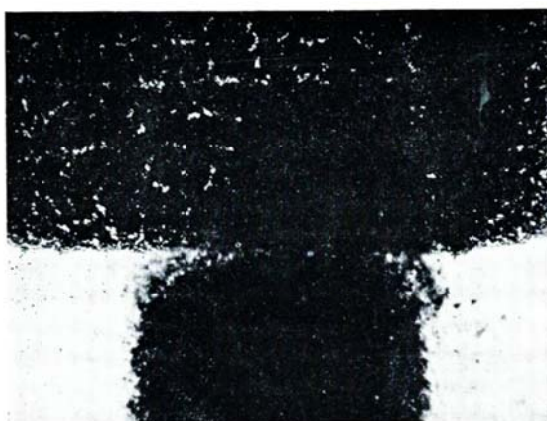
Existuje několik základních důvodů, proč nelze dosáhnout požadovaného nízkého kontaktního odporu na rozhraní rezistor-vodič, který by měl být v dokonale kompatibilním systému rezistor-vodič.

1. Mohou vznikat chemické reakce mezi materiálem odporové a vodivé vrstvy. Tato reakce může nastat buď mezi aktivními složkami past, nebo skelnými složkami použitými při jejich vytváření. Tyto vzájemné nekompatibility složek se projevují hlavně až po vypálení a někdy mohou být vizuálně pozorovány jako bubláni v místě překryvu vrstev, rozmazání vodivé vrstvy v blízkosti rezistoru nebo jako úbytek odporové pasty v oblasti rozhraní. Tyto jevy jsou zaznamenány na obr. č. 18 a obr. č. 19.

Obr. č. 18 *Bublání v místě překryvu vrstev [5]*



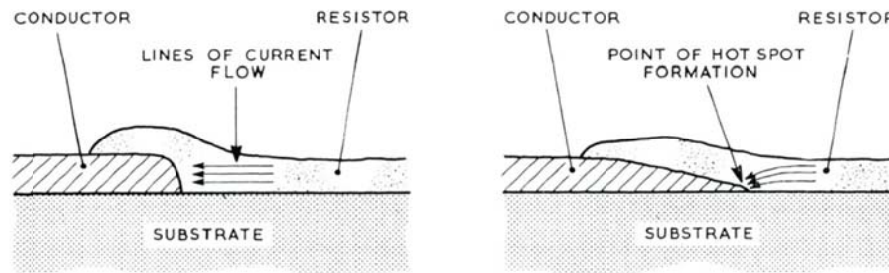
Obr. č. 19 *Úbytek odporové pasty v oblasti rozhraní [5]*



2. Mohou se objevovat mikrotrhliny v oblasti rozhraní vlivem nedostatku odpovídajících fyzikálních parametrů dvou materiálů, jako např. přílišný rozdíl mezi koeficienty roztažnosti nebo vlivem změny objemu při reakcích na rozhraní.
3. Může se vytvořit částečná nebo úplná izolační vrstva v některé fázi procesu, např. pokud zoxiduje povrch vodivého materiálu před tím, než je na něj natisknut a vypálen rezistor. Tato skutečnost nutí téct proud skrz pár plošek, které mají vodivost vyšší, ovšem jejich plocha je pouze zlomkem plochy celého kontaktu. Tím vzrůstá v těchto ploškách vyšší proudová hustota, která má za následek přetěžování a zahřívání takového místa.
4. Pokud je velký rozdíl mezi rezistivitou vrstvy odporové a vodivé, může dojít k tzv. zmáčknutí proudu, tzn., že veškerý proud teče z rezistorové vrstvy do vodivé vrstvy skrz její čelní hranu místo toho, aby proud tekla rovnoměrně skrz

celou plochu kontaktu. Pro představu je nákres situace na obr. č. 20. Tomuto jevu se nelze vyhnout, ovšem nepůsobí problémy, pokud čelní hrana vodivé vrstvy není příliš tenká. Pokud by byla příliš tenká, dojde k místnímu vysokému ohřevu vrstvy.

Obr. č. 20 Situace, kdy nastává zmáčknutí proudu. Vpravo navíc ukázka místa zahřívání. [5]

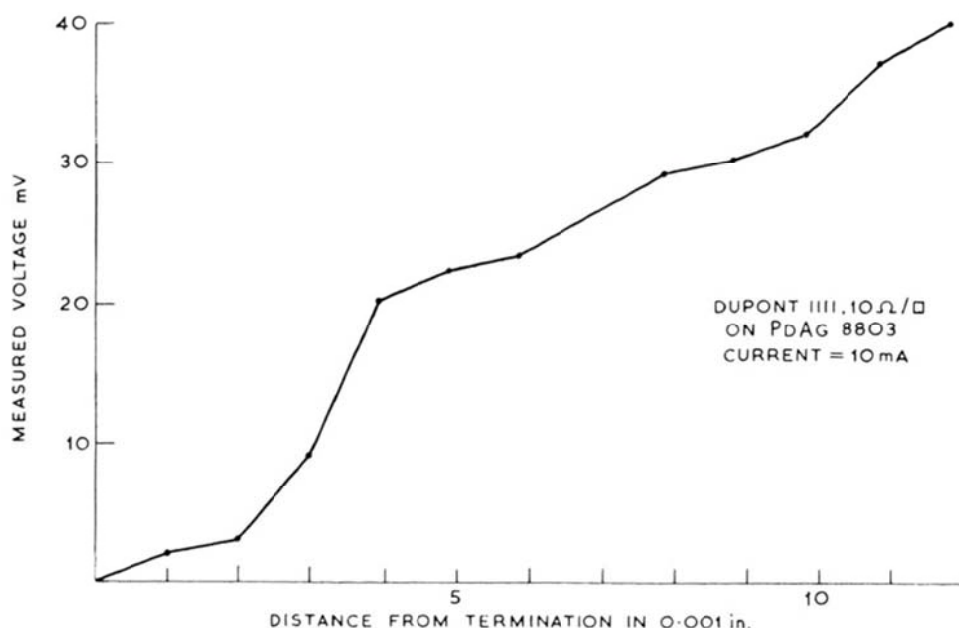


5. Může se vyskytnout difúze kovových částic z vodivé vrstvy do odporové a naopak, zejména pokud je obvod skladován při zvýšené teplotě po delší dobu. Tento jev převládá u obvodů na bázi stříbra, ale může se objevit i u obvodů se zlatem. Běžný jev je přetečení kovových atomů, což má za následek snížení odporu rezistoru v okolí zakončení a tím vzniká tzv. negativní kontaktní odpor.

Problémy s kontaktem mohou být pozorovány mikroskopicky nebo elektricky. Ovšem vzhled může být zavádějící a i dobře vypadající kontakt nemusí být z elektrického hlediska v pořádku. Obecně vzato, i když se elektrické zkoušky kontaktu jeví jako přijatelné, vzhledové deformace mohou vést k pochybnostem ohledně dlouhodobé spolehlivosti.

Další metodou jak zjistit problémy v místě kontaktu je sledování rozložení napětí na rezistoru v místě jeho zakončení. Výsledkem může být detailnější obrázek o ovlivňujících faktorech a ukáže se zmáčknutí proudu nebo odporové anomálie vlivem difúze. Příklad grafu z takového měření je na obr. č. 21.

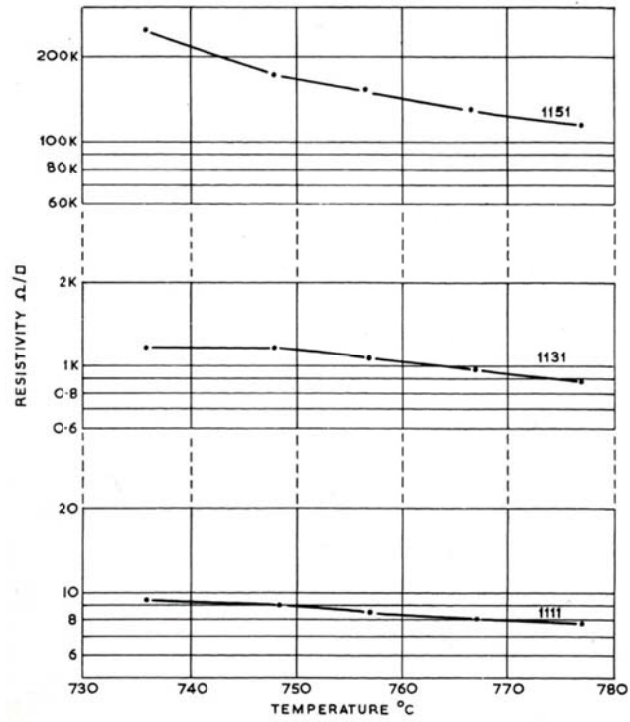
Obr. č. 21 Závislost znázorňující rozložení napětí na rezistoru v závislosti na vzdálenosti od zakončení [5]



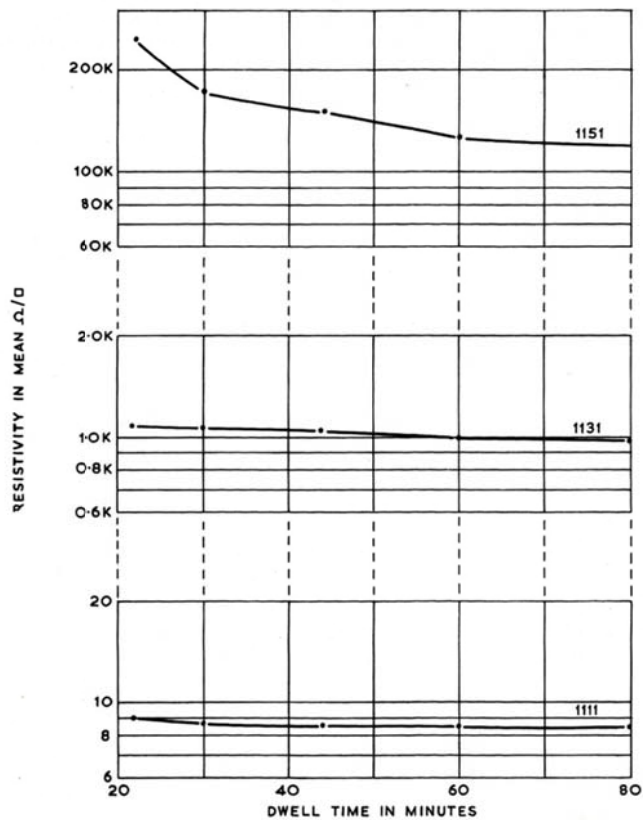
Obecně systémy rezistor-vodič doporučené výrobcí jsou podrobovány vyčerpávajícímu testování a špatné výsledky s těmito standardními systémy jsou většinou způsobeny vlivem nevhodného výrobního procesu než materiálu samotného. Kombinace odporové pasty od jednoho výrobce s vodivou pastou od výrobce jiného obecně nejsou doporučovány, ačkoli některé takové kombinace jsou úspěšně používány.

Vlastnosti kontaktu jsou ovlivněny i vypalovací teplotou a dobou. Pokud se nedodrží postupy doporučené výrobcem, rezistivita vrstev se může rapidně změnit a to má samozřejmě za následek i změnu na rozhraní rezistor-vodič. Vliv vypalovací teploty na rezistivitu je na obr. č. 22. Vliv doby výpalu na rezistivitu je na obr. č. 23.

Obr. č. 22 Závislost výsledného plošného odporu rezistoru na špičkové vypalovací teplotě pro tři různé typy past. [5]



Obr. č. 23 Závislost výsledného plošného odporu rezistoru na době vypalování pro tři různé typy past. [5]



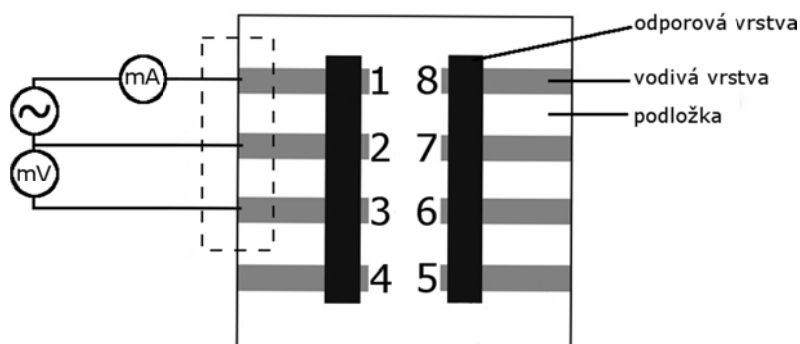
### 3 Tvorba tlustovrstvých struktur a jejich měření

Tato kapitola je zaměřena na praktickou část práce. Jak vyplývá ze zadání, při jejím vypracování bylo potřeba vykonat dvě věci. Nejdříve připravit vzorky vodivých a odporových vrstevových struktur a následně tyto vzorky podrobit měření. Měření bylo zaměřeno na kontaktní odpor na rozhraní odporové a vodivé vrstvy. Kontaktní odpor mezi vrstvami závisí na použitých pastách, jejich viskozitě, způsobu sušení a vypalování a mnoha dalších. Kontaktnímu odporu se mimo jiné věnovala kapitola 2. V tomto měření se měřil kontaktní odpor v závislosti na geometrii kontaktu, velikosti procházejícího proudu a jeho frekvenci. Je tedy zřejmé, že k měření byl využit střídavý proud se sinusovým průběhem, proto všechny hodnoty proudu a napětí v této kapitole jsou hodnoty efektivní. Měření bylo prováděno třibodovou měřicí metodou.

#### 3.1 Třibodová měřicí metoda

Třibodová měřicí metoda se využívá v elektrotechnice zejména pro měření kontaktního odporu. Hodnota kontaktního odporu je totiž základní veličina, která určuje kvalitu kontaktu, a proto při diagnostice slouží pro odhalení špatných a nespolehlivých spojů, např. tzv. studených kontaktů. Třibodová metoda měření kontaktního odporu principiálně spočívá v protékání proudu kontaktem a měření úbytku napětí na kontaktu, který tento proud vyvolává. U tlustovrstvých struktur je na dvě vodivé vrstvy, které jsou odděleny vrstvou odporovou, připojen zdroj proudu, respektive zdroj napětí s rezistorem (rezistor zdroj chrání před zkratem při neopatrné manipulaci se vzorky). Tím přes vodivé vrstvy a odporovou vrstvu protéká proud  $I$ . Zároveň je měřeno napětí  $U$  mezi jednou z těchto vodivých vrstev a jinou vodivou vrstvou, která je od ostatních také oddělena odporovou vrstvou. Pokud je tedy znám proud  $I$  a úbytek napětí  $U$ , který tento proud vyvolává, kontaktní odpor na rozhraní vodivé a odporové vrstvy se spočte velmi snadno z Ohmova zákona  $R_k = U/I$ . Princip a schéma zapojení je na obr. č. 24.

