

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Odporové vrstvy realizované tlustovrstvou technologií

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan SCHMELLER**
Osobní číslo: **E17B0013P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Odporové vrstvy realizované tlustovrstvou technologií**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s technologií tlustých vrstev.
2. Zpracujte přehled odporových materiálů používaných pro výrobu tištěných rezistorů.
3. Proveďte průzkum trhu v oblasti tištěných výkonových rezistorů.
4. Otestujte základní elektrické parametry dodaných tištěných výkonových rezistorů.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **MACH, Pavel, SKOČIL, Vlastimil a URBÁNEK, Jan. Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 440 s. ISBN 80-01-02392-3**
2. **GUPTA, Tapan. Handbook of thick- and thin-film hybrid microelectronics. Hoboken: Wiley-Interscience, 2003. xv, 406 s. ISBN 0-471-27229-9.**
3. **elektronické informační zdroje**

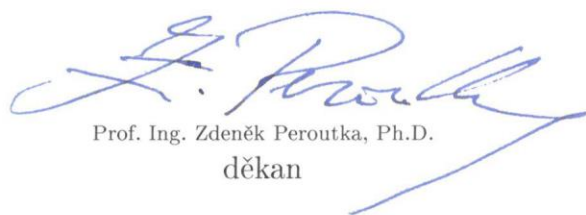
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Hlína

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2019**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná práce je zaměřena na tištěné odporové vrstvy tvořené tlustovrstvou technologií. Nejprve je popsán princip technologie tlustých vrstev, používané pasty a metoda nanášení těchto past pomocí sítotisku. Poté je zpracován přehled odporových past, kde jsou uvedeny jejich základní vlastnosti. Dále je uveden přehled tištěných výkonových rezistorů vyhledaných na trhu. Závěr práce shrnuje praktické měření základních elektrických vlastností tištěných rezistorů.

Klíčová slova

Tlustovrstvá technologie, tlustovrstvé rezistory, tištěné rezistory, sítotisk, odporové pasty, vodivé pasty, výkonové rezistory

Abstract

Submitted bachelor's thesis is focused on printed resistive films created by thick film technology. First, the principle of thick film technology, used pastes and method of applying these pastes by screen printing are described in this thesis. Then there is an overview of resistance pastes, where their basic properties are listed. There is also a summary of high-power resistors on the market. The final part of thesis is focused on the practical applications and on the practical measurement of the electrical properties of printed resistors.

Key words

Thick-film technology, thick-film resistors, printed resistors, screen printing, resistive pastes, conductive pastes, power resistors

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 11.6.2019

Jan Schmeller

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Hlínovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 TECHNOLOGIE TLUSTÝCH VRSTEV	11
1.1 PASTY	11
1.1.1 Vodivé pasty.....	12
1.1.2 Odporové pasty.....	13
1.1.3 Dielektrické pasty.....	17
1.2 SÍTOTISK	17
1.2.1 Princip sítotisku.....	18
1.2.2 Rámy a síta	19
1.2.3 Těrky.....	21
1.2.4 Vytváření filmové matrice (sítotiskové šablony)	21
1.3 SUŠENÍ A VÝPAL.....	22
1.4 TLUSTOVRSŤVÉ REZISTORY.....	23
1.4.1 Trimování rezistorů	24
2 PŘEHLED ODPOROVÝCH MATERIÁLŮ	26
3 PŘEHLED TIŠTĚNÝCH VÝKONOVÝCH REZISTORŮ	27
4 PRAKTICKÁ ČÁST	28
4.1 MĚŘENÍ TEPLOTNÍ ZÁVISLOSTI ODPORU	28
4.2 MĚŘENÍ JMENOVITÉHO ZATÍŽENÍ.....	32
4.3 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU	34
4.4 MĚŘENÍ PRŮRAZNÉHO NAPĚTÍ U_p	34
ZÁVĚR	37
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	38
PŘÍLOHY	I
PŘÍLOHA A – OBRÁZKY Z MĚŘENÍ.....	I
PŘÍLOHA B – PASTY	II
PŘÍLOHA C – REZISTORY.....	XIV

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na tištěné odporové vrstvy vytvářené pomocí tlustovrstvé technologie.

Text bakalářské práce je rozdělen do čtyř částí. První část je věnována technologii tlustých vrstev, vodivým, odporovým a dielektrickým pastám používaným v této technologii, složkám těchto past, metodou aplikace past sítotiskem, procesem vypalování past a úpravou odporových hodnot pomocí laserového trimování. Metoda sítotisku je popsána velmi podrobně, od samotného principu po jeho jednotlivé komponenty jako jsou rámy, síta a těrky. Také je zde popsán průběh napínání sítotiskových ráků a proces vytváření filmové matrice. Ve druhé části je zpracován přehled odporových materiálů získaný z katalogů od různých výrobců. Zde jsou uvedeny hlavní parametry odporových past. Třetí část je věnována průzkumu trhu tištěných výkonových rezistorů, čtenář zde nalezne přehlednou tabulku různých typů výkonových tlustovrstvých rezistorů, sérií a jejich specifikace. Závěrečná část práce je tvořena praktickou částí. V této části byly testovány základní elektrické vlastnosti dodaných tlustovrstvých rezistorů podle příslušných norem.

Seznam symbolů a zkratek

ppm parts per million (10^{-6})
 R_p plošný odpor [Ω /čtverec]
TCR teplotní koeficient odporu [ppm/ $^{\circ}$ C]
VCR napěťový koeficient odporu [ppm/V]

Ag_2O oxid stříbrný
 Al_2O_3 oxid hlinitý
 Co_2O_3 oxid kobaltitý
 CuO_2 oxid mědičitý
 Fe_2O_3 oxid železitý
 In_2O_3 oxid inditý
 IrO_2 oxid iridičitý
 LaB_6 hexaborid lanthanu
 MnO_2 oxid manganičitý
 Nb_2O_5 oxid niobičitý
 Rh_2O_3 oxid rhoditý
 RuO_2 oxid rutheničitý
 SiO_2 oxid křemičitý
 SnO_2 oxid cíničitý
 $SrRuO_3$ ruthenan strotnatý
 TaN nitrid tantalu
 Ti_2O_2 oxid titaničitý
 $TiSi_2$ disilcid titanu
 V_2O_5 oxid vanadičný
 ZrO_2 oxid zirkoničitý

1 Technologie tlustých vrstev

Hlavním účelem technologie tlustých vrstev je vytváření vodivých, odporových nebo dielektrických vrstev na keramických substrátech. Nejpoužívanějším materiálem na výrobu substrátů je Al_2O_3 . [1]

Tlustovrstvá technologie spadá pod vrstevové technologie, u nichž vytváříme elektricky funkční oblasti jako vrstvy na izolačních podložkách. Hlavní význam této technologie spočívá v dosažení parametrů sítě spojů, které nelze vytvořit jinými způsoby [2].

Oproti tenkým vrstvám se tlusté vrstvy vyznačují větší tloušťkou, která bývá od 1 μm výše. Tlusté vrstvy se nanáší ve formě past pomocí sítotisku nebo šablonového tisku. Po tisku následuje sušení a výpal a následně je možné tisknout další vrstvy, případně je možné vypalovat i více vrstev současně. [2]

1.1 Pasty

Pasty pro tlusté vrstvy se skládají ze tří základních složek. Z funkční složky, která udává celkový charakter pasty (tj. zda má být pasta vodivá, odporová, či dielektrická), z pojivové složky, která má za úkol spojení se substrátem a z organické složky, která udává tiskové vlastnosti pasty a během procesu sušení a výpalu zcela vyhoří. [1]

Funkční složka je popsána u každého typu pasty zvlášť.