Obr. č. 24 Zapojení při tříbodové měřící metodě, čárkovaný obdélník označuje místo připojení vzorku k měřicímu obvodu pomocí přípravku z odstavce 3.4.1

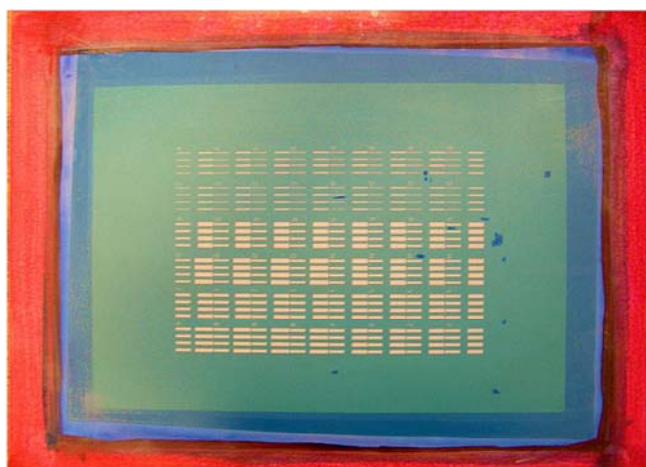


## 3.2 Tvorba vzorků

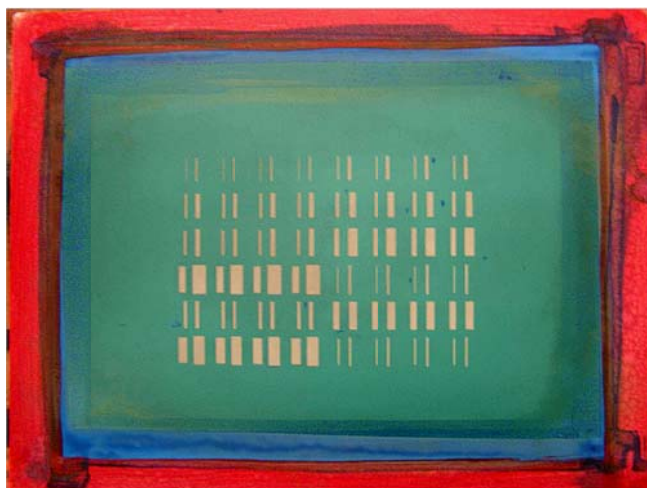
### 3.2.1 Síta

Pro tvorbu požadovaných vícevrstevých struktur byla zapotřebí dvě síta. Jedno síto pro natisknutí vodivých cest a druhé pro natisknutí rezistorů. Byla použita síta, která navrhl Filip Slovák v roce 2007 pro svou bakalářskou práci. Pro výrobu těchto sít byla použita polyesterová tkanina. Úhel natočení vláken od motivu je u síta pro vodivé cesty  $22,5^\circ$  a pro odporové vrstvy  $30^\circ$ . Co se týče rámu, ten je vyroben z lehké a pevné slitiny a zaručuje konstantní dlouhodobé napnutí síťoviny. Níže jsou uvedeny fotografie jednotlivých sít. Na obr. č. 25 je síto pro vodivé vrstvy a na obr. č. 26 je síto pro vrstvy odporové. Návrh výsledného motivu po natisknutí obou vrstev je na obr. č. 27, svislé cesty jsou vodivé a vodorovné jsou odporové. Rozměry jednotlivých vzorků budou uvedeny v podkapitole 3.3.

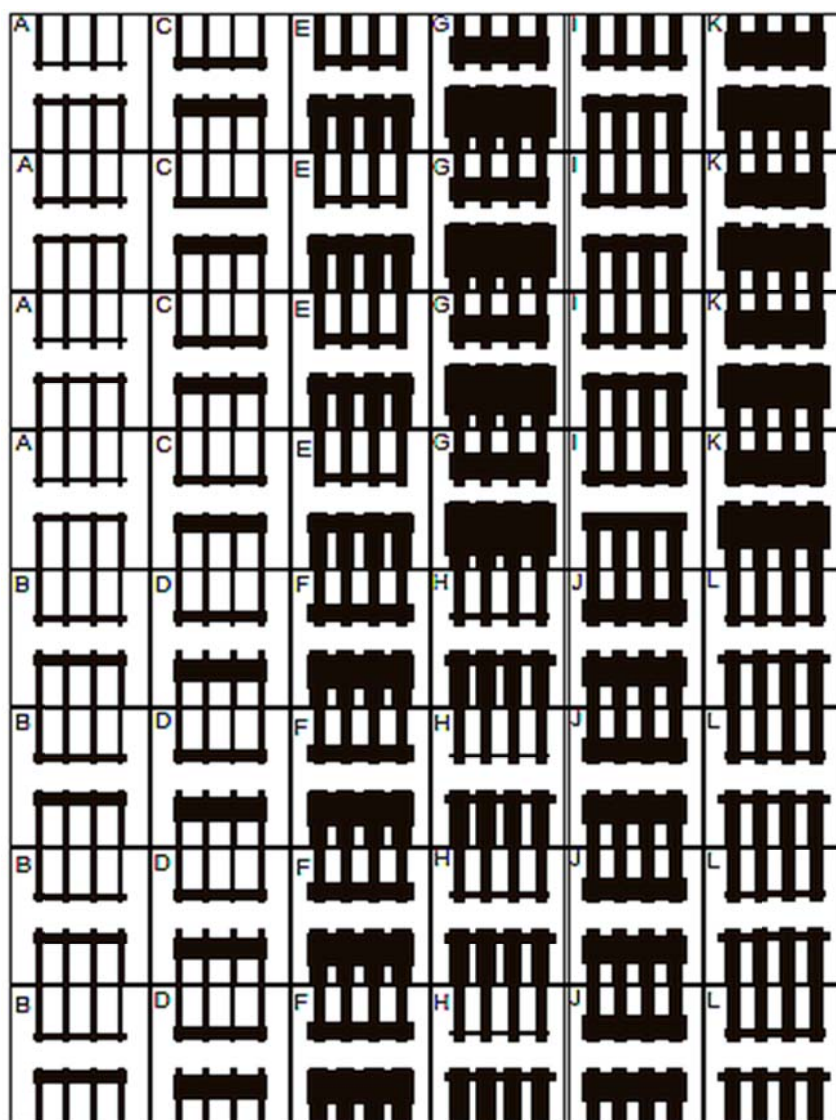
Obr. č. 25 Síto pro vodivé vrstvy [3]



Obr. č. 26 Síto pro odporové vrstvy [3]



Obr. č. 27 Návrh motivu vícevrstvých struktur [3]





### **3.2.2 Podložky pro vrstvy**

Jako podložky byly použity destičky z korundové keramiky. Tyto podložky měly rozměry odpovídající návrhu vzorků, tedy 25 x 25 mm při tloušťce 0,4 mm. Destičky byly pro tisk pospojovány zesponu lepící páskou tak, aby jejich rozložení korespondovalo s motivy na sítěch, čili byly poskládány do tabulky o rozměrech 6 x 8 destiček.

### **3.2.3 Tlustovrstvé pasty**

#### **3.2.3.1 Vodivá pasta**

Pro vytvoření vodivých cest byla použita pasta s označením CSP-3110D. Funkční složkou je v této pastě stříbro. Výrobce uvedená hodnota rezistivity je  $5 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ . Výrobce také udává doporučený postup při sušení a to 20 minut sušit v peci při teplotě 130 °C.

#### **3.2.3.2 Odporová pasta**

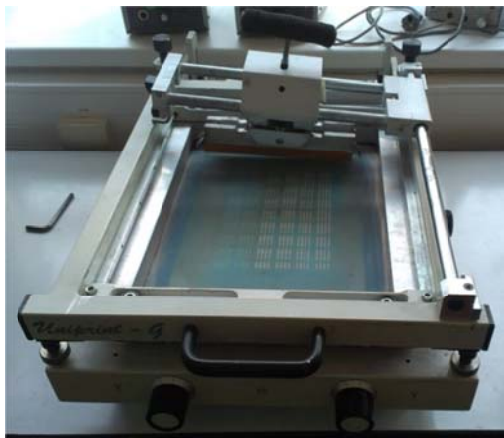
Pro následné vytvoření odporových cest byla použita pasta s označením CSP-3225. V tomto případě se jedná o odporovou pastu, kde jako funkční složka vystupuje uhlík. Výrobce udávaná rezistivita má hodnotu 0,1  $\Omega \cdot \text{cm}$ . Doporučený postup sušení zní 2 až 3 minuty pastu sušit při 120 °C v infračervené peci a následně sušit 30 minut při 130 °C v obyčejné peci.

### **3.2.4 Tisk**

Tisk vzorků byl realizován ručním sítotiskovým zařízením Uniprint – G, které je vyfotografováno na obr. č. 28. Jedná se o zařízení stavebnicové koncepce určené pro tisk pájecích past, lepidel, nepájivých masek a jiných materiálů v elektrotechnické výrobě. Zařízení má tiskový stůl s posuvem  $\pm 5 \text{ mm}$  v X a Y osách a naklápěním  $\pm 2,5^\circ$  osy Z. Tiskový stůl je také vybaven vakuovým přídržným systémem pro zafixování podložek. Stůl je děrovaný a zesponu se k němu připojuje vysavač, který na stole vytváří požadovaný podtlak. Síto je k výklopnému víku připevněno čtyřmi šrouby. Sladění motivu na sítu a podložek se provádí pomocí mylarové fólie, viz obr. č. 29. Na tu se provede první tisk a poté se pomocí posuvu stolu podložky zarovnají s natisknutým motivem. Po vyjmutí mylarové fólie se provede tisk na podložky. Námi použité zařízení je vybaveno vedenou hlavou se sestavou dvou těrek, takže zařízení umožňuje tisk oběma směry a zaručuje konstantní sklon a přítlak těrky. Pro kvalitní tisk je zapotřebí motiv přejet těrkou alespoň

dvakrát, v tomto případě tedy „tam a zpět“. Po natisknutí je třeba síta vymýt, nejlépe speciálním ředidlem, které nepoškodí emulzi motivu, ale lze se spokojit i s acetonem, jako v našem případě. Více o zařízení Uniprint lze nalézt např. v [10].

*Obr. č. 28 Tiskové zařízení Uniprint – G*



*Obr. č. 29 Mylarová fólie*

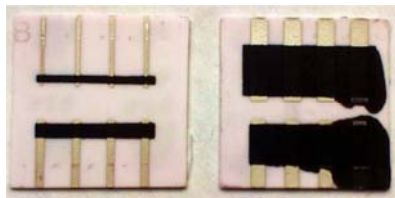


### **3.2.5 Sušení**

Po natisknutí vodivé pasty byla tabulka podložek položena na kovový plech a ten byl vložen do pece, kde byla pasta sušena dle doporučení výrobce, viz odstavec 3.2.3.1. Po sušení a vychladnutí podložek byla natištěna odporová pasta, která byla opět sušena v pícce dle odstavce 3.2.3.2, ovšem bylo vynecháno předsušení v IR peci. Vzorky po druhém sušení jsou na obr. č. 30. Vzorok vlevo je v pořádku, u vzorku vpravo lze vidět

extrémní rozlité odporové pasty. To může být způsobeno např. nedokonalým vychladnutím podložky.

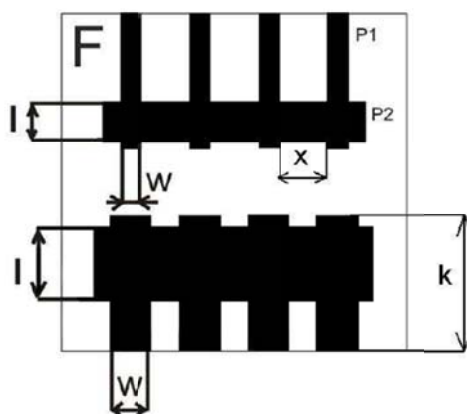
Obr. č. 30 Výsledné vzorky – vlevo dobrý, vpravo špatný



### 3.3 Rozměry vzorků a jejich značení

Každý vzorek je označen písmenem A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K nebo L. Na každém vzorku jsou dvě řady po čtyřech příčných vodivých vrstvách. Přes každou řadu je pak natisknuta podélná odporová vrstva. Vodivé vrstvy jsou u všech vzorků kromě G a K dlouhé 10 mm, u G a K jsou spodní vodivé vrstvy dlouhé 12 mm. Střední vzdálenost mezi vodivými vrstvami je u všech vzorků 5 mm. Na každém vzorku jsou dvě různé kombinace rozměrů odporových a vodivých vrstev, přičemž každá kombinace je tedy na jednom vzorku čtyřikrát. Na sítu je každý vzorek také čtyřikrát, čili celkem je k dispozici každá kombinace šestnáctkrát. Měřicí přípravek však dokáže měřit kontaktní odpor pouze vnitřních kontaktů, viz odstavec 3.4.1. Z toho vyplývá, že k měření je každá kombinace rozměrů k dispozici osmkrát za předpokladu, že všechny vzorky jsou použitelné. Rozměry jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tab. č. 1, kde horní polovina vzorku má index H a dolní polovina má index D. Horní polovina je ta, vedle které je natištěno písmeno označující vzorek. Nejdůležitějšími rozměry jsou pro nás rozměry překryvu vrstev. Šířka vodivé vrstvy je označena jako  $w$ . Šířka odporové vrstvy zde vystupuje jako délka překryvu, proto je označena  $l$ . Překryv má tedy rozměry  $w$  a  $l$ . Kromě absolutní velikosti překryvu se můžeme zaměřit i na poměr délky a šířky překryvu  $l/w$ . Tento poměr se nazývá počet čtverců a lze se s ním setkat u plošného odporu, viz podkapitola 2.1. Schéma a značení rozměrů vzorků je na obr. č. 31.

Obr. č. 31 Značení rozměrů vzorků [3]



Tab. č. 1 Tabulka rozměrů jednotlivých konfigurací, hodnoty byly převzaty z [3]

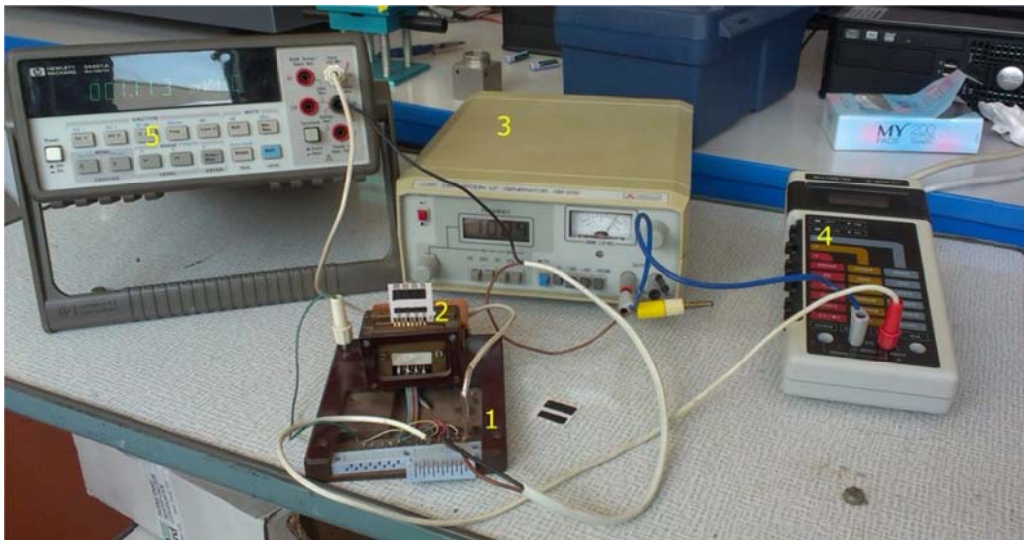
vzorek	l [mm]	w [mm]	l/w [-]	x [mm]	k [mm]	vzorek	l [mm]	w [mm]	l/w [-]	x [mm]	k [mm]
A <sub>H</sub>	0,50	0,5	1,0	4,5	10	A <sub>D</sub>	1,0	1,0	1,0	4,0	10
B <sub>H</sub>	1,00	0,5	2,0	4,5	10	B <sub>D</sub>	2,0	1,0	2,0	4,0	10
C <sub>H</sub>	1,50	0,5	3,0	4,5	10	C <sub>D</sub>	3,0	1,0	3,0	4,0	10
D <sub>H</sub>	2,00	0,5	4,0	4,5	10	D <sub>D</sub>	4,0	1,0	4,0	4,0	10
E <sub>H</sub>	1,50	1,5	1,0	3,5	10	E <sub>D</sub>	3,0	3,0	1,0	2,0	10
F <sub>H</sub>	3,00	1,5	2,0	3,5	10	F <sub>D</sub>	6,0	3,0	2,0	2,0	10
G <sub>H</sub>	4,50	1,5	3,0	3,5	10	G <sub>D</sub>	9,0	3,0	3,0	2,0	12
H <sub>H</sub>	0,75	1,5	0,5	3,5	10	H <sub>D</sub>	1,5	3,0	0,5	2,0	10
I <sub>H</sub>	2,00	2,0	1,0	3,0	10	I <sub>D</sub>	2,5	2,5	1,0	2,5	10
J <sub>H</sub>	4,00	2,0	2,0	3,0	10	J <sub>D</sub>	5,0	2,5	2,0	2,5	10
K <sub>H</sub>	6,00	2,0	3,0	3,0	10	K <sub>D</sub>	7,5	2,5	3,0	2,5	12
L <sub>H</sub>	1,00	2,0	0,5	3,0	10	L <sub>D</sub>	1,25	2,5	0,5	2,5	10

### 3.4 Měření vzorků

Samotné měření vzorků probíhalo v laboratoři H124, přičemž byly měřeny pouze vzorky, které opticky nevykazovaly příliš velké odchylky od požadovaného tvaru motivu. Zapojení pracoviště je na obr. č. 32 a odpovídá schématu na obr. č. 24. Jak již bylo napsáno v úvodu kapitoly 3, pro měření byla využita tříbodová měřicí metoda, kterou umožňuje k tomu uzpůsobený měřicí přípravek (1). Jeho pomocí bylo mezi dvě vodivé vrstvy vzorku (2) přivedeno napětí z frekvenčního generátoru (3), které vyvolávalo tok proudu skrz obvod. Velikost protékajícího proudu byla měřena ručním digitálním multimetrem (4). Následně byl měřen úbytek napětí, který tento proud vyvolal na kontaktu mezi vodivou a odporovou vrstvou. Stolní digitální multimetr (5) měřící tento úbytek byl zapojen mezi jednu vodivou vrstvu, která byla připojena na výstup frekvenčního generátoru, a vodivou vrstvu jinou, nezapojenou. Toto měření bylo zaměřeno na měření

kontaktního odporu při dvou různých velikostech proudu a při dvou různých frekvencích napájecího napětí, respektive proudu. Efektivní hodnoty proudu byly stanoveny na 3 a 6 mA a hodnoty frekvence na 1 a 50 kHz. Obě veličiny byly nastavovány přímo na frekvenčním generátoru. Celkem byly tedy naměřeny čtyři různé hodnoty kontaktního odporu pro každý kontakt mezi vrstvami. Po proměření jednoho kontaktu byl vzorek posunut o jednu polohu v měřicím přípravku a měření bylo opakováno. To samé bylo provedeno na druhé polovině vzorku.

Obr. č. 32 Zapojení měřicího pracoviště, 1 – měřící přípravek, 2 – měřený vzorek, 3 – frekvenční generátor Promax GB – 212, 4 – digitální multimetr G-1004.501, 5 – digitální multimetr HP 34401A



### 3.4.1 Měřící přípravek

Měřící přípravek zobrazený na obr. č. 33 umožňuje pevnou fixaci vzorku při měření a zaručuje dokonalý přitlak měděných kontaktů na vodivé vrstvy vzorku. Jak již bylo zmíněno, pomocí tohoto přípravku lze měřit kontaktní odpor pouze dvou ze čtyř kontaktů mezi vrstvami na jedné polovině vzorku. To je dáno konstrukcí samotného přípravku, kde jsou tři použité kontakty zapojeny v jedné linii. Použité kontakty jsou na přípravku označeny černou barvou. První a druhý kontakt zleva slouží k připojení zdroje napětí, respektive proudu. Druhý a třetí kontakt zleva slouží k měření úbytku napětí na kontaktním odporu mezi odporovou vrstvou a vodivou vrstvou připojenou k druhému kontaktu. Pro lepší pochopení označíme vodivé vrstvy vzorku zleva 1, 2, 3 a 4, jako je to na obr. č. 24. Kontakty na měřicím přípravku označíme zleva A, B a C. Vzorek pak lze založit do

přípravku dvěma způsoby. Buď 1A, 2B, 3C nebo 2A, 3B, 4C. Analogicky pro druhou polovinu vzorku.

Obr. č. 33 Měřicí přípravek, černě označené kontakty jsou zapojeny



### 3.4.2 Frekvenční generátor Promax GB – 212

Jedná se o nízkofrekvenční generátor s nízkým zkreslením. Frekvenční rozsah toho generátoru je 20 Hz až 200 kHz, přičemž výstupem může být signál obdélníkový nebo sinusový. Výstupní napětí v sinusovém režimu je 5 V efektivních se zkreslením 0,02 % a v obdélníkovém režimu 10 V efektivních se zkreslením 0,05 %. Výstupní napětí se reguluje plynulým omezovačem amplitudy, který má rozsah 0 až 60 dB. Více o tomto zařízení se lze dočíst v [7].

### 3.4.3 Laboratorní multimetr Hewlett-Packard 34401A

HP 34401A je velmi přesný digitální multimetr, který je schopný měřit stejnosměrná i střídavá napětí, proudy, kmitočty a odpory do 100 M $\Omega$ . U tohoto přístroje je měřicí rozsah přepínán automaticky. Střídavé veličiny jsou měřeny metodou TrueRMS. Přesnost přístroje při měření střídavého napětí je závislá na frekvenci měřeného napětí a jeho řádu. V tomto měření bylo měřeno napětí do 100 mV o frekvencích 1 nebo 50 kHz. Pro napětí do 100 mV a frekvenci 1 kHz je udávána přesnost  $\pm(0,06 \% + 0,04 \%)$  a pro napětí do 100 mV a frekvenci 50 kHz je udávána přesnost  $\pm(0,12 \% + 0,04 \%)$ . První údaj je

odchylka z čtení a druhý je odchylka z rozsahu. Více o tomto přístroji a přesnosti se lze dočíst v [8].

#### **3.4.4 Digitální multimetr G - 1004.501**

V tomto případě se jedná o starší digitální multimetr německé výroby. Je schopný měřit střídavý i stejnosměrný proud a napětí. Dále je schopen měřit odpor až do 20 MΩ. Také obsahuje tester diod a akustickou signalizaci zkratu. V našem měření byl použit pro měření proudů s rozsahem do 20 mA. V tomto rozsahu má udávanou přesnost  $\pm(1,25 \% + 4)$ . Tato odchylka však platí jen pro frekvence 45 Hz až 5 kHz, v našem případě tedy pro první měření s frekvencí 1 kHz. Pro druhé měření s frekvencí 50 kHz se započítává ještě přídavná chyba, jejíž hodnota je udávána  $\pm(0,5 \% + 3)$ . První číslo je odchylka ze čtení, druhé číslo je počet digitů, tedy nejmenšího řádu na displeji. Více o tomto přístroji a přesnosti se lze dočíst v [9].

### **3.5 Vyhodnocení měření**

Na každém vzorku byly proměřovány celkem čtyři různé kontakty mezi vrstvami, dva na jedné polovině a dva na polovině druhé. U každého kontaktu byl měřen úbytek napětí pro dvě různé hodnoty proudu a pro dvě různé hodnoty frekvence. Jak bylo zmíněno na začátku podkapitoly 3.4, efektivní hodnoty proudu byly stanoveny na 3 a 6 mA a hodnoty frekvence byly stanoveny na 1 a 50 kHz. U některých vzorků, konkrétně u vzorků A a B, nebylo možné dosáhnout požadovaného proudu. Proto byl u těchto vzorků zvolen proud o velikosti, která byla nejbližší k požadované hodnotě. Z nastaveného proudu a změřeného úbytku napětí byl poté vypočítán kontaktní odpor jednoduše pomocí Ohmova zákona  $R_k = U/I$ . Abychom zjednodušili zpracování a vyhodnocení naměřených hodnot, uvažovali jsme i pro vzorky A a B, že vypočtené hodnoty kontaktního odporu náležely proudům 3 a 6 mA. Každá kombinace šířky a délky překryvu vrstev byla k dispozici pro měření osmkrát. Některé vzorky však byly vyřazeny kvůli tiskovým chybám. Dále po změření byly vyřazeny některé hodnoty, jelikož se příliš lišily od ostatních a mohly by negativně ovlivnit výsledky měření. Výsledný soubor naměřených dat je velmi obsáhlý, a proto je přiložen jako příloha na konci této práce.

### 3.5.1 Zpracování naměřených hodnot

Aby bylo možné měření nějakým způsobem zhodnotit, bylo třeba zpracovat soubor hodnot. Proto byly vypočtené hodnoty kontaktního odporu pro každý vzorek, frekvenci a proud zprůměrovány. Tím nám vznikl soubor hodnot, kde ke každému vzorku příslušely čtyři hodnoty kontaktního odporu. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tab. č. 2. Hodnoty proudu  $i$  i napětí v tabulce jsou hodnoty efektivní. V tabulce jsou navíc připsány ke každému vzorku rozměry překryvu  $l$  a  $w$ , počet čtverců  $l/w$  a také plocha překryvu v milimetrech, která se jednoduše vypočte  $S = l \cdot w$ .

Tab. č. 2 Tabulka průměrných kontaktních odporů jednotlivých vzorků  
(pozn. indexy  $H$  a  $D$  mají stejný význam jako v tab. č. 1)

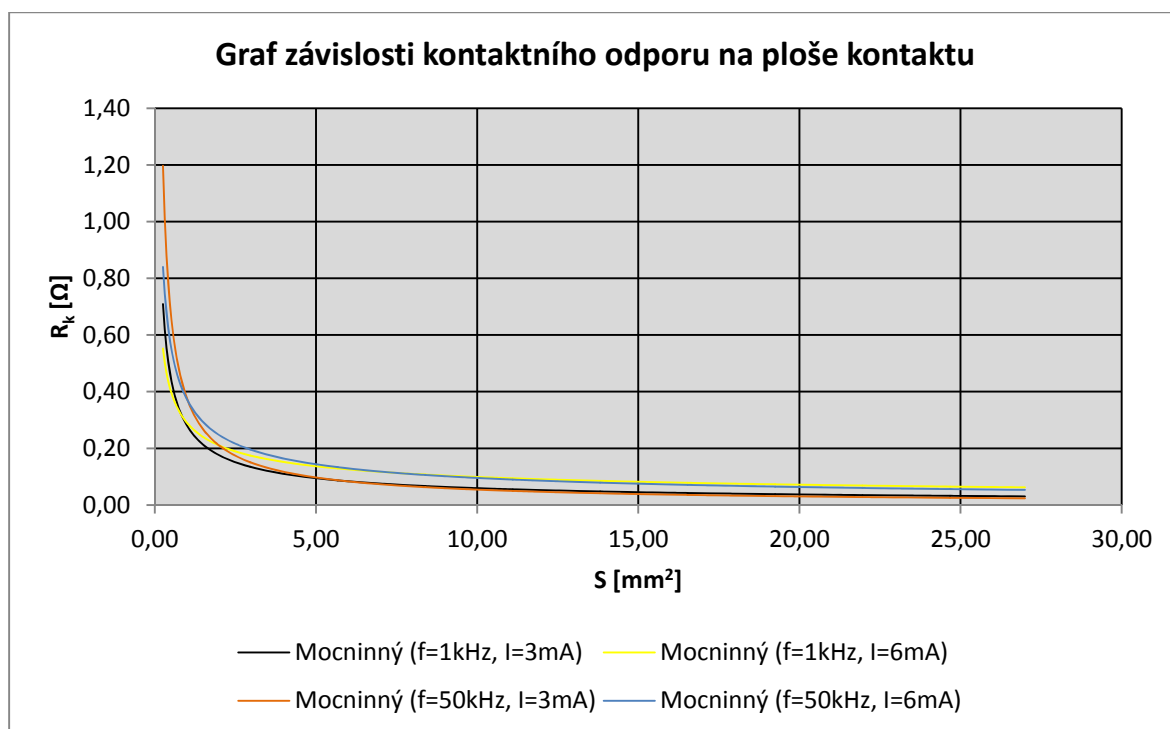
vzorek	$l$	$w$	$l/w$	$R_k [\Omega]$				$S$
				$f=1 \text{ kHz}$		$f=50 \text{ kHz}$		
-	[mm]	[mm]	[-]	$i=3 \text{ mA}$	$i=6 \text{ mA}$	$i=3 \text{ mA}$	$i=6 \text{ mA}$	[mm <sup>2</sup> ]
<b>A<sub>H</sub></b>	0,50	0,5	1,0	0,65	0,64	0,85	0,80	0,25
<b>B<sub>H</sub></b>	1,00	0,5	2,0	0,51	0,50	0,66	0,63	0,50
<b>C<sub>H</sub></b>	1,50	0,5	3,0	0,41	0,41	0,46	0,44	0,75
<b>D<sub>H</sub></b>	2,00	0,5	4,0	0,46	0,45	0,50	0,48	1,00
<b>E<sub>H</sub></b>	1,50	1,5	1,0	0,14	0,15	0,19	0,19	2,25
<b>F<sub>H</sub></b>	3,00	1,5	2,0	0,16	0,16	0,14	0,15	4,50
<b>G<sub>H</sub></b>	4,50	1,5	3,0	0,10	0,09	0,04	0,08	6,75
<b>H<sub>H</sub></b>	0,75	1,5	0,5	0,21	0,23	0,32	0,33	1,13
<b>I<sub>H</sub></b>	2,00	2,0	1,0	0,11	0,13	0,11	0,13	4,00
<b>J<sub>H</sub></b>	4,00	2,0	2,0	0,08	0,12	0,06	0,10	8,00
<b>K<sub>H</sub></b>	6,00	2,0	3,0	0,08	0,12	0,07	0,10	12,00
<b>L<sub>H</sub></b>	1,00	2,0	0,5	0,09	0,12	0,33	0,32	2,00
<b>A<sub>D</sub></b>	1,00	1,0	1,0	0,33	0,33	0,56	0,53	1,00
<b>B<sub>D</sub></b>	2,00	1,0	2,0	0,21	0,21	0,29	0,29	2,00
<b>C<sub>D</sub></b>	3,00	1,0	3,0	0,25	0,26	0,26	0,25	3,00
<b>D<sub>D</sub></b>	4,00	1,0	4,0	0,11	0,13	0,11	0,12	4,00
<b>E<sub>D</sub></b>	3,00	3,0	1,0	0,04	0,09	0,03	0,08	9,00
<b>F<sub>D</sub></b>	6,00	3,0	2,0	0,02	0,07	0,02	0,07	18,00
<b>G<sub>D</sub></b>	9,00	3,0	3,0	0,05	0,09	0,05	0,10	27,00
<b>H<sub>D</sub></b>	1,50	3,0	0,5	0,07	0,11	0,07	0,10	4,50
<b>I<sub>D</sub></b>	2,50	2,5	1,0	0,06	0,10	0,04	0,09	6,25
<b>J<sub>D</sub></b>	5,00	2,5	2,0	0,03	0,08	0,02	0,06	12,50
<b>K<sub>D</sub></b>	7,50	2,5	3,0	0,08	0,11	0,08	0,11	18,75
<b>L<sub>D</sub></b>	1,25	2,5	0,5	0,05	0,10	0,16	0,17	3,13



### 3.5.2 Grafy závislostí kontaktního odporu a jejich vyhodnocení

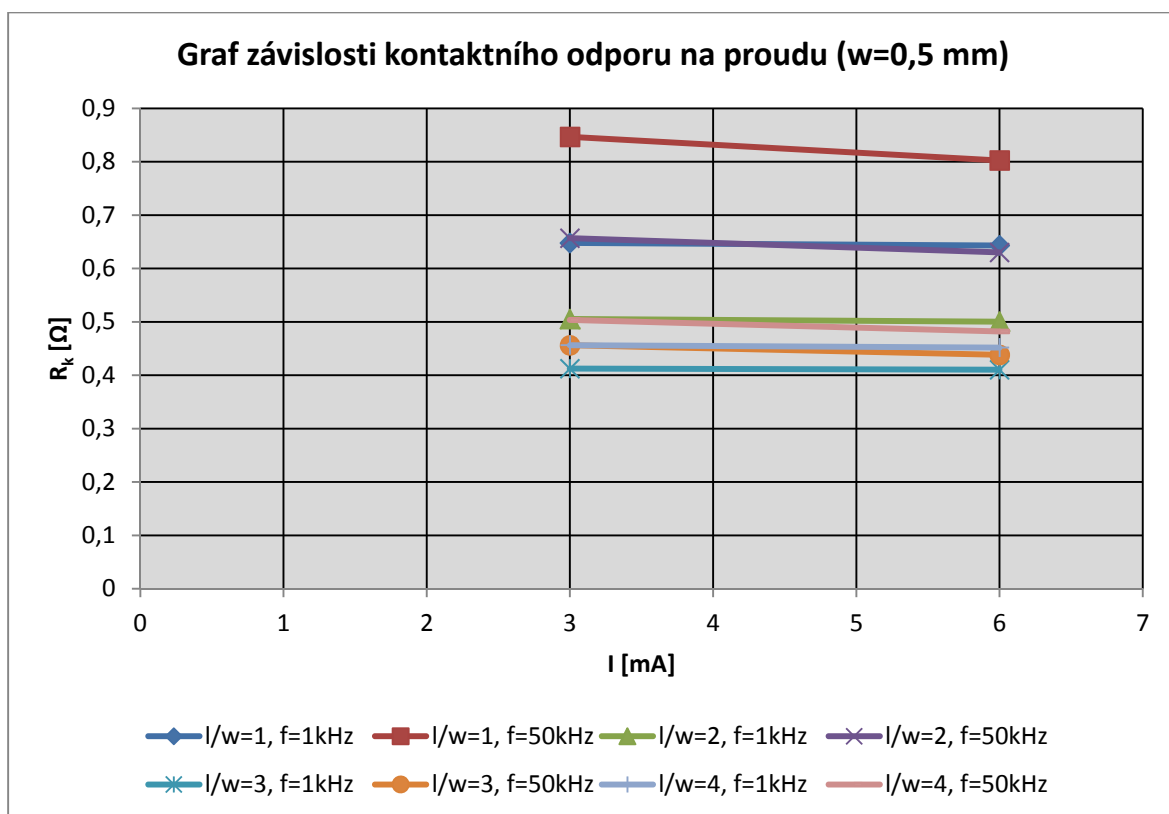
Z tab. č. 2 bylo sestaveno několik grafů, které se týkaly kontaktního odporu. V grafech je zaznamenána závislost kontaktního odporu na ploše kontaktu vodivé a odporové vrstvy. Dále je zaznamenána závislost kontaktního odporu na proudu protékajícím kontaktem. Důležité jsou také grafy, kde je znázorněna závislost kontaktního odporu na šířce kontaktu  $w$ , případně na počtu čtverců  $l/w$ . Jelikož se ukázalo, že kontaktní odpor není konstantní, nýbrž se mění s protékajícím proudem či s frekvencí proudu, nebylo možné žádnou z těchto hodnot vzájemně průměrovat. Proto byly závislosti zpracovány pro oba proudy a obě frekvence zvlášť. Grafy ve většině případů nejsou prokládané z důvodu malého počtu hodnot. Grafy závislostí na proudu jsou pouze orientační, protože byly měřeny pouze dvě hodnoty proudu, a slouží pro nástin chování kontaktního odporu. Jelikož grafy jsou nedílnou součástí zhodnocení měření, nejsou umístěny v příloze, ale přímo v samotné práci. Každá skupina grafů je opatřena komentářem.