Pojivová složka zaručuje adhezi pasty s podložkou, se kterou je při výpalu spojována. Skládá se převážně ze skleněné frity upravené do jemného prášku z olovnatoboritokřemičitého, hlinitokřemičitého nebo bizmutitokřemičitého skla. Pojivová složka v pastě zabírá cca 2-3 % celkové hmotnosti. [2]

Organická složka přenáší funkční a pojivovou složku a skládá se z polymerní a rozpustidlové části. Strukturu této složky tvoří polyvinylacetát, polyvinylalkohol, etylcelulóza apod. Z rozpustidel xylen nebo terpentýn. Při výpalu tato složka vyhoří. [2]

Dále je nutné zmínit složku **modifikující**, které slouží k úpravě viskozity past a používá se při skladování a tisku past. Může to být například borovicový olej, terpineol a jeho izomery, butylkarbizolacetát, atd. Modifikující složka při sušení a počátku výpalu jako organická složka také vyhoří. [2]

1.1.1 Vodivé pasty

Vodivé pasty označují tixotropní kompozice. Funkční složku vodivých past tvoří částice kovů nebo slitin kovů (zlato, stříbro-palladium, stříbro-platina, měď, atd.) [2]. Základní vlastnosti vodivých past jsou uvedeny v Tab. 1 [3].

Zlato je výborný vodivý materiál s výtečnou odolností proti korozi a migraci [4]. Jeho vlastnosti jsou vhodné pro bondování pomocí termokomprese. Celkové využití omezuje vysoká cena a špatná pájitelnost. Používá se s příměsí platiny, palladia, hliníku či india [5].

Stříbro je cenově dostupnější vodič s nejnižší rezistivitou, snadno se pájí. Přestože se stříbro snadno smáčí roztravenými Sn-Pb pájkami, jeho odolnost vůči vyluhování je špatná. Upravením složení pájky, například přidáním 2% Ag se výrazně zlepší odolnost vůči vyluhování [4, 6]. Stříbro může být vypalováno společně s odporovými pastami. Atomy stříbra pod vlivem elektrických polí migrují a tím způsobují zkratky a reagují s mnoha formulacemi odporové pasty [5]. Důležitá je tedy kompatibilita Ag a odporové pasty, aby k těmto reakcím nedocházelo.

Nejběžnější vodivé pasty jsou na bázi Ag-Pd či Ag-Pt slitin. Palladium se přidává kvůli minimalizaci migrace částic stříbra, pro zlepšení odolnosti vůči vyluhování [6], nicméně příliš mnoho palladia by mělo za následek zvýšení odporu vodičů, zhoršení pájitelnosti a zvýšení ceny [7]. Tato pasta nabízí vynikající pájitelnost s SnPb, SnAg a SnPbAg pájkami [8]. Ag-Pt pasty vynikají velmi nízkou rezistivitou, dobrou pájitelností, využívají oxidové vazby pro dobrou adhezi k substrátu a dají se dobře bondovat pomocí zlatých drátků [9, 10].

Další možností je využití vodivých past s mědí, protože měď disponuje dobrou hodnotou povrchové rezistivity v rozsahu 1,5 až 2 m Ω /čtverec. Měď se dá dobře pájet, je cenově přijatelná a nastává u ní nízká migrace iontů. Měď také nabízí dobrou bondovatelnost pomocí ultrazvukového bondování hliníkovým drátkem. V současné době se měděné pasty vypalují v inertní dusíkové atmosféře (tzn. bez vodíku) [2].

Tab. 1: Vlastnosti vodivých past (převzato z [3])

Vlastnost	Ag-Pd	Au-Pd	Au-Pt	Au
Teplota výpalu [° C]	760- 1000	760 - 1000	800- 1000	760- 1000
Plošný odpor Rp [Ω /čtverec]	0,01- 0,06	0,05- 0,1	0,08- 0,1	0,003- 0,01
Rožlišení motivů [μ m]	50- 400	50- 400	50- 400	50- 400
Adheze 4 mm ² po 100 hod. 125 °C [N]	15- 40	30- 40	10- 45	-

Při výběru vodivých past je třeba věnovat pozornost následujícím parametrům [6, 8, 11]:

- a) *Vodivost*. Měla by být dostatečně vysoká, kvůli minimalizaci poklesů napětí, zahřívání a rušení ostatních obvodových funkcí.
- b) *Adheze*. Žádné součásti, ať už připojené vodiče nebo diskrétní komponenty, se nesmí během montáže či používání oddělit.
- c) *Pájitelnost*. Je nutné, aby u vodivých past byla možnost pájení, spojení termální kompresí nebo ultrazvukovou technikou.
- d) *Čistota*. Pasta by měla být schopna vytvářet jemné linky bez jakýchkoliv nechtěných odtoků a šmouh.
- e) *Kompatibilita*. Také je potřeba, aby vodivá pasta byla kompatibilní se zpracováním a použitím tlustovrstvých odporů a dielektrických kompozic.
- f) *Stabilita*. Pasta by si při celém procesu měla zachovat stabilní vlastnosti, taktéž i během své životnosti.

1.1.2 Odporové pasty

Tyto pasty slouží k vytváření odporových vrstev na způsob cermetu. Cermetem se nazývají materiály, které vytváří tavnou strukturu vodivé fáze ve sklovitém, nevodivém pojivu. Odporová pasta je tvořena kombinacemi práškového vodivého pigmentu a izolačního skleněného prášku (boritokřemičné frity). Dodržování teploty

(600-1100 °C [12]), doby výpalu (45-60 min) a dalších technologických parametrů je nezbytné pro kvalitní výsledek požadovaných vlastností odporových vrstev. V tabulce 2 jsou uvedeny vlastnosti různých odporových past [3]. Hodnota plošného odporu R_p je dána poměrem vodivých částic a skla. Na odporové pasty je kladeno několik důležitých požadavků [5]:

- Široký rozsah hodnot plošného odporu
- Stabilita odporu, zvláště při vysokých teplotách (150 °C)
- Nízký teplotní součinitel odporu TCR ($< \pm 100$ ppm/ °C) a dobrou reprodukovatelnost TCR pro přesné sledování hodnot odporu mezi rezistory na stejném substrátu
- Nízký napěťový koeficient odporu (VCR)
- Nízký šum
- Kompatibilita se systémy vodivých past

Tab. 2: Vlastnosti odporových past (převzato a upraveno z [3])

Vlastnost	Pd-Ag	RuO ₂	Ruteničitany
Plošný odpor R_p [Ω /čtverec]	10- 10 ⁵	1- 10 ⁷	10- 10 ⁷
Teplotní součinitel odporu -55 až +125 °C [K ⁻¹]	300. 10 ⁻⁶	300. 10 ⁻⁶	50- 250. 10 ⁻⁶
Rozptyl hodnot odporu po výpalu [%]	30	10	10 ⁻²⁵
Teplota výpalu [°C]	850	980	850
Napěťový součinitel odporu [V ⁻¹]	150. 10 ⁻⁶	400. 10 ⁻⁶	-19. 10 ⁻⁶
Doba výpalu [min]	60	45	60

Vodivá fáze používaná u přípravků tlustovrstvých rezistorů by měla splnit následující požadavky: stabilitu při špičkové vypalovací teplotě, úplnou rozpustnost ve skle při vypalovací teplotě a snadné smáčení ve skle. Při zdůraznění těchto požadavků se výběr vodivé fáze pro vzduchotěsné odporové systémy omezuje na několik binárních oxidů kovů jako je RuO₂ a IrO₂. Tyto oxidy kovů vykazují termodynamickou stabilitu ve vzduchu při typické tlustovrstvové teplotě zpracování 850 °C. Složitější vodivé materiály běžně používané u komečních tlustovrstvých rezistorů jsou Bi₂RuO₇, Pb₂Ru₂O₆ a Ag-Pd-PdO. Různé oxidy kovů jsou vypsány v tabulce 3. Zmíněné vodivé materiály vykazují kladný teplotní koeficient odporu a jejich hodnota odporu je o něco vyšší než odpor jednotlivých prvků kovů těchto sloučenin. [4]

Tab. 3: Oxidy kovů a jejich rezistivita (převzato a upraveno z [4])

Oxid	ρ při 300 K [$\Omega \cdot \text{cm}$]
RuO ₂	$3,5 \cdot 10^{-5}$
IrO ₂	$4,9 \cdot 10^{-5}$
Rh ₂ O ₃	$<10^{-4}$
BiRu ₂ O ₇	$2,3 \cdot 10^{-2}$
Ri ₂ Rh ₂ O _{6,8}	$3,2 \cdot 10^{-3}$
Bi ₂ Ir ₂ O ₇	$1,5 \cdot 10^{-3}$
PbRu ₂ O ₆	$2,0 \cdot 10^{-2}$
Pb ₂ Ru ₂ O _{6,5}	$5,0 \cdot 10^{-4}$
Pb ₂ Rh ₂ O ₇	$6,0 \cdot 10^{-1}$
Pb ₂ IrO _{6,5}	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Pb ₂ Os ₂ O ₇	$4,0 \cdot 10^{-4}$
Ti ₂ Ru ₂ O ₇	$1,5 \cdot 10^{-2}$
TiIr ₂ O ₇	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Ti ₂ Rh ₂ O ₇	$6,0 \cdot 10^{-4}$
Ri ₂ Os ₂ O ₇	$1,8 \cdot 10^{-4}$
LaRuO ₃	$4,5 \cdot 10^{-3}$
La _{0,5} Sr _{0,5} RuO ₃	$5,6 \cdot 10^{-3}$
CaRuO ₃	$3,7 \cdot 10^{-3}$
SrRuO ₃	$2,0 \cdot 10^{-3}$
BaRuO ₃	$1,8 \cdot 10^{-3}$

Při vypalování v dusíkové atmosféře jsou typickými vodivými fázemi oxid cíničitý (SnO₂), oxid inditý (In₂O₃), ruthenan strontnatý (SrRuO₃), hexaborid lanthanu (LaB₆), disilicid titanu (TiSi₂) a nitrid tantalu (TaN)[4, 13].

Obecně používané izolační skleněné frity jsou skleněná olovnatá borosilikátová skla. U odporové pasty hraje nejdůležitější roli chemie skla, na které jsou závislé její parametry. Ke klíčovým vlastnostem skla patří teplota měknutí skla a viskozita skla při vypalovací teplotě. [4]

Odporové pasty malých hodnot, tedy pasty s plošným odporem R_p menším než $10 \Omega/\text{čtverec}$ se používají jako tlustovrstvé rezistory malých odporů. Jejich základ je tvořen z tuhých roztoků Ag-Pd a izolační skleněné matrice. Používají se v telekomunikační technice k ochraně elektronických zařízení proti bleskům a proti vzniku elektrického oblouku. Zde je vyžadováno nízkých hodnot plošného odporu ($<100 \text{ m}\Omega/\text{čtverec}$), nízkých hodnot TCR ($< \pm 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) a vynikající stability při elektrickém přepětí. Hodnoty TCR mohou být upraveny pomocí optimalizace poměru

Ag/Pd a velikostí částic prášků skla a kovů. Dalšími požadavky pro tyto rezistory jsou dobrá stabilita při testech životnosti, jako jsou stárnutí vlhkostí a teplem, dobrá laserová trimovatelnost a stabilita při vícenásobném vypalování. [4]

Správný výběr skleněných a kovových prášků může pomoci k plnému slinutí rezistoru s hustou mikrostrukturou bez pórů. Zvyšováním obsahu kovu klesá plošný odpor pasty při určité rychlosti chlazení.

Odporové pasty středních a vyšších hodnot, jsou pasty s plošným odporem přesahujícím hodnoty $10 \Omega/\text{čtverec}$. Pasty pro tyto rezistory obsahují vodivý oxid, například RuO_2 , Bi_2RuO_7 nebo Pb_2RuO_7 , izolační skleněný prášek a organické činidlo. Mimo to obsahují příměs stabilizátorů či modifikátoru TCR, kvůli změně elektrických vlastností past. Hodnoty TCR jsou typicky $\pm 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ a upravují se změnou typu či množství modifikátorů TCR v pastě. Polovodičové oxidy, jako je oxid mangančitý (MnO_2), oxid kobaltitý (Co_2O_3), oxid titaničitý (Ti_2O_2), oxid niobičitý (Nb_2O_5), oxid železitý (Fe_2O_3), oxid rhoditý (Rh_2O_3) a oxid vanadičný (V_2O_5), se přidávají k úpravě hodnot TCR v negativním směru. Tyto sloučeniny jsou označovány jako záporné modifikátory TCR. Do past se také přidávají oxidy kovů, označované jako kladné modifikátory TCR, které posouvají hodnoty TCR v pozitivním směru. Patří sem oxid mědičitý (CuO_2) a oxid stříbrný (Ag_2O). Přidáním oxidů Al_2O_3 , SiO_2 nebo ZrO_2 se zlepšuje odporová stabilita a zredukuje se citlivost na změny při procesních podmínkách, nazývají se stabilizátory. Tlustovrstvé rezistory na bázi oxidu rutheničitého (RuO_2) patří k jedním z nejpoužívanějších rezistorů. [4, 14]

Hodnoty TCR a plošného odporu jsou funkcí příslušných vodivých a skleněných práškových fází. Prášek oxidu rutheničitého je komerčně dostupný v rozmezí velikosti částic od 5 do 100 nm. Částice s takhle malou velikostí aglomerují. Velikost částic je funkčností povrchové plochy prášku, která je specifickou vlastností pro odporové vodivé fáze. Jako skleněný prášek se používá olovnatý borosilikát, jehož hustota je $4,31 \text{ g}/\text{cm}^3$, koeficient lineární tepelné roztažnosti (při $25\text{-}200 \text{ }^\circ\text{C}$) je $6,03 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, bod namáhání $464 \text{ }^\circ\text{C}$, teplota žíhání $469 \text{ }^\circ\text{C}$ a bod deformace $490 \text{ }^\circ\text{C}$. Kromě velikosti částic, hraje významnou roli chemie skla u regulace elektrických vlastností jako jsou odpor, napětí TCR, přesun elektrostatického výboje a také u vlastností laserového trimování a stability odporu. [4]

Typický poměr složení skla z olovnatého borosilikátu je znázorněn v tabulce 4. Největší procentuální poměr ve skle zaujímá oxid olovnatý (55%), naopak nejmenší poměr ve skle vytváří chemická sloučenina oxid hlinitý (12%).

Tab. 4: Chemické složení olovnatého borosilikanátového skla (převzato a upraveno z [4])

Oxid	Obsah [%]
PbO	55,5
B ₂ O ₃	22,0
SiO ₂ T	10,5
Al ₂ O ₃	12,0

1.1.3 Dielektrické pasty

Dielektrické pasty se dělí na izolační, u kterých je potřeba nízké relativní permitivity a na pasty dielektrické, které se používají pro tisk kondenzátorů, zde se vyžaduje vysokých hodnot relativní permitivity.