*Graf č. 1 Graf závislosti kontaktního odporu na ploše kontaktu. Z důvodu velkého množství bodů jsou v grafu zobrazena pouze proložení.*

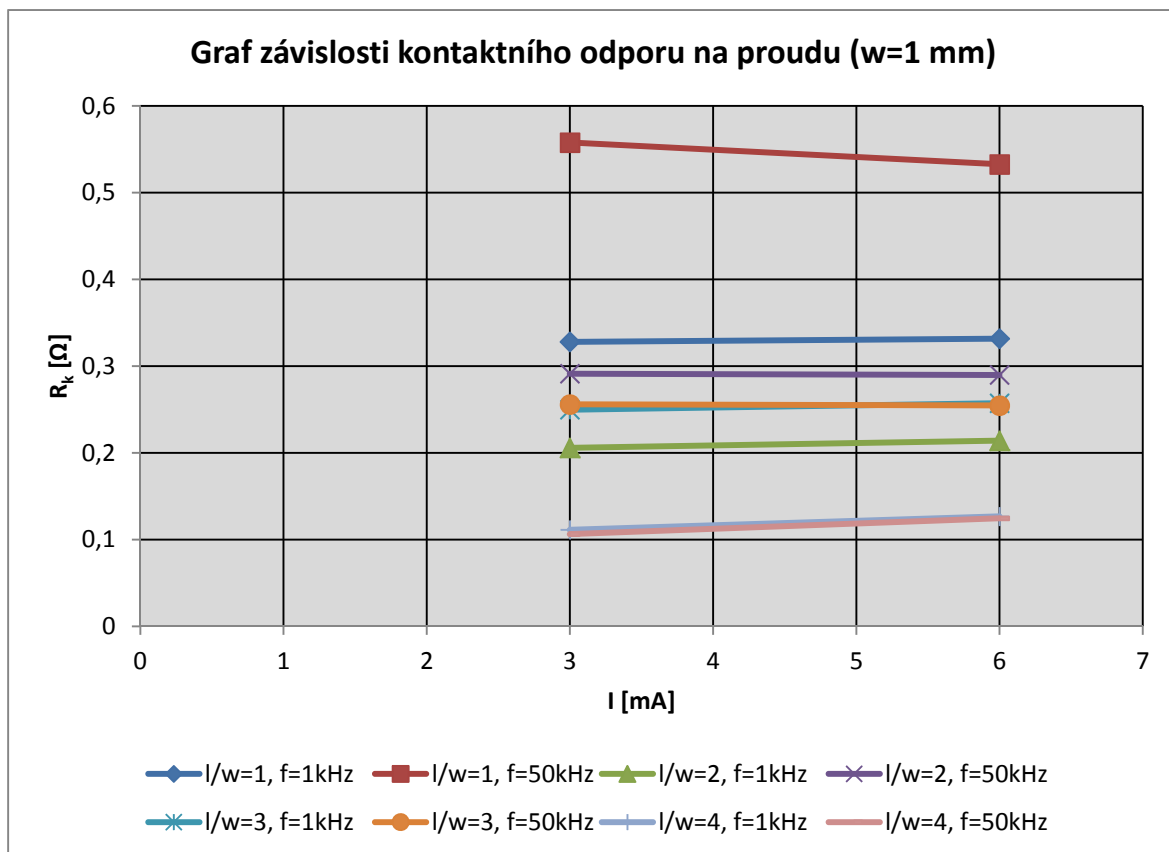


Z grafu vyplývá, že kontaktní odpor s poklesem plochy kontaktu klesá zprvu strmě a postupně se stává téměř konstantním. Také si můžeme všimnout, že jednotlivé křivky nesplývají. To je způsobeno tím, že se kontaktní odpor mění se změnou proudu nebo frekvence. Tato skutečnost je vidět na následujících grafech.

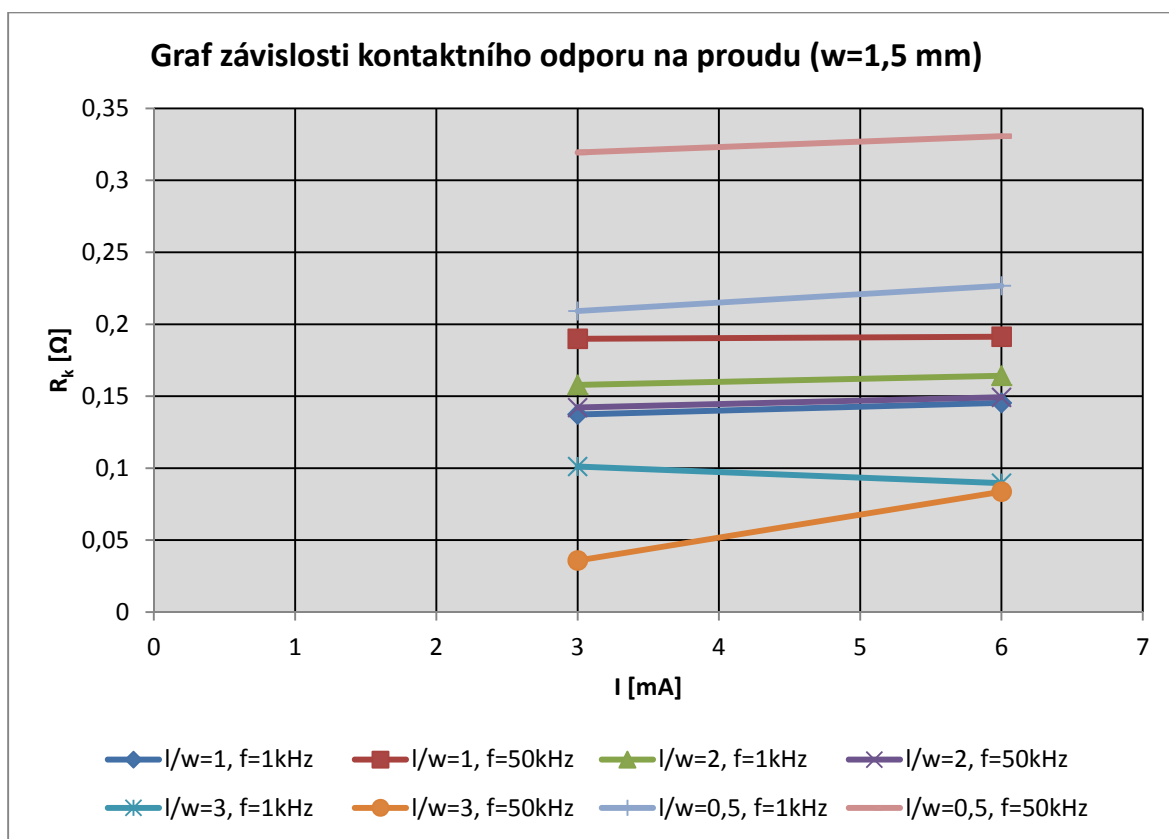
Graf č. 2 Graf závislosti kontaktního odporu na proudu pro kontakty široké 0,5 mm.



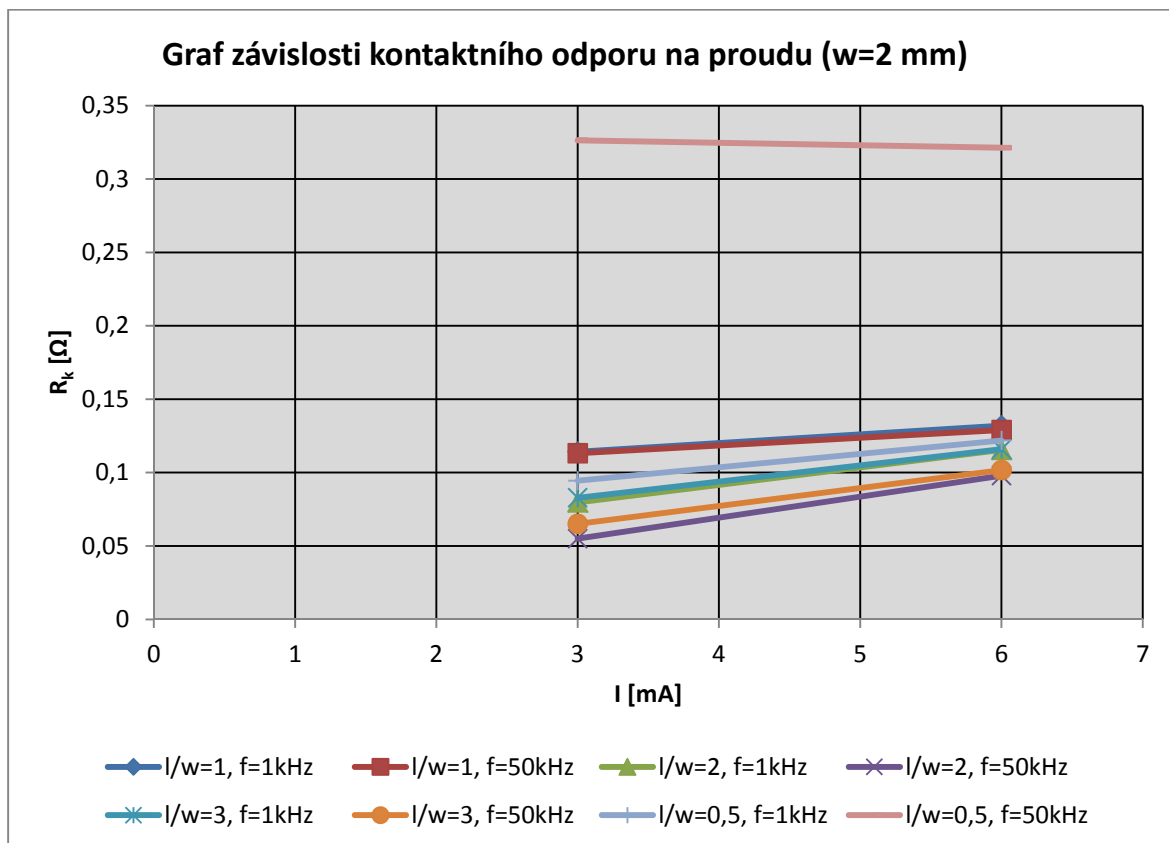
Graf č. 3 Graf závislosti kontaktního odporu na proudu pro kontakty široké 1 mm.



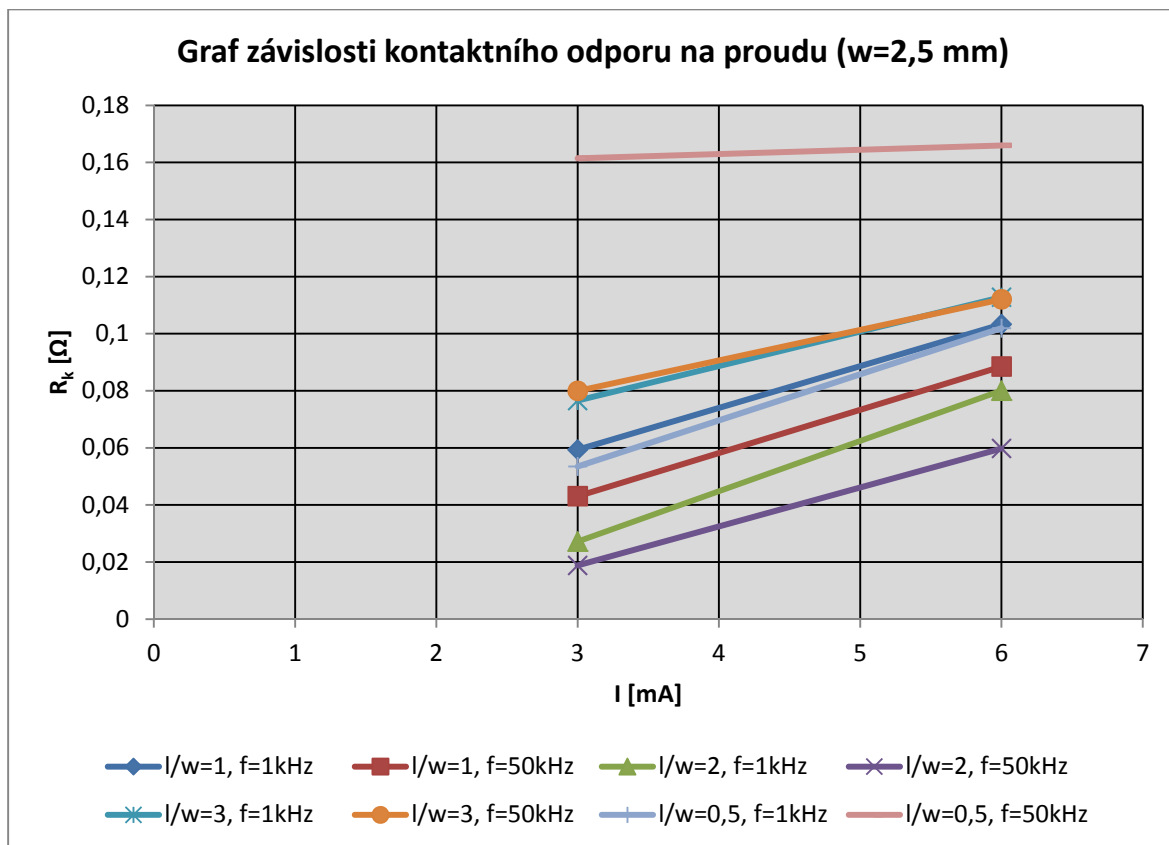
Graf č. 4 Graf závislosti kontaktního odporu na proudu pro kontakty široké 1,5 mm.