Funkční složka izolačních past bývá tvořena na bázi oxidu hliníku Al₂O₃ nebo jiných keramik ve formě jemného prášku. Při kontrole tisku nastává problém malého kontrastu pro tisk na keramické podložky, proto zde nacházení uplatnění barvicí přísady. Ty mohou být dočasné a při výpalu vyhoří anebo stálé, které zůstanou. Barvicí přísady zlepšují přehlednost struktury. Relativní permitivita ϵ_r se po výpalu pohybuje v hodnotách 5 až 10, tudíž veškeré křížení vodičů ve vrstvené struktuře vždy vytvoří parazitní kondenzátor. Pokud použijeme polyimid či polytetraethylén, dostaneme se k hodnotám 2 až 4, díky tomu je polymerní izolační pasta schopná vydržet při velmi vysokých frekvencích v řádech GHz [2].

1.2 Sítotisk

Sítotisková technologie patří k jednomu z nejdůležitějších kroků při výrobě tlustovrstvých vrstev. Jedná se o aditivní proces moderní tiskové techniky vhodný pro hromadnou výrobu [15]. Existuje zde několik parametrů, které ovlivňují kvalitu výsledného natištěného motivu. Mezi tyto parametry patří napnutí síta, počet ok, potažení emulzí, rychlost stěrky [8], úhel mezi vlákny síta a tištěným obrazcem [16], tlak, stabilita, pružnost, vzdálenost síta od podložky, teplota při zpracování a relativní vlhkost [8].

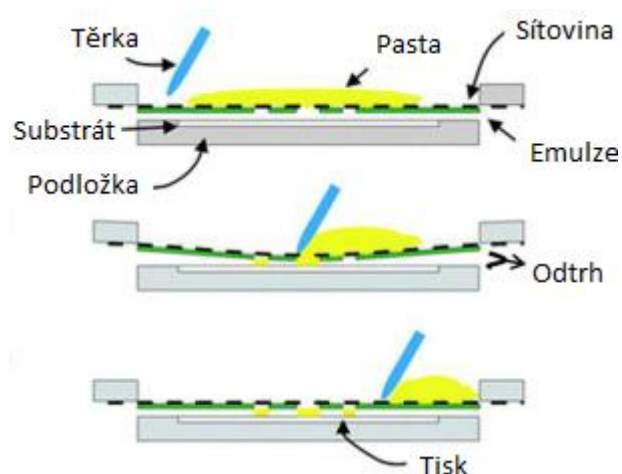
Sítotiskem označujeme základní technologii k nanášení leptuvzdorných rezistů, tlustovrstvé pasty, pájecí pasty, lepidla, fotorezistu a potisku. Jeho základními komponenty jsou [2]:

- síto s vytvořenou tiskovou šablonou
- pastový materiál
- sítotiskové zařízení

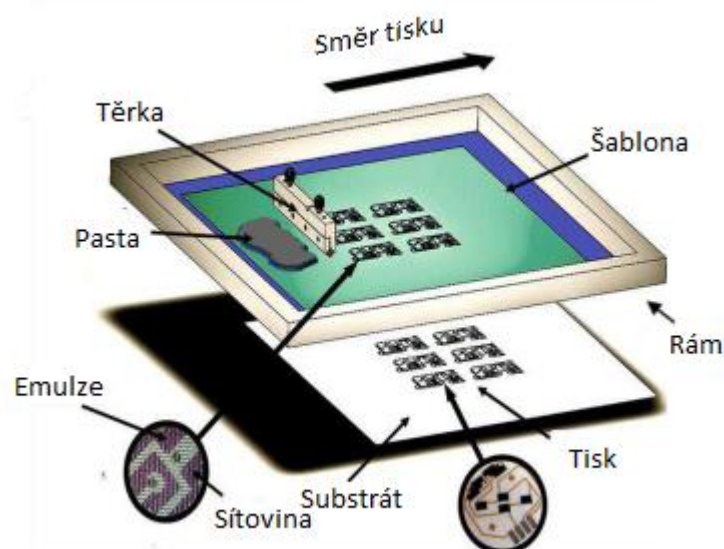
1.2.1 Princip sítotisku

Hlavním principem sítotiskové metody je vytlačení určitého množství pasty na substrát přes vytvořený motiv obrazce na sítu [17] viz obr. 1 a 2.

Pomocí fotolitografického procesu je požadovaný motiv přenesen na síto. Souběžně se zkontrolují parametry pasty připravené výrobcem a pasta se nanese na síto. Poté následuje zkušební tisk a z jeho vyhodnocení se upraví parametry tisku (například odklon síta, sklon a rychlost pohybu těrky, pozice obrazce ve směrech os x-y). Pokud je vše v pořádku, tak se může pokračovat v potisku. Povrch natisknuté vrstvy se pomocí rozlévání a povrchovému napětí vyrovná [2].



Obr. 1: Princip sítotisku (převzato a upraveno z [17])



Obr. 2: Sítotiskové součásti (převzato a upraveno z [17])

1.2.2 Rámy a síta

Rámy jsou na trhu dostupné buď jako hliníkové (viz obrázek 3) nebo ocelové trubky různých profilů, na které jsou připevněny a napnuty síta z nerezové oceli [2, 8]. Velikost rámu v poměru k velikosti tištěného motivu [2] by měla být alespoň 1,5 - 2násobkem větší než velikost tištěného obrazce, aby se síťovina během tisku mohla prohnut bez výrazného zkreslení [5].



Obr. 3: Hliníkový rám [18]

Pro kvalitní přenos pasty síťovinou musí být velikost jednotlivých ok 2,5 až 3krát větší než velikost částic pasty. Při potisku nerovného povrchu je vhodné použití dostatečně elastické tkaniny. Na tkaniny se používá různá síla vláken s označením S, T a HD, kde typ S používá nejslabší vlákna, typ T střední vlákna a typ HD nejsilnější vlákna [2].

Výslednou velikost tloušťky pasty získáme z technických hodnot tkaniny jako počet vláken na cm, tloušťka vlákna d , velikost oka w , volná plocha tkaniny F_0 a tloušťka tkaniny a . Tloušťka a spolu s volnou plochou tkaniny F_0 udávají přibližné množství pasty VG [cm^3/m^2]. Tímto můžeme určit spotřebu pasty. Dle zmíněných parametrů se dělí tkaniny na:

- a) Tkaniny s velikostí oka větší než tloušťka vlákna ($w > d$)
- b) Tkaniny s velikostí oka stejnou jako tloušťka vlákna ($w = d$)
- c) Tkaniny s velikostí oka menší než tloušťka vlákna ($w < d$) [2]

1.2.2.1 Napínání sítotiskových rámu

Pro napínání sítoviny se používá speciálních napínacích zařízení. Po obvodu rámu jsou rozmístěny klapky, do kterých je postupně upínána sítovina. Čelisti klapek musí být dobře očištěny, protože každá nečistota by mohla přispět k posunutí nebo vytrhnutí tkaniny. Ohled musí být dbán také na parametr mezní napínací síly, tj. síla, která určuje míru maximálního napnutí. Průběh napínání je rozdělen do částí, při kterých se tah klapek postupně zvyšuje. [19]

Po vypnutí se sítovina umístí na plochu rámu a styčná plocha se potře lepidlem, možné je také sítovinu položit na rám potřený lepidlem. Pro lepení sítoviny na rám se používají dvousložková lepidla na bázi polyuretanu, ta se většinou nanáší štětcem. K lepení větších rámu je vhodné použití lepidel s pozvolnějším zasycháním, protože rychle schnoucí lepidlo může zaschnout ještě před samotným nanesením. Nalepená sítovina zůstává vypnuta v napínacím zařízení až do doby plného zaschnutí lepidla. Pro co nejlepší kontakt mezi rámem a tkaninou se sítovina zatěžuje. Uvolnění tahu napínacího zařízení je možné až po kompletním zaschnutí lepidla. Poté následuje oříznutí přebytečných sítovin kolem rámu a kontrola napnutí sítoviny pomocí mechanických měřících systémů [19]. Zhotovené rámy lze používat minimálně po 24–48 hodinách, protože během prvních hodin bezprostředně po napnutí zde dochází k poklesu napětí. Například u monofilní polyesterové tkaniny nastává pokles napětí o 2–3 N/cm. [2]

1.2.3 Těrky

Těrka je plochá deska, obsahující břit na spodní straně. Při průchodu těrky přes síto s šablonou je pasta roztírána po ploše síta [2] a nastává protlačování pasty skrz oka na substrát. Pro správný a přesný průběh tohoto procesu musí být zajištěna rovnost hrany těrky, ostrost a geometrická přesnost [20].

Těrky se vyrábí buďto pryžové nebo kovové, jejich volba závisí především na vlastnostech zvolené pasty a šablony [2]. Mohou mít různý tvar profilu jako například obdélníkový, zkosený nebo zakulacený [20].

K výhodám pryžových těrek patří nízká pořizovací cena, možnost použití pro nerovné a víceúrovňové šablony. Na druhou stranu nabírají pastu z ok, tedy nejsou přijatelné pro větší otvory.

Problém s nabíráním pasty z otvorů odstraňují kovové těrky, které poskytují velmi rovnou úroveň tisku. Může se používat nižší přítlak a jsou více rezistentní vůči poškození. Oproti pryžovým těrkám mají vyšší cenu a rychleji opotřebují šablonu.

Hlavní parametry těrky jsou rychlost těrky, přítlak těrky, kvalita povrchu a úhel náklonu [2].

1.2.4 Vytváření filmové matrice (sítotiskové šablony)

Sítotisková šablona se vytváří vyplňováním tkaninových (pletivových) ok pomocí fotocitlivé emulze. Zbylá oka budou nevyplněná a tím i průchozí. Využívají se 3 základní typy šablon: přímá šablona, nepřímá šablona a kombinovaná šablona.

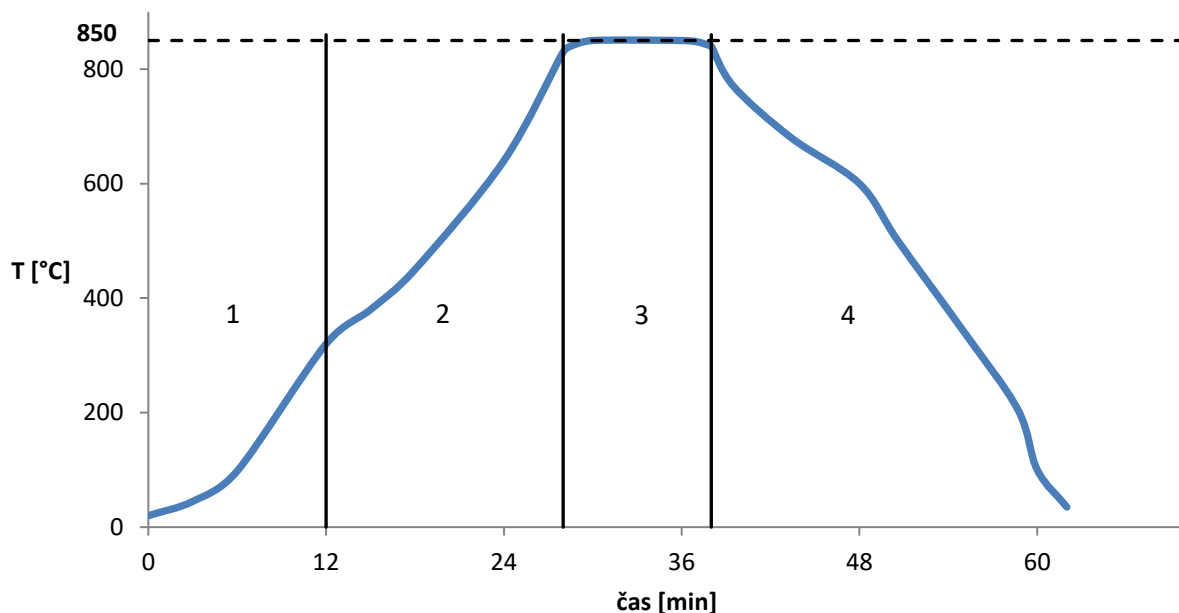
U přímé šablony se fotocitlivá emulze natře na tkaninová oka, provede se expozice a následně se nechá vyvolat [2]. U nepřímé metody sítotiskových šablon se namísto fotocitlivé emulze využívá šablonového filmu [2] ve formě listu [3]. Exponování a vyvolání může být provedeno před aplikací na síto. Kombinovanou šablonu tvoří emulze ve formě listu. Na síto se aplikuje před exponováním a vyvoláním [2].

1.3 Sušení a výpal

Při procesu sušení se odpařují organická rozpouštědla těkavého charakteru [3] z tištěných filmů. Tyto rozpouštědla obsahují bod varu pohybující se v rozmezí 180 až 250 °C. Vzhledem k vysokému poměru plochy povrchu k objemu nanesených filmů se sušením odstraňuje většina rozpouštědel z nezasušených filmů při teplotě 80 až 160 °C po dobu 10 až 30 minut. Jako sušičky se běžně používají pece využívající konvekční vytápění nebo pásové infračervené pece [4].

Výpal patří k nejkritičtější části tlustovrstvé technologie [12], kde mezi sebou chemicky reagují směsi pasty a dochází k vzniku pevné vazby s podložkou [3]. Hlavními parametry jsou zde teplotní profil pece a atmosféra, záleží zde na typu použité pasty. U běžně používaných past se teplota výpalu pohybuje od teploty 600 °C do 1100 °C, typicky 850 °C (viz obrázek 1). Výpal se provádí cca 10 minut [12].

Na obrázku 4 je znázorněn teplotní profil výpalu v průběžné peci. První zóna je oblast sušení, v druhé zóně nastává předehřívání, kde se odstraňují zbylé stopy rozpouštědel, teplota zde stoupá rychlostí cca 50 °C/min. U třetí zóny dochází k samotnému vypalování a v závěrečné zóně pec chladne [3].



Obr. 4: Teplotní profil výpalu tlustých vrstev v průběžné peci (převzato a upraveno z [3])

1.4 Tlustovrstvé rezistory

Prvním krokem výroby standardních tištěných rezistorů je tisk kontaktů. Nejčastěji používaná pasta pro tyto kontakty je Ag nebo Ag-Pd. Druhým krokem je nanesení odporové pasty. V dalším kroku může být zakrytí odporové vrstvy izolační pastou, která chrání odporovou vrstvu před vnějšími vlivy – chemickými látkami, vlhkostí atd. Poté může následovat trimování rezistoru na přesnou hodnotu. K specifickým vlastnostem tlustovrstvých rezistorů patří schopnost změny plošného odporu [11] pomocí nastavování objemového zlomku vodivé fáze a TCR. Plošný odpor lze měnit nejméně alespoň v šesti řádech (od 10 do 10⁷ Ω/čtverec). Moderní tlustovrstvé odpory vykazují hodnoty TCR nižší než ±100 ppm/°C [4]. Nicméně neustálé zdokonalování techniky se projevuje i u výrobců tlustovrstvých systémů a ti vyvíjí materiály s TCR charakteristikami 25 ppm/°C (od -55 °C do +125 °C) [8].

Tyto rezistory jsou široce využívány v hybridních mikroobvodech, protože mohou splňovat designové požadavky a pyšní se žádoucí odezvou při vysokých frekvencích. Takových funkcí lze jen těžko dosáhnout pomocí křemíkových monolitických integrovaných obvodů. Nejdůležitější elektrickou vlastností tlustovrstvých rezistorů je rozsah plošného odporu [4]. V tabulce 5 jsou uvedeny vlastnosti tlustovrstvých rezistorů pro hodnoty odporů od 10 Ω do 10 MΩ. Jednotlivé požadavky kladené na odporové materiály jsou v tabulce 6.