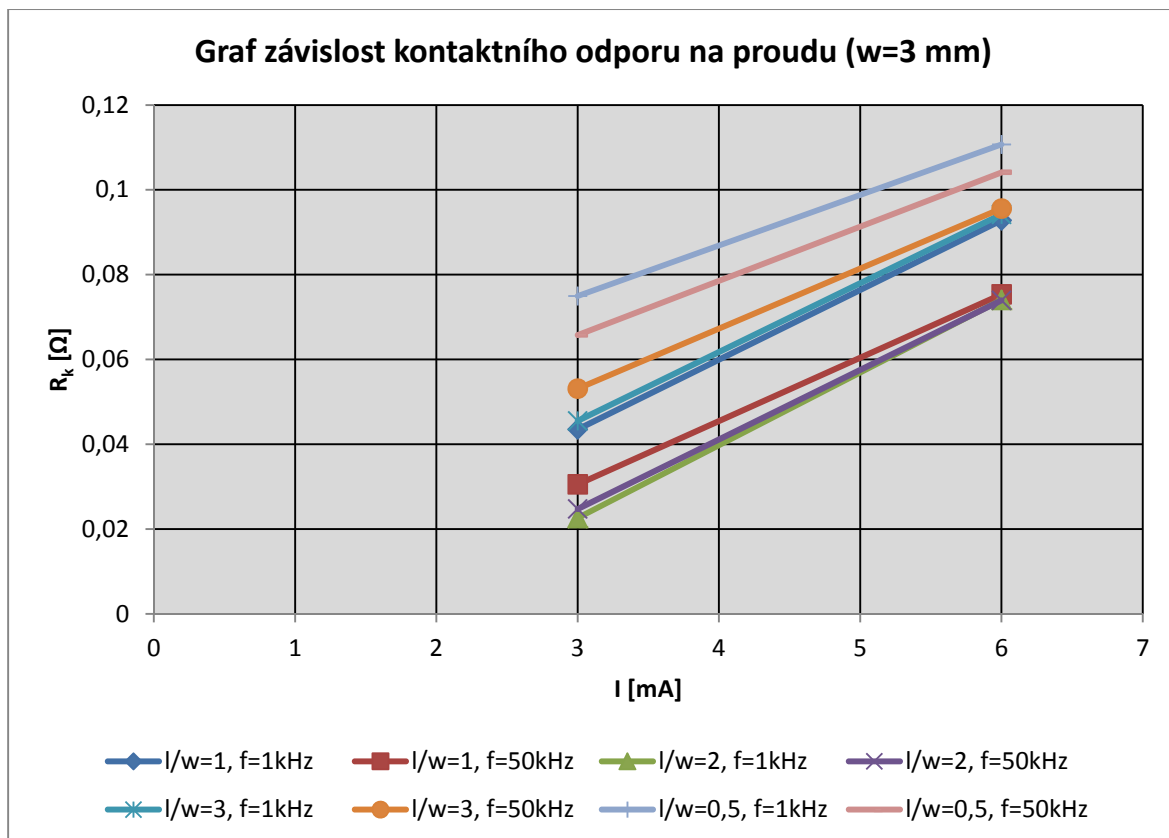
Graf č. 5 Graf závislosti kontaktního odporu na proudu pro kontakty široké 2 mm.



Graf č. 6 Graf závislosti kontaktního odporu na proudu pro kontakty široké 2,5 mm.

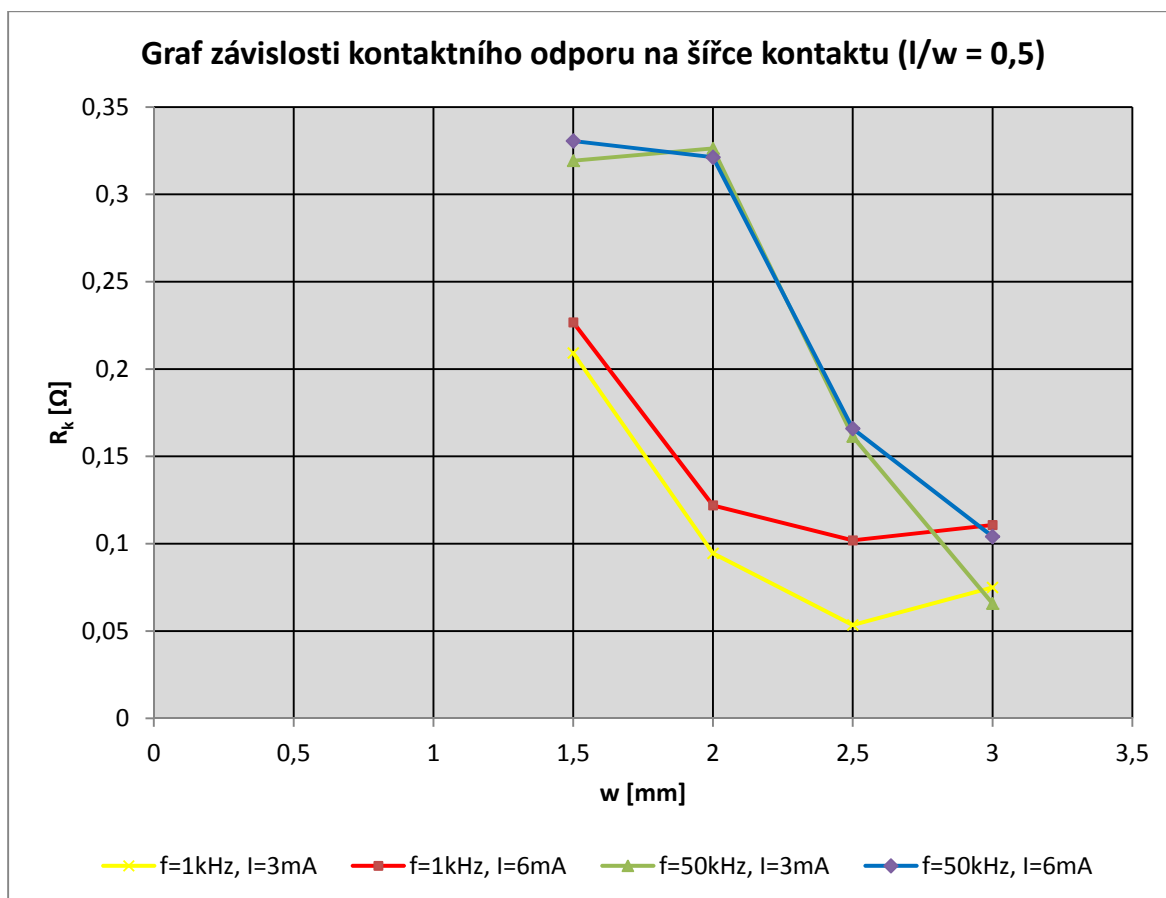


Graf č. 7 Graf závislosti kontaktního odporu na proudu pro kontakty široké 3 mm.

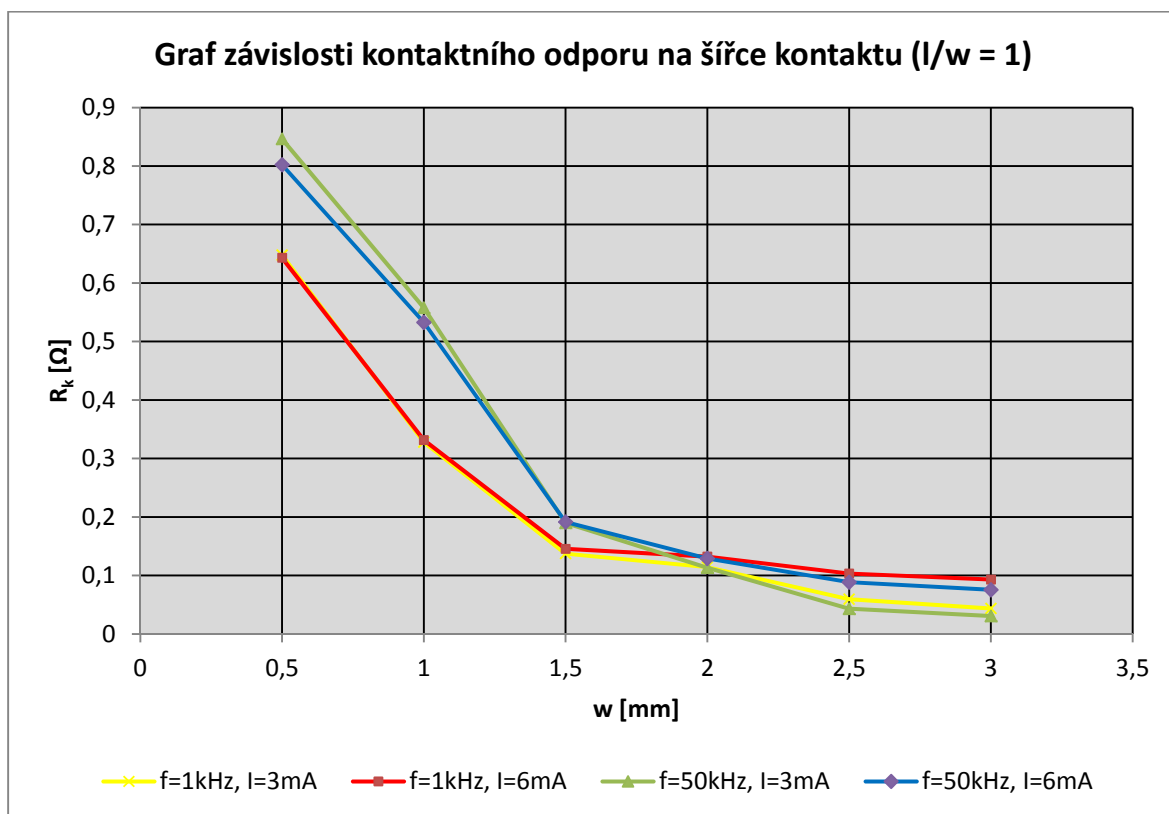


Šest přechozích grafů zobrazuje závislost kontaktního odporu na procházejícím proudu a jeho frekvenci pro všechny vzorky. Podle teoretického předpokladu by všechny závislosti měly být konstantní. Jak je z grafů vidět, u vzorků s nižší šířkou kontaktu byl kontaktní odpor vážně téměř konstantní v závislosti na proudu. U vzorků s větší šířkou kontaktu však kontaktní odpor s proudem lehce roste. Ve všech případech ale dochází k nárůstu maximálně v řádu desítek miliohmů. U dvou posledních grafů se nárůst jeví výraznější, ale to je způsobeno pouze jemnějším měřítkem grafu. Odchytky od teoretického předpokladu mohou být způsobeny vzhledem k velikosti odchylek rozptylem naměřených hodnot, nepřesným nastavením hodnot proudu a frekvence nebo chybami měření. Co se týče frekvenční závislosti, ve všech případech dochází se zvýšením frekvence ke zvýšení kontaktního odporu. Průběhy  $l/w = 0,5$ ,  $f = 50$  kHz vykazují v grafu č. 5 a v grafu č. 6 nezvykle vysoký kontaktní odpor. Možnou příčinou je opět nedostatečné množství vzorků, chyby při měření nebo chyby samotného vzorku zapříčiněné chybami při výrobě.

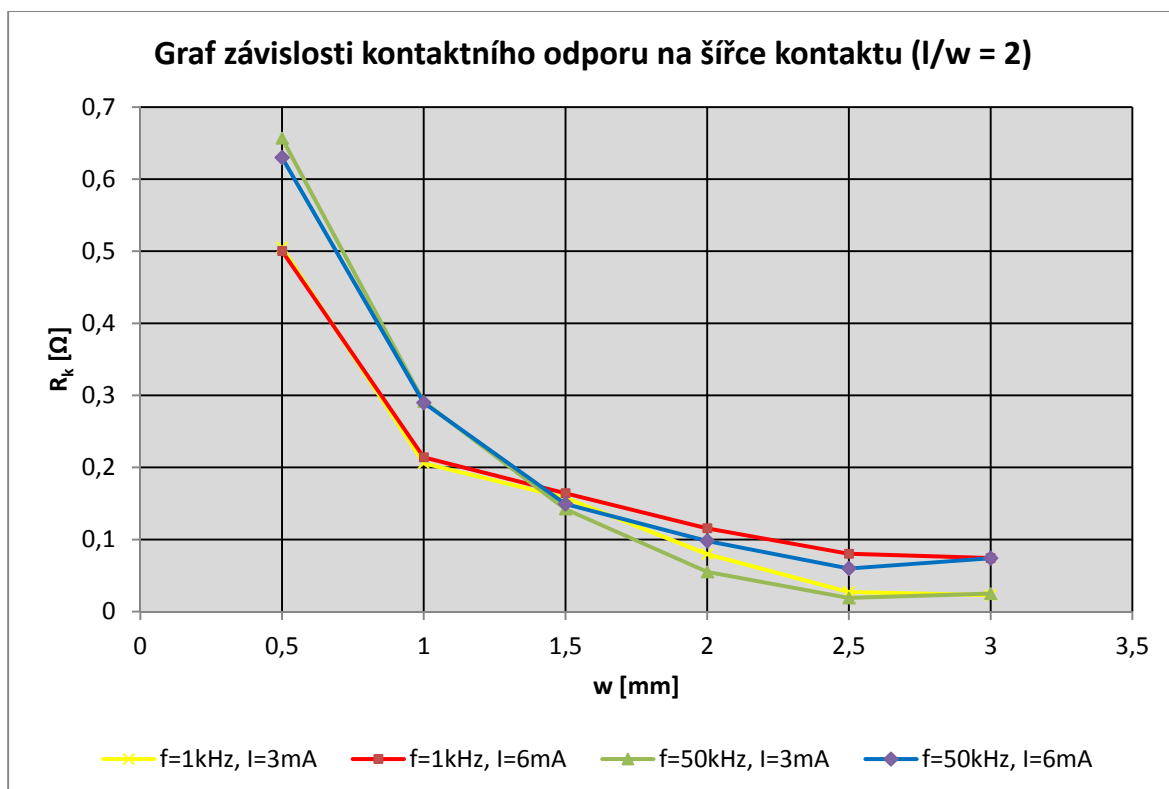
Graf č. 8 Graf závislosti kontaktního odporu na šířce kontaktu pro počet čtverců  $l/w = 0,5$ .



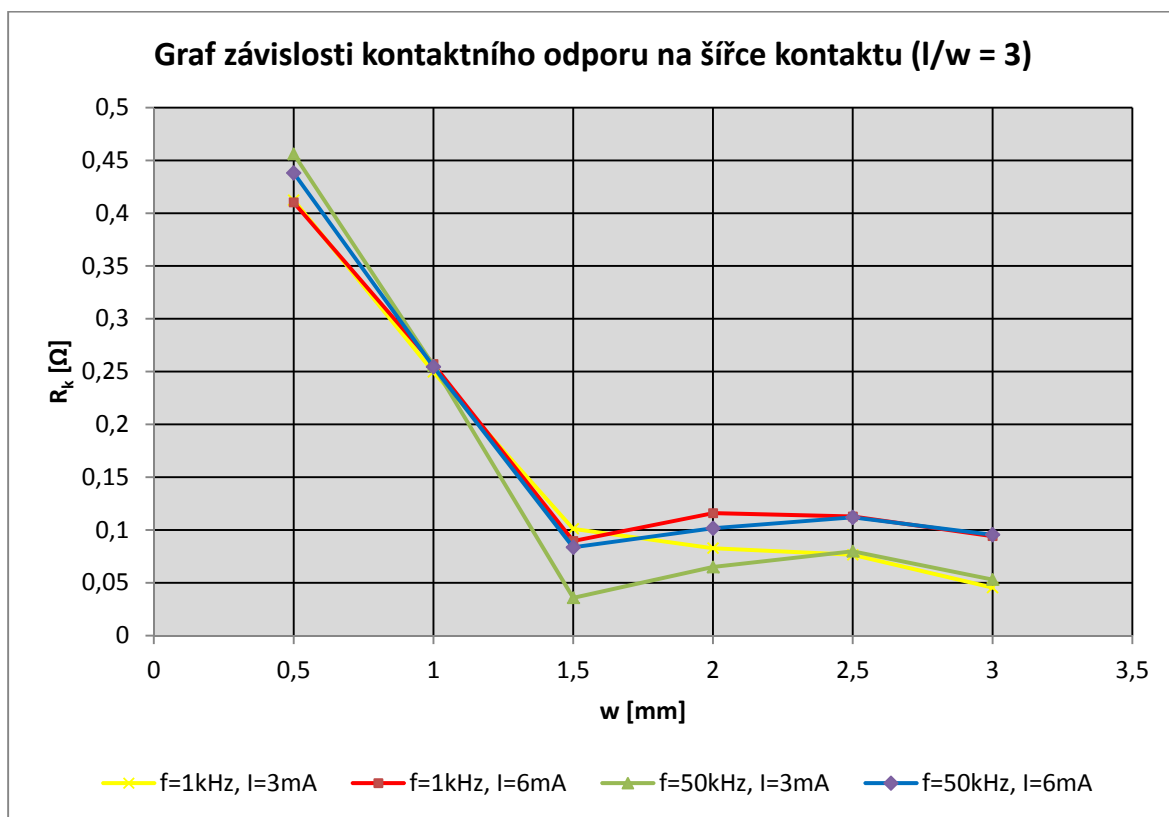
Graf č. 9 Graf závislosti kontaktního odporu na šířce kontaktu pro počet čtverců  $l/w = 1$ .