Tab. 5: Typické vlastnosti tlustovrstvých rezistorů (převzato a upraveno z [4])

Vlastnost	Hodnoty rezistorů						
	10 Ω	100 Ω	1 kΩ	10 kΩ	100 kΩ	1 MΩ	10 MΩ
Plošný odpor [Ω/čtverec]	10	100	1 k	10 k	100 k	1 M	10 M
Tolerance [%]	±10	±10	±10	±10	±10	±10	±20
TCR [ppm/°C]	±10 0	±100	±10 0	±10 0	±100	±10 0	±200
Změna způsobená elektrostatickým výbojem (2000V) [%]	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Změna odporu po tepelném stárnutí [%]	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.5	<0.5
Změna odporu po tepelných cyklech [%]	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Změna odporu po tepelných šocích [%]	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Změna odporu po vlhkostním stárnutí [%]	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.5	<0.5
Krátkodobé napěťové přetížení [V/mm]	8	25	75	250	380	370	-
Výkonová ztráta [mW/mm ²]	900	600	800	1000	230	22	-
Šum [dB]	<-30	<-30	<-20	<-15	<-10	-	-

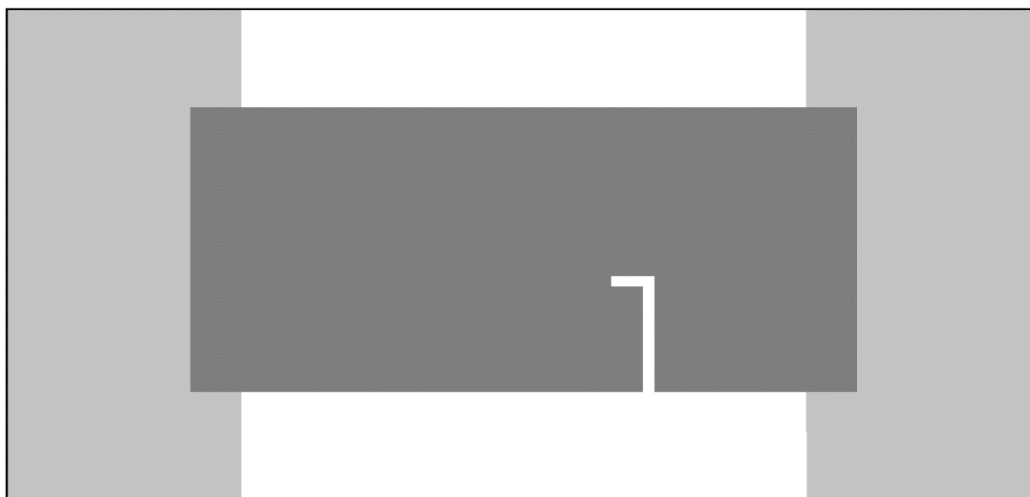
Tab. 6: Důležité požadavky na odporové materiály (převzato a upraveno z [21])

elektrické	velký měrný odpor ρ
	malý teplotní koeficient odporu α_R
	velká proudová zatížitelnost J
	malé termoelektrické napětí vůči mědi
mechanické	dobrá opracovatelnost
	dobrá tažnost
	stabilní vlastnosti při zpracování za studena
chemické	odolnost proti korozi
	odolnost proti oksličování
tepelné	malá teplotní roztažnost
	dobrá pájitelnost
	dobrá tepelná odolnost
	vysoký bod tání

1.4.1 Trimování rezistorů

Na hybridní tlustovrstvé rezistory je kladen vysoký požadavek tolerancí $\pm 0,1\%$ [8]. Tedy není možné vypálení na předem stanovenou hodnotu s požadovanými tolerancemi, proto se zde využívá metody laserového trimování. Rezistory se pomocí laseru upravují tak, že se odstraňuje část rezistorového materiálu, to má za následek zvýšení celkové hodnoty odporu.

Odstranění materiálu laserovým trimováním probíhá krátkými koherentními světelnými impulsy s vysokou intenzitou. Materiál absorbuje světelnou energii, tím se velice rychle zahřeje a odpaří se. Jediný takovýto impuls dokáže odstranit objem rezistorového materiálu v řádu několika kubických mikrometrů. Laserový řez je vytvářen sledem překrývajících se laserových pulsů. [8]



Obr. 5: Tištěný tlustovrstvý rezistor po aplikaci laserového trimování

Na obrázku 5 je znázorněn tištěný tlustovrstvý rezistor po úpravě pomocí laserového trimování za účelem doladění odporu na přesnou hodnotu.

2 Přehled odporových materiálů

Tabulka shrnující přehled odporových materiálů používaných v tlustovrstvé technologii se nachází v příloze B. Každá série obsahuje několik dílčích past s odlišnými parametry. Mezi tyto parametry patří plošný odpor, TCR, šum, teplota sušení, teplota výpalu, velikost tisknutých částic, tloušťka vysušené pasty a skladovatelnost. V přehledu je také uvedeno několik termistorových past, u kterých je místo TCR uvedena konstanta β . β je definována jako teplotní konstanta závislosti odporu termistoru na teplotě [22]. Pasty, které v katalogu neobsahovaly tloušťku zasušené pasty, mají v přehledu uvedenou tloušťku vypálené pasty (pokud byla k dispozici). Polymerní pasty mají místo teploty výpalu teplotu vytvrzení.

3 Přehled tištěných výkonových rezistorů

Tato kapitola je věnována komerčním výkonovým tlustovrstvým rezistorům, které byly vyhledány u různých společností. Z dat, nalezených v katalozích jednotlivých společností, byla zpracována přehledná tabulka (viz příloha C) obsahující základní parametry vyhledaných výrobků. Mezi tyto parametry patří výkon, maximální pracovní napětí, maximální krátkodobé napěťové přetížení, rezistivita, která je rozdělena podle různých tolerancí a provozní teplota.

4 Praktická část

Cílem praktické části této bakalářské práce bylo testování a specifikace základních elektrických parametrů dodaných tištěných výkonových rezistorů dle norem ČSN EN 60115-1 a ČSN EN 140200. Testovalo se celkem 10 vzorků (viz obr. 6).

Rezistory byly natištěny na 96 % Al_2O_3 substrátu s tloušťkou 0,318 mm. Kontakty rezistorů byly natištěny Ag-Pt pastou Heraeus C1076SD a odporová vrstva (dvoučtvercová struktura) byla natištěna odporovou pastou Heraeus R8921 s plošným odporem $100 \Omega/\text{čtverec}$.