Graf č. 10 Graf závislosti kontaktního odporu na šířce kontaktu pro počet čtverců  $l/w = 2$ .

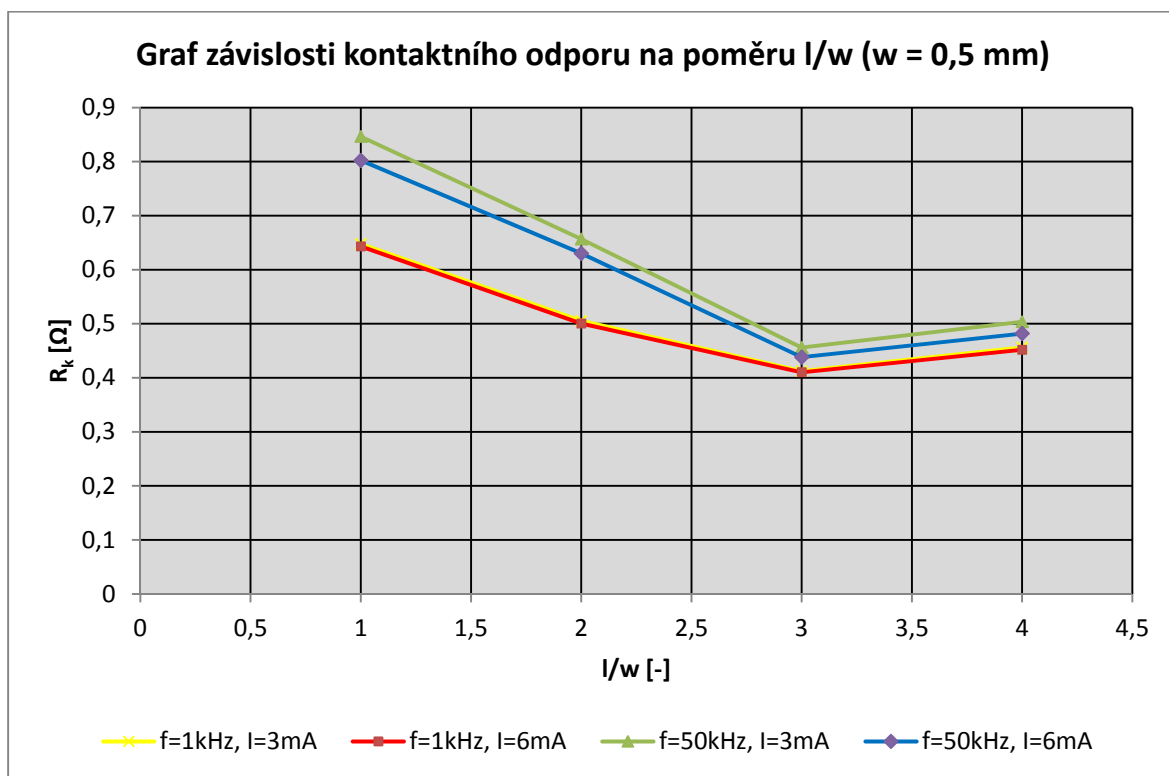


Graf č. 11 Graf závislosti kontaktního odporu na šířce kontaktu pro počet čtverců  $l/w = 3$ .

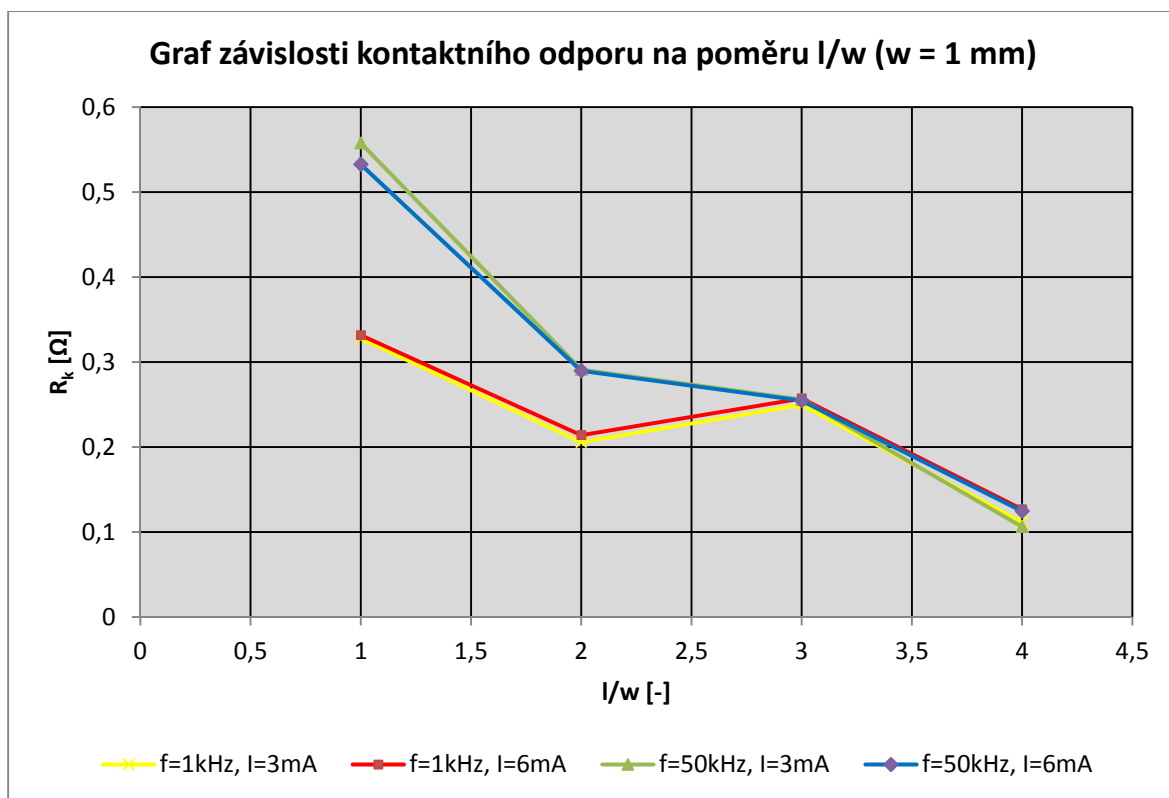


Na všech grafech je patrné, že s rostoucí šířkou kontaktu klesá kontaktní odpor. Při dosažení určité šířky však kontaktní odpor klesá velmi pomalu nebo vůbec. To odpovídá grafu č. 1. Také si lze všimnout, že na všech grafech, kromě grafu č. 8 jsou závislosti téměř totožné. Odchylka na grafu č. 8 je způsobena chybou měření nebo tiskovou chybou vzorků. Mírné odchytky mohou být způsobeny malým počtem vzorků a rozptylem naměřených hodnot.

Graf č. 12 Graf závislosti kontaktního odporu na poměru  $l/w$  pro šířku kontaktu  $w = 0,5 \text{ mm}$ .

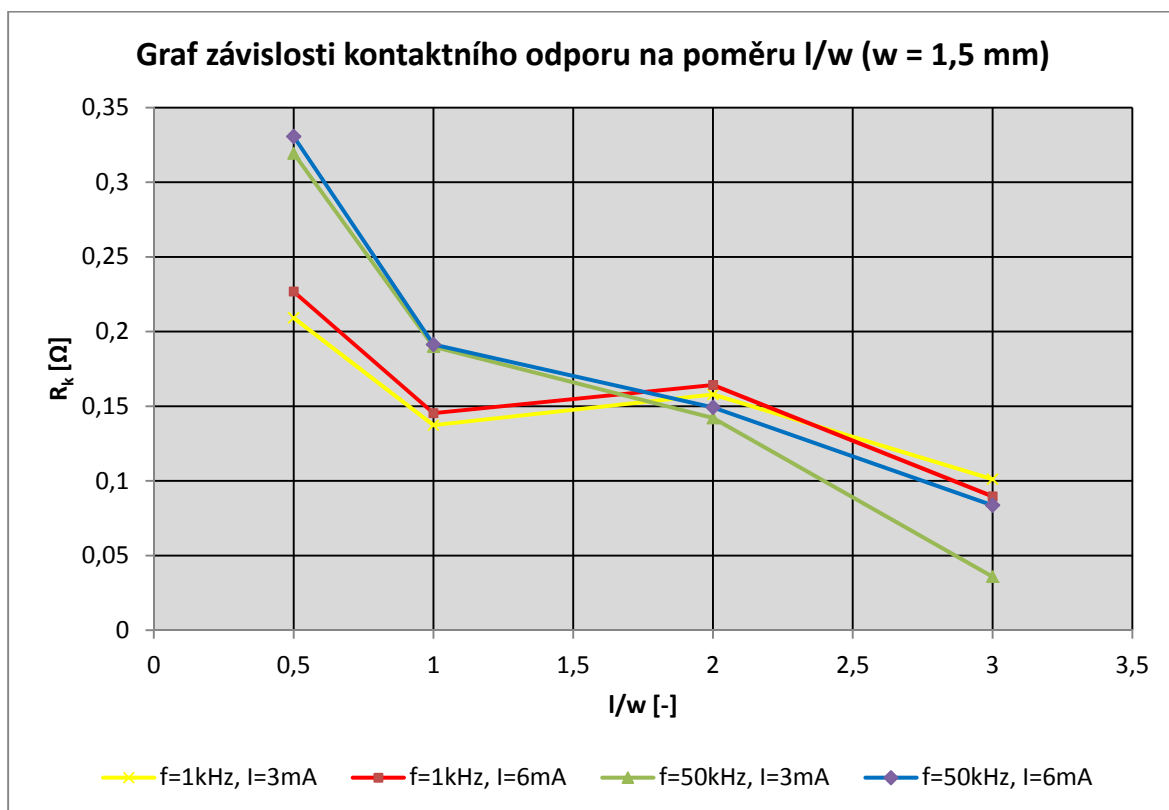


Graf č. 13 Graf závislosti kontaktního odporu na poměru  $l/w$  pro šířku kontaktu  $w = 1 \text{ mm}$ .

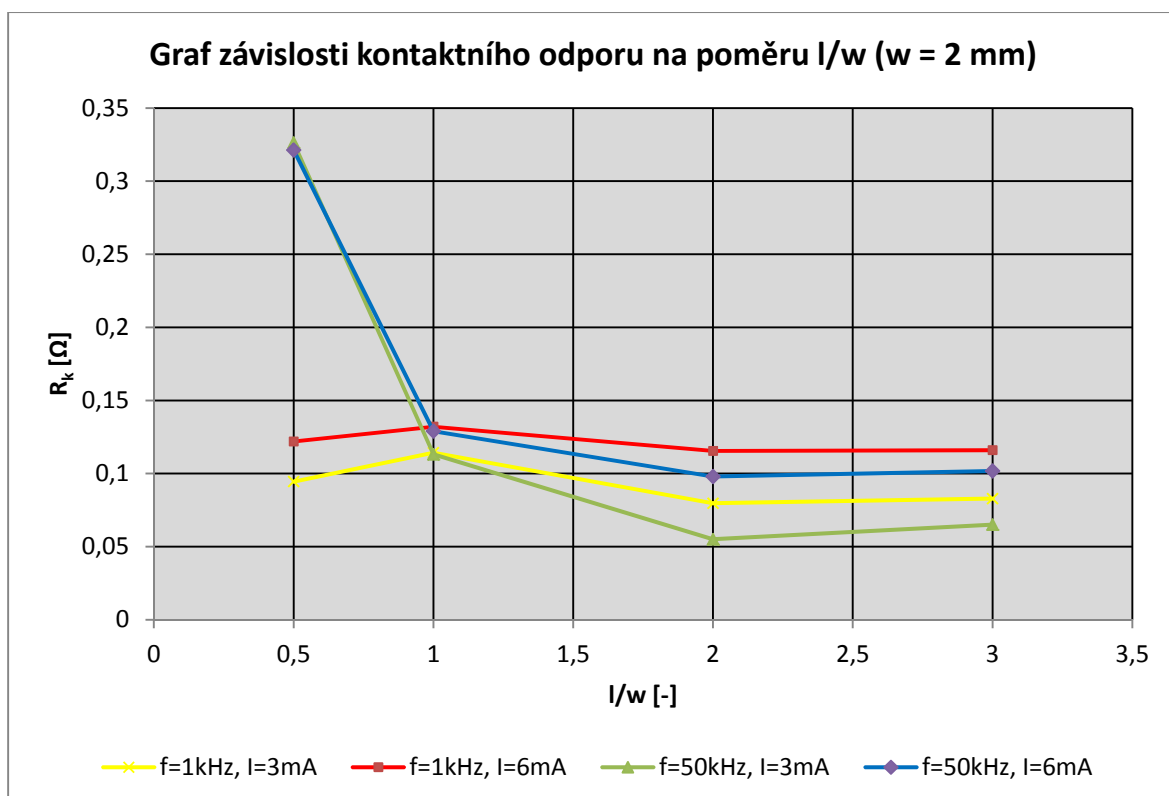




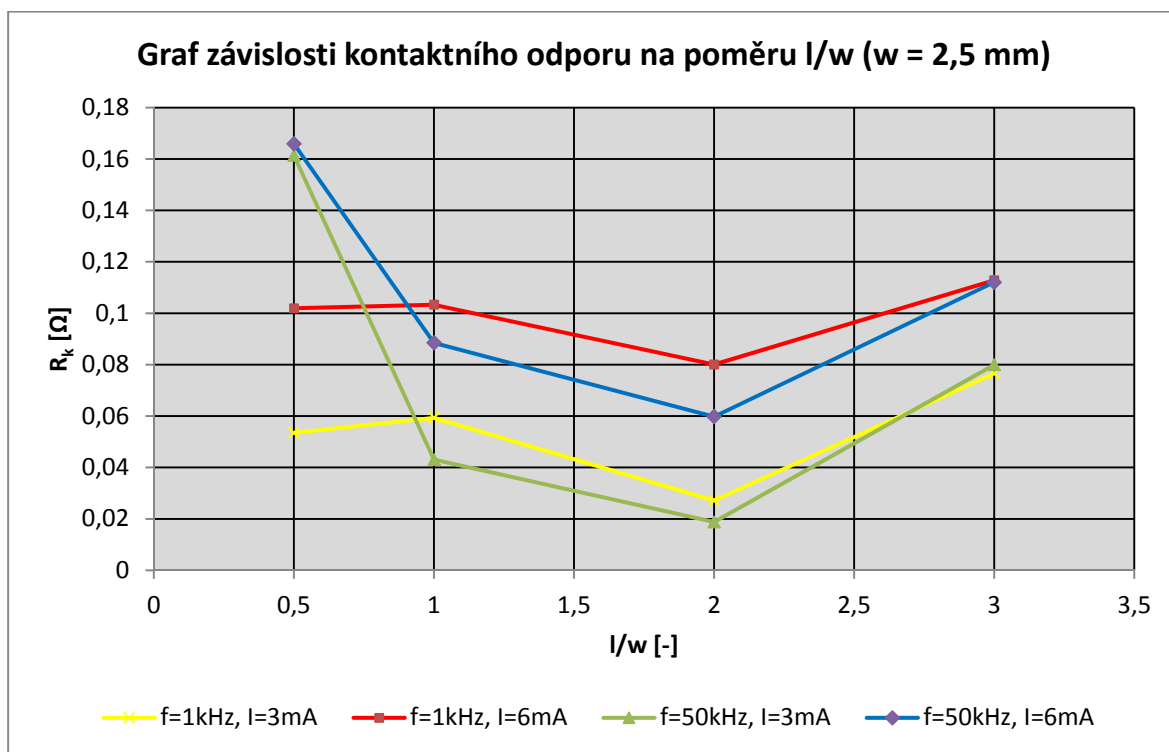
Graf č. 14 Graf závislosti kontaktního odporu na poměru  $l/w$  pro šířku kontaktu  $w = 1,5 \text{ mm}$



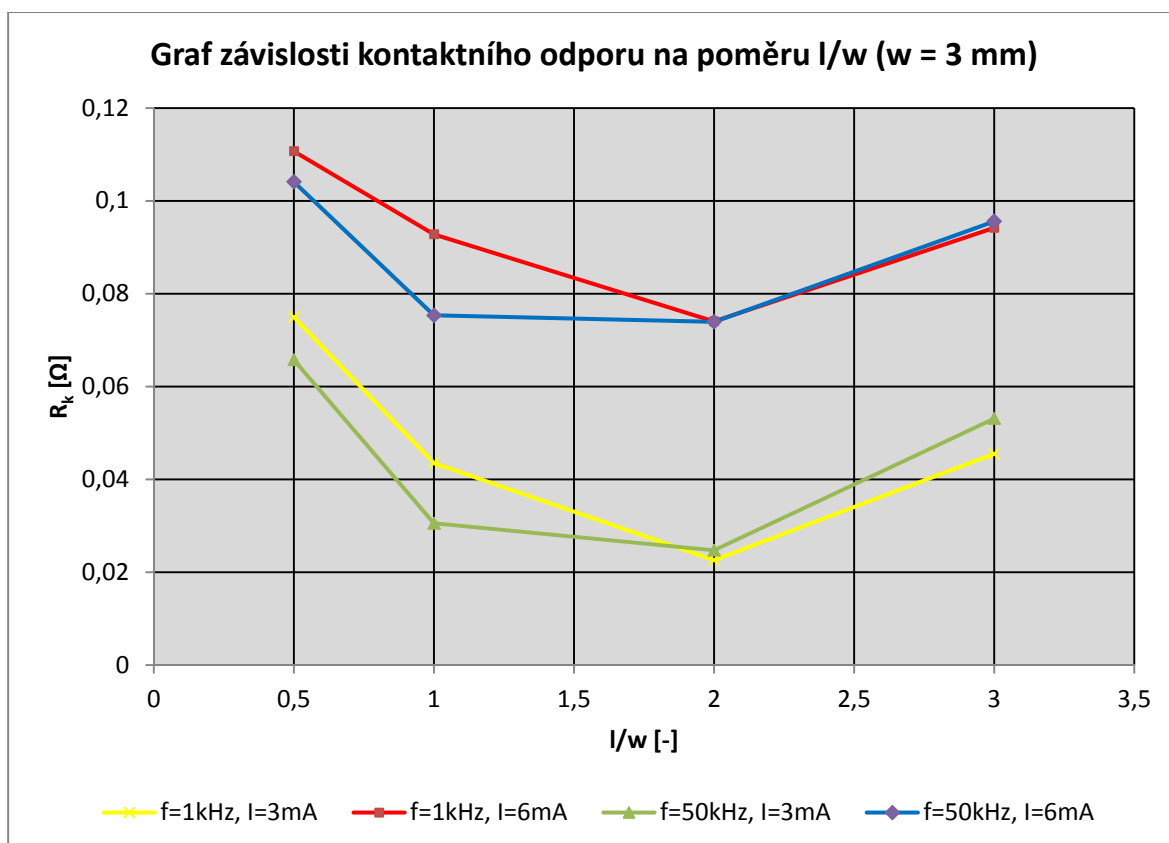
Graf č. 15 Graf závislosti kontaktního odporu na poměru  $l/w$  pro šířku kontaktu  $w = 2 \text{ mm}$ .



Graf č. 16 Graf závislosti kontaktního odporu na poměru  $l/w$  pro šířku kontaktu  $w = 2,5 \text{ mm}$ .



Graf č. 17 Graf závislosti kontaktního odporu na poměru  $l/w$  pro šířku kontaktu  $w = 3 \text{ mm}$ .



Grafy č. 12 až 17 znázorňují závislost kontaktního odporu na počtu čtverců  $l/w$ . U všech závislostí je patrná tendence poklesu kontaktního odporu s rostoucím počtem čtverců. U posledních dvou grafů je ovšem vidět nárůst kontaktního odporu pro  $l/w = 3$ . To může být způsobeno tím, že všechny vzorky nebyly měřeny najednou a mohla se projevit např. rozdílná teplota při měření. Dále je u nich patrný rozdíl kontaktního odporu pro různé proudy, to může způsobeno chybami při měření nebo rozptylem naměřených hodnot.

## Závěr

Úkolem této práce bylo uceleně pojednat o problematice tlustých vrstev. Tlusté vrstvy jsou ovšem téma velmi obsáhlé. Proto se práce dotýká všech oblastí jen natolik, aby si čtenář byl schopen vytvořit představu o tlustých vrstvách jako celku. Práce se však nezabývala pouze teoretickými problémy. Nejpodstatnějším cílem práce bylo zhotovení vzorků tlustovrstvých struktur, které byly podrobeny měření kontaktního odporu. Měření probíhalo s využitím střídavého proudu místo obvyklejšího stejnosměrného. V tom je práce výjimečná, jelikož nepředkládá pouze závislosti kontaktního odporu na geometrických parametrech, ale předkládá i vliv několikanásobného zvýšení frekvence proudu na hodnotu kontaktního odporu. Je však nutné brát na vědomí, že i když naměřených hodnot bylo mnoho, tak na spolehlivé a směrodatné závěry to nestačí. Práce tak alespoň otevírá prostor pro další měření ve velmi perspektivní oblasti.

## Seznam použité literatury

- [1] MACH, P., SKOČIL, V., URBÁNEK, J. Montáž v elektronice, ČVUT, Praha, 2001, ISBN: 8001023923
- [2] SZENDIUCH, I.: Tlusté vrstvy (2) [online]. 2012-02 [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-02A-tlust%C3%A9%20vrstvy\(Bc\).pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2012-02A-tlust%C3%A9%20vrstvy(Bc).pdf)
- [3] SLOVÁK, F.: Hodnocení vlastností kontaktů mezi různými vodivými a odporovými tlustými vrstvami, bakalářská práce, 2007
- [4] HŘIBAL, R.: Tlustovrstvé technologie a jejich využití, individuální projekt, 2014
- [5] HOLMES, P. J., LOASBY, R.G.: Handbook of thick film technology, Electrochemical publications, 1976
- [6] DUPONT USA: Webové stránky společnosti DuPont [online]. ©2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/>
- [7] PROMAX ELECTRONICA S.L.: Katalogový list přístroje GB-212 [online]. ©2014 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.promax.es/downloads/products/ing/GB-212.pdf>
- [8] PŘÍSTROJOVÉ CENTRUM FEL : ČVUT: Katalogový list přístroje HP 34401A [online]. ©2007-2014 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: [http://centrum.feld.cvut.cz/?download=\\_/download/pristroje/hp34401a-cz.pdf](http://centrum.feld.cvut.cz/?download=_/download/pristroje/hp34401a-cz.pdf)
- [9] BLUNK ELECTRONIC: Katalogový list k přístroji G-1004.501 [online] [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: [http://www.train-z.de/datasheet/schematics/DMM\\_G-1004.501.pdf](http://www.train-z.de/datasheet/schematics/DMM_G-1004.501.pdf)
- [10] ERESCOM SMT: Informace o zařízení Uniprint – G [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.erescom.cz/index11.html>

## Seznam obrázků

Obr. č. 1 .....	11
Obr. č. 2 .....	12
Obr. č. 3 .....	13
Obr. č. 4 .....	14
Obr. č. 5 .....	15
Obr. č. 6 .....	16
Obr. č. 7 .....	17
Obr. č. 8 .....	18
Obr. č. 9 .....	19
Obr. č. 10 .....	20
Obr. č. 11 .....	21
Obr. č. 12 .....	21
Obr. č. 13 .....	22
Obr. č. 14 .....	23
Obr. č. 15 .....	24
Obr. č. 16 .....	24
Obr. č. 17 .....	25
Obr. č. 18 .....	26
Obr. č. 19 .....	26
Obr. č. 20 .....	27
Obr. č. 21 .....	28
Obr. č. 22 .....	29
Obr. č. 23 .....	29
Obr. č. 24 .....	31
Obr. č. 25 .....	31
Obr. č. 26 .....	32
Obr. č. 27 .....	32
Obr. č. 28 .....	34
Obr. č. 29 .....	34
Obr. č. 30 .....	35
Obr. č. 31 .....	36
Obr. č. 32 .....	37
Obr. č. 33 .....	38

## Seznam tabulek

Tab. č. 1 .....	36
Tab. č. 2 .....	40

## Seznam grafů

Graf č. 1 .....	41
Graf č. 2 .....	42
Graf č. 3 .....	42
Graf č. 4 .....	43
Graf č. 5 .....	43
Graf č. 6 .....	44
Graf č. 7 .....	44
Graf č. 8 .....	45
Graf č. 9 .....	46
Graf č. 10 .....	46
Graf č. 11 .....	47
Graf č. 12 .....	48
Graf č. 13 .....	48
Graf č. 14 .....	49
Graf č. 15 .....	49
Graf č. 16 .....	50
Graf č. 17 .....	50



## **Seznam příloh**

Příloha A – Tabulky naměřených hodnot

Příloha B – CD-ROM

Obsah CD:

Hribal\_Rostislav\_BP\_2014.docx

Hribal\_Rostislav\_Prilohy\_2014.docx

Hribal\_Rostislav\_BP\_2014.pdf

## Příloha A – Tabulky naměřených hodnot

Vzorek	frekvence 1 kHz						frekvence 50 kHz					
	U [mV]	I [mA]	R [Ω]	U [mV]	I [mA]	R [Ω]	U [mV]	I [mA]	R [Ω]	U [mV]	I [mA]	R [Ω]
A <sub>H</sub>	2,52	4,0	0,63	1,90	3,0	0,63	3,59	3,5	1,03	2,15	2,0	1,08
A <sub>H</sub>	2,61	4,0	0,65	1,97	3,0	0,66	2,93	4,0	0,73	2,24	3,0	0,75
A <sub>H</sub>	2,79	4,0	0,70	1,41	2,0	0,71	2,81	4,0	0,70	1,50	2,0	0,75
A <sub>H</sub>	2,26	4,0	0,56	1,13	2,0	0,57	2,67	3,8	0,70	1,50	2,0	0,75
A <sub>H</sub>	1,83	4,0	0,46	0,91	2,0	0,45	2,86	4,0	0,72	1,52	2,0	0,76
A <sub>H</sub>	4,28	5,0	0,86	1,73	2,0	0,87	3,74	4,0	0,94	1,99	2,0	1,00
A <sub>D</sub>	1,71	5,5	0,31	0,91	3,0	0,30	1,95	5,5	0,35	1,10	3,0	0,37
A <sub>D</sub>	1,95	5,5	0,35	1,06	3,0	0,35	3,40	5,5	0,62	1,94	3,0	0,65
A <sub>D</sub>	2,20	6,0	0,37	1,10	3,0	0,37	3,23	5,5	0,59	1,86	3,0	0,62
A <sub>D</sub>	1,63	5,5	0,30	0,86	3,0	0,29	2,52	5,5	0,46	1,43	3,0	0,48
A <sub>D</sub>	1,81	5,5	0,33	0,98	3,0	0,33	3,55	5,5	0,65	2,03	3,0	0,68
B <sub>H</sub>	2,81	5,5	0,51	1,56	3,0	0,52	2,88	5,2	0,55	1,72	3,0	0,57
B <sub>H</sub>	3,02	5,5	0,55	1,68	3,0	0,56	4,01	5,4	0,74	2,30	3,0	0,77
B <sub>H</sub>	2,69	5,5	0,49	1,47	3,0	0,49	3,40	5,5	0,62	1,95	3,0	0,65
B <sub>H</sub>	2,26	5,0	0,45	1,13	2,5	0,45	3,02	5,0	0,60	1,59	2,5	0,64
B <sub>D</sub>	1,60	6,0	0,27	0,77	3,0	0,26	1,82	6,0	0,30	0,91	3,0	0,30
B <sub>D</sub>	1,41	6,0	0,23	0,69	3,0	0,23	1,75	6,0	0,29	0,88	3,0	0,29
B <sub>D</sub>	1,07	6,0	0,18	0,52	3,0	0,17	1,36	6,0	0,23	0,67	3,0	0,22
B <sub>D</sub>	1,11	6,0	0,18	0,53	3,0	0,18	1,81	6,0	0,30	0,92	3,0	0,31
B <sub>D</sub>	1,16	6,0	0,19	0,55	3,0	0,18	1,80	6,0	0,30	0,90	3,0	0,30
B <sub>D</sub>	1,46	6,0	0,24	0,71	3,0	0,24	1,81	6,0	0,30	0,91	3,0	0,30
B <sub>D</sub>	1,17	6,0	0,19	0,56	3,0	0,19	1,81	6,0	0,30	0,92	3,0	0,31
C <sub>H</sub>	2,38	6,0	0,40	1,20	3,0	0,40	2,57	6,0	0,43	1,34	3,0	0,45
C <sub>H</sub>	2,35	6,0	0,39	1,17	3,0	0,39	2,49	6,0	0,41	1,29	3,0	0,43
C <sub>H</sub>	2,56	6,0	0,43	1,30	3,0	0,43	2,63	6,0	0,44	1,37	3,0	0,46
C <sub>H</sub>	2,43	6,0	0,40	1,23	3,0	0,41	2,60	6,0	0,43	1,36	3,0	0,45
C <sub>H</sub>	2,42	6,0	0,40	1,21	3,0	0,40	2,61	6,0	0,43	1,35	3,0	0,45
C <sub>H</sub>	2,63	6,0	0,44	1,32	3,0	0,44	2,88	6,0	0,48	1,50	3,0	0,50
C <sub>D</sub>	1,44	6,0	0,24	0,69	3,0	0,23	1,44	6,0	0,24	0,72	3,0	0,24
C <sub>D</sub>	1,48	6,0	0,25	0,72	3,0	0,24	1,49	6,0	0,25	0,74	3,0	0,25
C <sub>D</sub>	1,60	6,0	0,27	0,77	3,0	0,26	1,54	6,0	0,26	0,77	3,0	0,26
C <sub>D</sub>	1,58	6,0	0,26	0,77	3,0	0,26	1,52	6,0	0,25	0,76	3,0	0,25
C <sub>D</sub>	1,29	6,0	0,22	0,62	3,0	0,21	1,28	6,0	0,21	0,63	3,0	0,21
C <sub>D</sub>	1,14	6,0	0,19	0,54	3,0	0,18	1,12	6,0	0,19	0,56	3,0	0,19
C <sub>D</sub>	1,86	6,0	0,31	0,92	3,0	0,31	1,89	6,0	0,32	0,97	3,0	0,32
C <sub>D</sub>	1,95	6,0	0,33	0,96	3,0	0,32	1,95	6,0	0,32	1,00	3,0	0,33