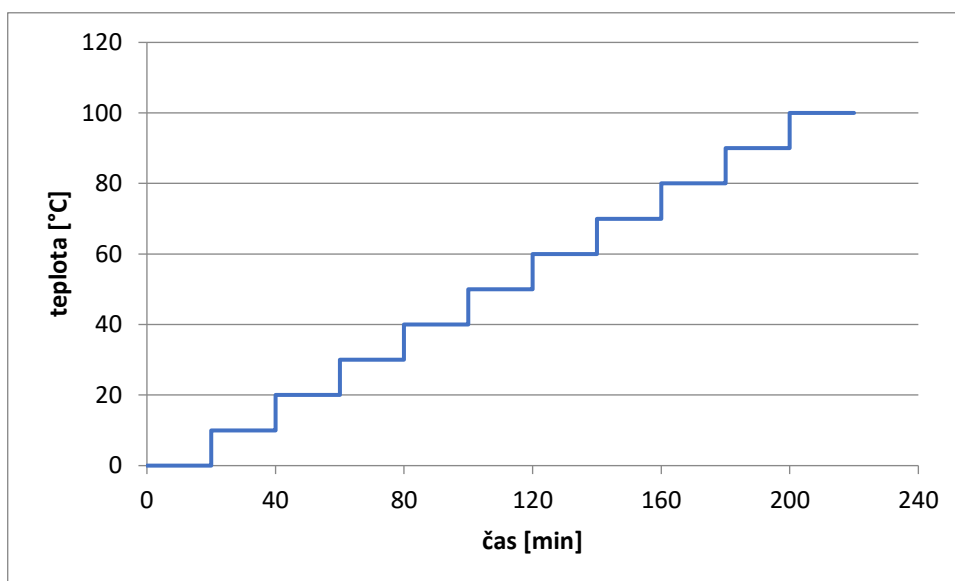


Obr. 6: Dodaný vzorek rezistoru

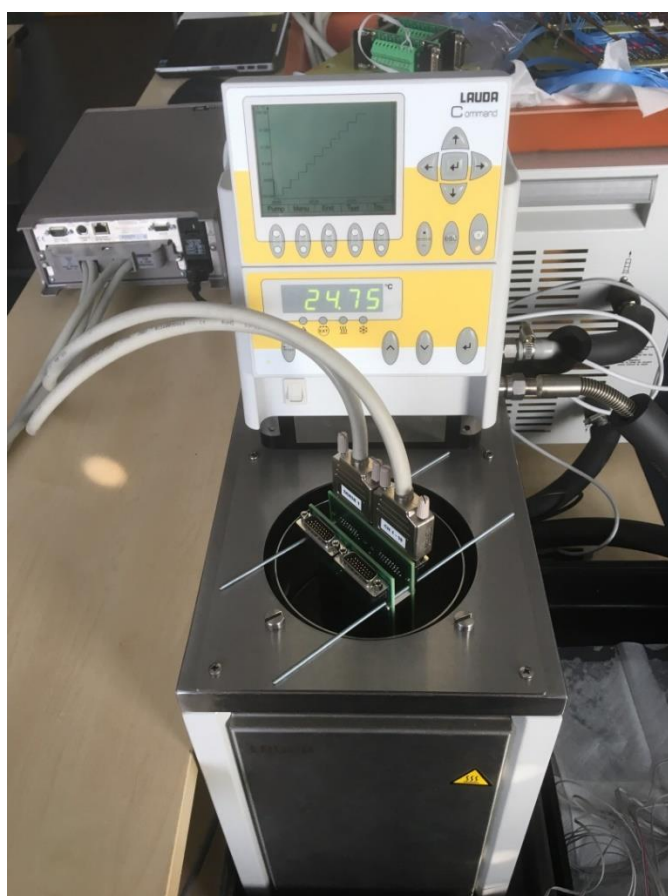
4.1 Měření teplotní závislosti odporu

Teplotní závislost odporu byla měřena v termostatické lázni Lauda PJJ12 naplněné silikonovým olejem v rozmezí teplot od 0 do 100 °C s krokem 10 °C. Teplotní profil je znázorněn na obrázku 7. Z teplotního profilu je patrné, že z důvodu ustálení hodnot odporu probíhalo měření při jednotlivých teplotách po dobu 20 minut. Vzorky byly umístěny v měřicím přípravku (viz příloha A), který byl vložen do termostatické lázně (viz obr. 8). Měřicí přípravek byl pomocí datových kabelů propojen s multimetrem Keithley 2701E, který sloužil jako datalogger. Dataloger po dobu 4 hodin odečítal každých 30 sekund hodnoty všech vzorků. Z těchto hodnot byly vypočteny hodnoty změny odporu (viz tab. 7), sestrojeny grafy závislosti odporu na teplotě (viz obr. 10, 11) a podle vzorce (1) vypočteny hodnoty TCR a jejich změn (viz tab. 8). Následně bylo provedeno stárnutí

vzorků suchým teplem při teplotě 155 °C po dobu 1000 hod dle ČSN EN 60068-2-2 a poté byla opět změřena teplotní závislost odporu, vypočteno TCR a změny hodnot odporu a TCR po stárnutí suchým teplem.

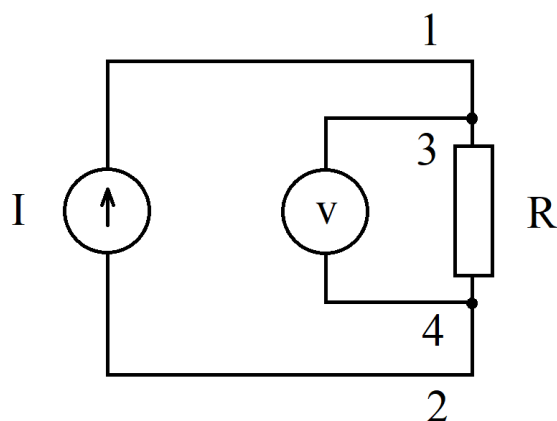


Obr. 7: Teplotní profil termostatické lázně



Obr. 8: Termostatická lázeň s vloženým měřícím přípravkem

V katalogu je od výrobce dána hodnota použité odporové pasty TCR ± 100 ppm/°C. Podle normy je pro tuhle hodnotu, při porovnávací teplotě 20 °C a nejvyšší hodnotě kategorie 100 °C, maximální přípustná tolerance $\pm 0,80$ %. Pro měření rezistivity byla použita čtyřbodová metoda. Na vodiče 1 a 2 je přiveden proud a na vodičích 3 a 4 je měřeno napětí. K výhodám této metody patří eliminace přechodového odporu. Metoda je vhodná pro přesné měření nízkých hodnot odporů. Na obrázku 9 je znázorněno schéma zapojení čtyřbodové metody. Z měření (viz tab. 8) vyšla procentuální změna TCR $\pm 0,46$ %, která je tedy v normě.



Obr. 9: Schéma zapojení čtyřbodové metody

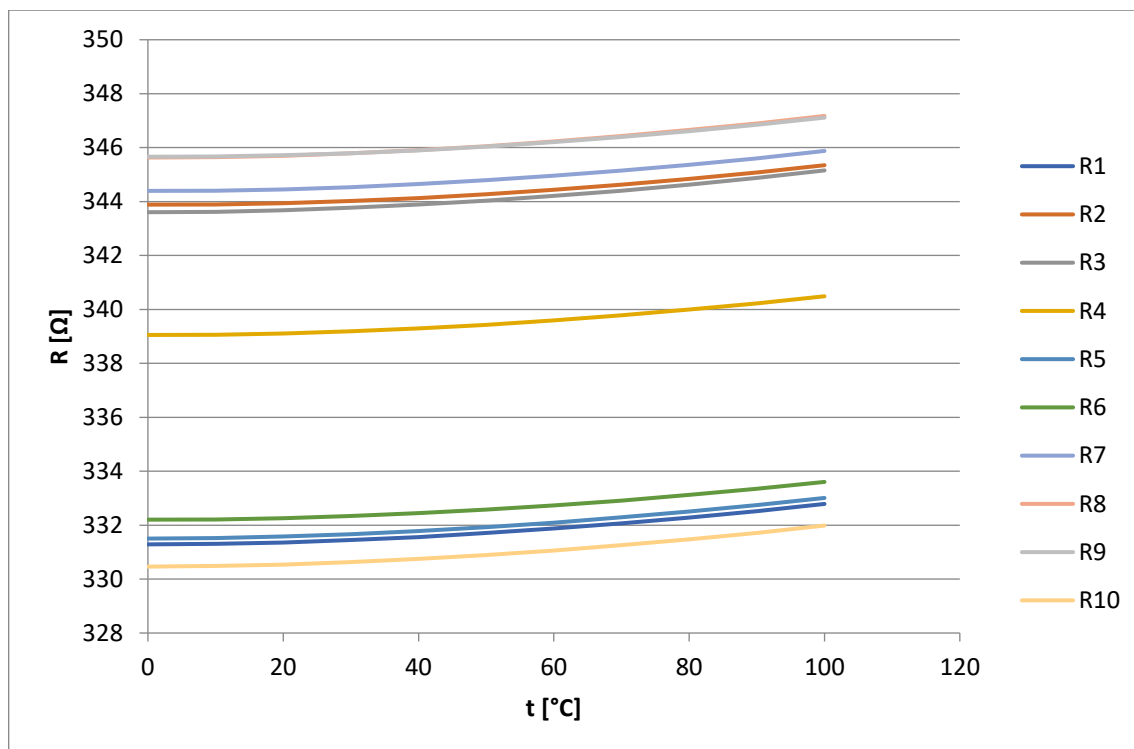
Mez změny odporu měřených rezistorů spadá podle naměřených hodnot (viz tabulka 10) a podle norem do třídy stability 0,5 ($0,5 \% \cdot R + 0,05 \Omega$).