Vzorek	frekvence 1 kHz						frekvence 50 kHz					
	U [mV]	I [mA]	R [Ω]	U [mV]	I [mA]	R [Ω]	U [mV]	I [mA]	R [Ω]	U [mV]	I [mA]	R [Ω]
D <sub>H</sub>	2,20	6,0	0,37	1,11	3,0	0,37	2,28	6,0	0,38	1,18	3,0	0,39
D <sub>H</sub>	2,33	6,0	0,39	1,17	3,0	0,39	2,39	6,0	0,40	1,24	3,0	0,41
D <sub>H</sub>	3,33	6,0	0,56	1,69	3,0	0,56	3,61	6,0	0,60	1,90	3,0	0,63
D <sub>H</sub>	2,15	6,0	0,36	1,08	3,0	0,36	2,59	6,0	0,43	1,36	3,0	0,45
D <sub>H</sub>	3,01	6,0	0,50	1,52	3,0	0,51	3,05	6,0	0,51	1,59	3,0	0,53
D <sub>H</sub>	2,32	6,0	0,39	1,17	3,0	0,39	2,49	6,0	0,41	1,31	3,0	0,44
D <sub>H</sub>	3,76	6,0	0,63	1,91	3,0	0,64	4,02	6,0	0,67	2,11	3,0	0,70
D <sub>H</sub>	2,58	6,0	0,43	1,31	3,0	0,44	2,69	6,0	0,45	1,40	3,0	0,47
D <sub>D</sub>	0,61	6,0	0,10	0,24	3,0	0,08	0,64	6,0	0,11	0,21	3,0	0,07
D <sub>D</sub>	0,76	6,0	0,13	0,31	3,0	0,10	0,71	6,0	0,12	0,28	3,0	0,09
D <sub>D</sub>	0,75	6,0	0,12	0,30	3,0	0,10	0,84	6,0	0,14	0,42	3,0	0,14
D <sub>D</sub>	0,78	6,0	0,13	0,36	3,0	0,12	0,72	6,0	0,12	0,29	3,0	0,10
D <sub>D</sub>	0,85	6,0	0,14	0,42	3,0	0,14	0,87	6,0	0,14	0,43	3,0	0,14
D <sub>D</sub>	0,82	6,0	0,14	0,39	3,0	0,13	0,71	6,0	0,12	0,29	3,0	0,10
E <sub>H</sub>	0,87	6,0	0,15	0,42	3,0	0,14	1,00	6,0	0,17	0,50	3,0	0,17
E <sub>H</sub>	0,86	6,0	0,14	0,41	3,0	0,14	0,94	6,0	0,16	0,47	3,0	0,16
E <sub>H</sub>	0,92	6,0	0,15	0,44	3,0	0,15	1,41	6,0	0,24	0,70	3,0	0,23
E <sub>H</sub>	0,90	6,0	0,15	0,44	3,0	0,15	1,33	6,0	0,22	0,67	3,0	0,22
E <sub>H</sub>	0,77	6,0	0,13	0,32	3,0	0,11	1,09	6,0	0,18	0,53	3,0	0,18
E <sub>H</sub>	0,91	6,0	0,15	0,44	3,0	0,15	1,11	6,0	0,19	0,55	3,0	0,18
E <sub>D</sub>	0,58	6,0	0,10	0,14	3,0	0,05	0,51	6,0	0,09	0,11	3,0	0,04
E <sub>D</sub>	0,56	6,0	0,09	0,13	3,0	0,04	0,49	6,0	0,08	0,10	3,0	0,03
E <sub>D</sub>	0,54	6,0	0,09	0,11	3,0	0,04	0,47	6,0	0,08	0,09	3,0	0,03
E <sub>D</sub>	0,53	6,0	0,09	0,11	3,0	0,04	0,42	6,0	0,07	0,07	3,0	0,02
E <sub>D</sub>	0,48	6,0	0,08	0,08	3,0	0,03	0,35	6,0	0,06	0,05	3,0	0,02
E <sub>D</sub>	0,45	6,0	0,07	0,07	3,0	0,02	0,25	6,0	0,04	0,04	3,0	0,01
E <sub>D</sub>	0,64	6,0	0,11	0,17	3,0	0,06	0,50	6,0	0,08	0,11	3,0	0,04
E <sub>D</sub>	0,69	6,0	0,11	0,24	3,0	0,08	0,62	6,0	0,10	0,19	3,0	0,06
F <sub>H</sub>	1,09	6,0	0,18	0,52	3,0	0,17	1,05	6,0	0,18	0,52	3,0	0,17
F <sub>H</sub>	0,82	6,0	0,14	0,39	3,0	0,13	0,73	6,0	0,12	0,30	3,0	0,10
F <sub>H</sub>	0,85	6,0	0,14	0,41	3,0	0,14	0,75	6,0	0,13	0,34	3,0	0,11
F <sub>H</sub>	1,28	6,0	0,21	0,61	3,0	0,20	1,08	6,0	0,18	0,54	3,0	0,18
F <sub>H</sub>	1,16	6,0	0,19	0,56	3,0	0,19	1,10	6,0	0,18	0,55	3,0	0,18
F <sub>H</sub>	0,84	6,0	0,14	0,41	3,0	0,14	0,77	6,0	0,13	0,36	3,0	0,12
F <sub>H</sub>	0,85	6,0	0,14	0,42	3,0	0,14	0,78	6,0	0,13	0,38	3,0	0,13
F <sub>D</sub>	0,48	6,0	0,08	0,08	3,0	0,03	0,53	6,0	0,09	0,10	3,0	0,03
F <sub>D</sub>	0,37	6,0	0,06	0,04	3,0	0,01	0,42	6,0	0,07	0,06	3,0	0,02
F <sub>D</sub>	0,42	6,0	0,07	0,05	3,0	0,02	0,45	6,0	0,08	0,07	3,0	0,02
F <sub>D</sub>	0,51	6,0	0,08	0,10	3,0	0,03	0,48	6,0	0,08	0,09	3,0	0,03
F <sub>D</sub>	0,45	6,0	0,08	0,07	3,0	0,02	0,34	6,0	0,06	0,05	3,0	0,02

Vzorek	frekvence 1 kHz						frekvence 50 kHz					
	U [mV]	I [mA]	R [ $\Omega$ ]	U [mV]	I [mA]	R [ $\Omega$ ]	U [mV]	I [mA]	R [ $\Omega$ ]	U [mV]	I [mA]	R [ $\Omega$ ]
G <sub>H</sub>	0,69	6,0	0,11	0,24	3,0	0,08	0,62	6,0	0,10	0,19	3,0	0,06
G <sub>H</sub>	0,53	6,0	0,09	0,11	3,0	0,04	0,50	6,0	0,08	0,10	3,0	0,03
G <sub>H</sub>	0,50	6,0	0,08	1,00	3,0	0,33	0,46	6,0	0,08	0,08	3,0	0,03
G <sub>H</sub>	0,48	6,0	0,08	0,08	3,0	0,03	0,49	6,0	0,08	0,10	3,0	0,03
G <sub>H</sub>	0,49	6,0	0,08	0,09	3,0	0,03	0,44	6,0	0,07	0,07	3,0	0,02
G <sub>D</sub>	0,54	6,0	0,09	0,13	3,0	0,04	0,60	6,0	0,10	0,17	3,0	0,06
G <sub>D</sub>	0,53	6,0	0,09	0,11	3,0	0,04	0,58	6,0	0,10	0,16	3,0	0,05
G <sub>D</sub>	0,63	6,0	0,11	0,18	3,0	0,06	0,70	6,0	0,12	0,27	3,0	0,09
G <sub>D</sub>	0,48	6,0	0,08	0,08	3,0	0,03	0,57	6,0	0,09	0,15	3,0	0,05
G <sub>D</sub>	0,59	6,0	0,10	0,15	3,0	0,05	0,47	6,0	0,08	0,09	3,0	0,03
G <sub>D</sub>	0,63	6,0	0,10	0,18	3,0	0,06	0,53	6,0	0,09	0,12	3,0	0,04
H <sub>H</sub>	1,31	6,0	0,22	0,62	3,0	0,21	1,61	6,0	0,27	0,80	3,0	0,27
H <sub>H</sub>	1,47	6,0	0,24	0,71	3,0	0,24	1,80	6,0	0,30	0,91	3,0	0,30
H <sub>H</sub>	1,46	5,0	0,29	0,86	3,0	0,29	1,47	5,0	0,29	0,89	3,0	0,30
H <sub>H</sub>	1,29	5,0	0,26	0,75	3,0	0,25	1,82	5,0	0,36	1,10	3,0	0,37
H <sub>H</sub>	0,88	6,0	0,15	0,43	3,0	0,14	1,92	6,0	0,32	0,97	3,0	0,32
H <sub>H</sub>	1,01	6,0	0,17	0,49	3,0	0,16	2,21	6,0	0,37	1,14	3,0	0,38
H <sub>H</sub>	1,11	5,0	0,22	0,53	3,0	0,18	1,67	5,0	0,33	0,85	3,0	0,28
H <sub>H</sub>	1,33	5,0	0,27	0,64	3,0	0,21	1,98	5,0	0,40	1,02	3,0	0,34
H <sub>D</sub>	0,84	6,0	0,14	0,41	3,0	0,14	0,74	6,0	0,12	0,32	3,0	0,11
H <sub>D</sub>	0,78	6,0	0,13	0,34	3,0	0,11	0,68	6,0	0,11	0,24	3,0	0,08
H <sub>D</sub>	0,69	6,0	0,11	0,23	3,0	0,08	0,56	6,0	0,09	0,14	3,0	0,05
H <sub>D</sub>	0,60	6,0	0,10	0,16	3,0	0,05	0,64	6,0	0,11	0,20	3,0	0,07
H <sub>D</sub>	0,54	6,0	0,09	0,12	3,0	0,04	0,58	6,0	0,10	0,16	3,0	0,05
H <sub>D</sub>	0,65	6,0	0,11	0,20	3,0	0,07	0,64	6,0	0,11	0,21	3,0	0,07
H <sub>D</sub>	0,56	6,0	0,09	0,13	3,0	0,04	0,54	6,0	0,09	0,12	3,0	0,04
I <sub>H</sub>	0,78	6,0	0,13	0,34	3,0	0,11	0,68	6,0	0,11	0,25	3,0	0,08
I <sub>H</sub>	0,76	6,0	0,13	0,30	3,0	0,10	0,67	6,0	0,11	0,23	3,0	0,08
I <sub>H</sub>	0,90	6,0	0,15	0,44	3,0	0,15	0,84	6,0	0,14	0,42	3,0	0,14
I <sub>H</sub>	0,89	6,0	0,15	0,43	3,0	0,14	0,88	6,0	0,15	0,44	3,0	0,15
I <sub>H</sub>	0,66	6,0	0,11	0,22	3,0	0,07	0,66	6,0	0,11	0,23	3,0	0,08
I <sub>H</sub>	0,69	6,0	0,12	0,24	3,0	0,08	0,70	6,0	0,12	0,27	3,0	0,09
I <sub>H</sub>	0,79	6,0	0,13	0,35	3,0	0,12	0,86	6,0	0,14	0,43	3,0	0,14
I <sub>H</sub>	0,87	6,0	0,14	0,42	3,0	0,14	0,91	6,0	0,15	0,45	3,0	0,15
I <sub>D</sub>	0,58	6,0	0,10	0,14	3,0	0,05	0,48	6,0	0,08	0,09	3,0	0,03
I <sub>D</sub>	0,59	6,0	0,10	0,15	3,0	0,05	0,49	6,0	0,08	0,09	3,0	0,03
I <sub>D</sub>	0,55	6,0	0,09	0,12	3,0	0,04	0,47	6,0	0,08	0,09	3,0	0,03
I <sub>D</sub>	0,60	6,0	0,10	0,16	3,0	0,05	0,48	6,0	0,08	0,09	3,0	0,03
I <sub>D</sub>	0,70	6,0	0,12	0,25	3,0	0,08	0,60	6,0	0,10	0,18	3,0	0,06
I <sub>D</sub>	0,70	6,0	0,12	0,26	3,0	0,09	0,67	6,0	0,11	0,24	3,0	0,08

Vzorek	frekvence 1 kHz						frekvence 50 kHz					
	U [mV]	I [mA]	R [Ω]	U [mV]	I [mA]	R [Ω]	U [mV]	I [mA]	R [Ω]	U [mV]	I [mA]	R [Ω]
J <sub>H</sub>	0,71	6,0	0,12	0,26	3,0	0,09	0,61	6,0	0,10	0,18	3,0	0,06
J <sub>H</sub>	0,70	6,0	0,12	0,24	3,0	0,08	0,60	6,0	0,10	0,17	3,0	0,06
J <sub>H</sub>	0,69	6,0	0,11	0,23	3,0	0,08	0,59	6,0	0,10	0,16	3,0	0,05
J <sub>H</sub>	0,67	6,0	0,11	0,19	3,0	0,06	0,54	6,0	0,09	0,13	3,0	0,04
J <sub>H</sub>	0,75	6,0	0,12	0,31	3,0	0,10	0,65	6,0	0,11	0,22	3,0	0,07
J <sub>H</sub>	0,74	6,0	0,12	0,29	3,0	0,10	0,64	6,0	0,11	0,22	3,0	0,07
J <sub>H</sub>	0,64	6,0	0,11	0,20	3,0	0,07	0,52	6,0	0,09	0,11	3,0	0,04
J <sub>H</sub>	0,65	6,0	0,11	0,20	3,0	0,07	0,55	6,0	0,09	0,14	3,0	0,05
J <sub>D</sub>	0,47	6,0	0,08	0,08	3,0	0,03	0,42	6,0	0,07	0,06	3,0	0,02
J <sub>D</sub>	0,44	6,0	0,07	0,06	3,0	0,02	0,30	6,0	0,05	0,04	3,0	0,01
J <sub>D</sub>	0,55	6,0	0,09	0,12	3,0	0,04	0,46	6,0	0,08	0,08	3,0	0,03
J <sub>D</sub>	0,55	6,0	0,09	0,13	3,0	0,04	0,50	6,0	0,08	0,10	3,0	0,03
J <sub>D</sub>	0,46	6,0	0,08	0,08	3,0	0,03	0,29	6,0	0,05	0,04	3,0	0,01
J <sub>D</sub>	0,49	6,0	0,08	0,06	3,0	0,02	0,35	6,0	0,06	0,05	3,0	0,02
J <sub>D</sub>	0,46	6,0	0,08	0,08	3,0	0,03	0,28	6,0	0,05	0,04	3,0	0,01
J <sub>D</sub>	0,43	6,0	0,07	0,06	3,0	0,02	0,29	6,0	0,05	0,04	3,0	0,01
K <sub>H</sub>	0,75	6,0	0,13	0,28	3,0	0,09	0,68	6,0	0,11	0,23	3,0	0,08
K <sub>H</sub>	0,73	6,0	0,12	0,27	3,0	0,09	0,65	6,0	0,11	0,22	3,0	0,07
K <sub>H</sub>	0,77	6,0	0,13	0,33	3,0	0,11	0,72	6,0	0,12	0,29	3,0	0,10
K <sub>H</sub>	0,68	6,0	0,11	0,23	3,0	0,08	0,59	6,0	0,10	0,17	3,0	0,06
K <sub>H</sub>	0,51	6,0	0,08	0,10	3,0	0,03	0,39	6,0	0,06	0,06	3,0	0,02
K <sub>H</sub>	0,73	6,0	0,12	0,28	3,0	0,09	0,64	6,0	0,11	0,21	3,0	0,07
K <sub>D</sub>	0,71	6,0	0,12	0,24	3,0	0,08	0,70	6,0	0,12	0,25	3,0	0,08
K <sub>D</sub>	0,76	6,0	0,13	0,31	3,0	0,10	0,73	6,0	0,12	0,29	3,0	0,10
K <sub>D</sub>	0,64	6,0	0,11	0,20	3,0	0,07	0,65	6,0	0,11	0,22	3,0	0,07
K <sub>D</sub>	0,78	6,0	0,13	0,34	3,0	0,11	0,76	6,0	0,13	0,34	3,0	0,11
K <sub>D</sub>	0,61	6,0	0,10	0,17	3,0	0,06	0,64	6,0	0,11	0,21	3,0	0,07
K <sub>D</sub>	0,59	6,0	0,10	0,16	3,0	0,05	0,63	6,0	0,11	0,20	3,0	0,07
K <sub>D</sub>	0,64	6,0	0,11	0,19	3,0	0,06	0,60	6,0	0,10	0,17	3,0	0,06
L <sub>H</sub>	0,73	6,0	0,12	0,28	3,0	0,09	1,36	6,0	0,23	0,66	3,0	0,22
L <sub>H</sub>	0,70	6,0	0,12	0,23	3,0	0,08	1,46	6,0	0,24	0,71	3,0	0,24
L <sub>H</sub>	0,76	6,0	0,13	0,32	3,0	0,11	2,46	6,0	0,41	1,27	3,0	0,42
L <sub>H</sub>	0,69	6,0	0,11	0,24	3,0	0,08	2,14	6,0	0,36	1,11	3,0	0,37
L <sub>H</sub>	0,79	6,0	0,13	0,36	3,0	0,12	2,22	6,0	0,37	1,13	3,0	0,38
L <sub>D</sub>	0,69	7,0	0,10	0,12	3,0	0,04	0,94	6,0	0,16	0,45	3,0	0,15
L <sub>D</sub>	0,63	7,0	0,09	0,09	3,0	0,03	1,07	6,0	0,18	0,51	3,0	0,17
L <sub>D</sub>	0,72	6,0	0,12	0,25	3,0	0,08	0,96	6,0	0,16	0,48	3,0	0,16
L <sub>D</sub>	0,58	6,0	0,10	0,14	3,0	0,05	0,87	6,0	0,14	0,42	3,0	0,14
L <sub>D</sub>	0,64	6,0	0,11	0,19	3,0	0,06	1,14	6,0	0,19	0,56	3,0	0,19