Výpočet TCR:

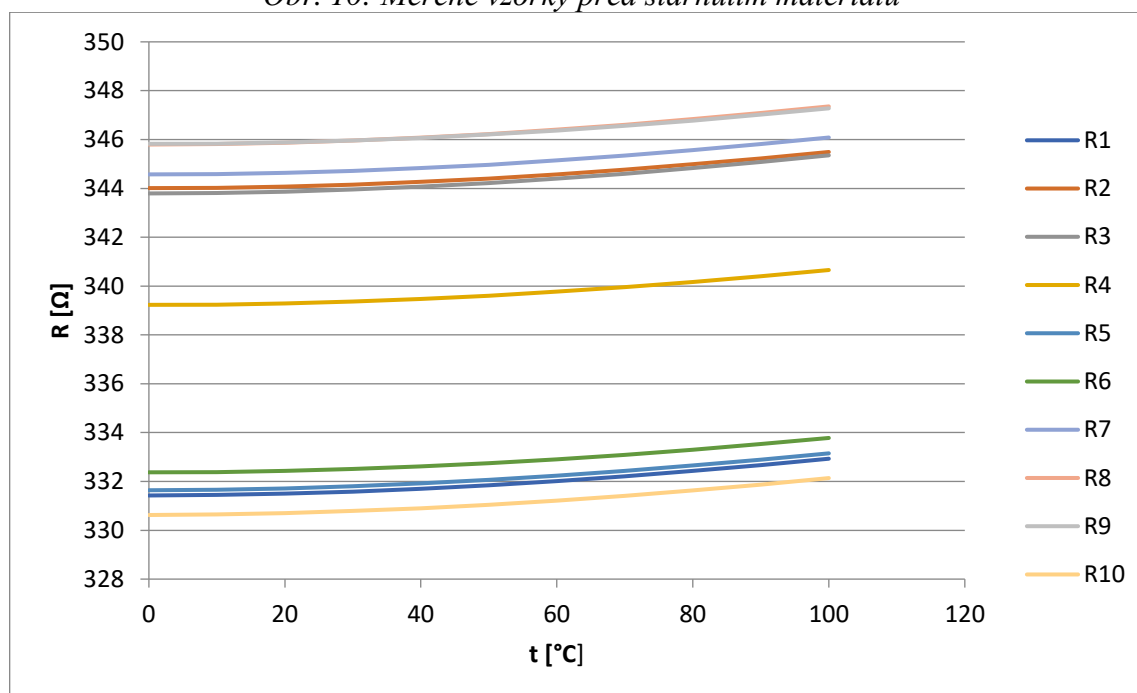
$$TCR = \frac{\Delta R}{R \cdot \Delta T} \cdot 10^6 \text{ [ppm/}^\circ\text{C]} \quad (1)$$

$$\Delta T = t - t_{ref} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2)$$

$$\Delta R = R - R_{ref} \text{ [\Omega]} \quad (3)$$



Obr. 10: Měřené vzorky před stárnutím materiálu



Obr. 11: Měřené vzorky po stárnutí materiálu

Tab. 7: Měřené vzorky při teplotě 20 °C a jejich porovnání před a po stárnutí materiálu

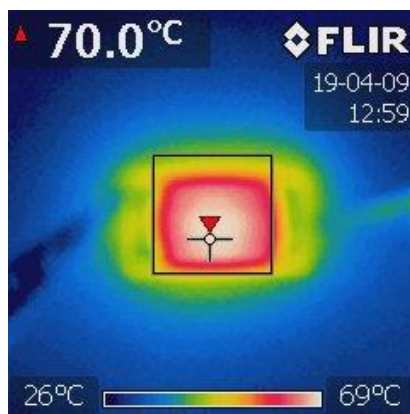
Vzorek	R před stárnutím [Ω]	R po stárnutí [Ω]	ΔR [Ω]	ΔR [%]
1	331,36	331,50	0,14	0,04%
2	343,94	344,07	0,13	0,04%
3	343,68	343,87	0,19	0,05%
4	339,11	339,29	0,18	0,05%
5	331,58	331,72	0,14	0,04%
6	332,26	332,43	0,17	0,05%
7	344,45	344,63	0,18	0,05%
8	345,70	345,87	0,17	0,05%
9	345,71	345,88	0,16	0,05%
10	330,54	330,70	0,16	0,05%
Průměr	338,83	338,99	0,16	0,05%

Tab. 8: Hodnoty teplotního součinitele odporu

Vzorek	TCR [ppm/°C]		
	Před stárnutím	Po stárnutí	ΔTCR [%]
1	45,07	45,20	0,29%
2	42,33	42,84	1,19%
3	44,91	45,20	0,65%
4	42,12	41,86	-0,61%
5	45,25	45,35	0,22%
6	41,94	42,15	0,52%
7	42,82	43,61	1,84%
8	44,44	44,94	1,11%
9	41,77	41,81	0,09%
10	45,85	45,52	-0,70%
Průměr	43,65	43,85	0,46%

4.2 Měření jmenovitého zatížení

V měření se postupovalo podle normy pro výkonové rezistory do 1000 W. Měření jmenovitého zatížení je v normě definováno jako výkon, který způsobí zahřátí rezistoru bez chladiče na 70 °C. Pomocí stejnosměrného napájecího zdroje napětí RXN-303D Zhaoxin bylo zvyšováno napětí na jednotlivých vzorcích a tím se zároveň zvyšoval protékající proud i jejich teplota. Hodnoty proudu a napětí byly odečítány z multimetrů v době, kdy na vzorku byla ustálená teplota 70 °C. Teplota byla snímána pomocí termokamery IR CAM FLIR i7 (viz obr. 12).



Obr. 12: Snímaná teplota termokamerou

Jmenovitý výkon se vypočítal ze vztahu:

$$P = U * I [W] \tag{4}$$

Naměřené a vypočítané hodnoty jednotlivých vzorků byly zaznamenány do tabulky 9 a pomocí aritmetického průměru bylo zjištěno, že průměrný jmenovitý výkon testovaných vzorků je 0,74 W. Toto měření vyžadovalo dostatek času, protože se teplota ustálila až po několik minutách a pokud přesáhla teplotu 70 °C, tak se vzorek musel zchladit.

Tab. 9: Jmenovitý výkon testovaných vzorků

Číslo vzorku:	Napětí [V]	Proud [A]	Jmenovitý výkon [W]
1	16,75	0,04	0,67
2	17,01	0,05	0,85
3	16,34	0,05	0,82
4	16,63	0,05	0,83
5	15,89	0,04	0,64
6	16,13	0,04	0,65
7	17,12	0,05	0,86
8	18,00	0,04	0,72
9	15,92	0,04	0,64
10	17,90	0,04	0,72
Průměrná hodnota	16,77	0,04	0,74

4.3 Měření izolačního odporu

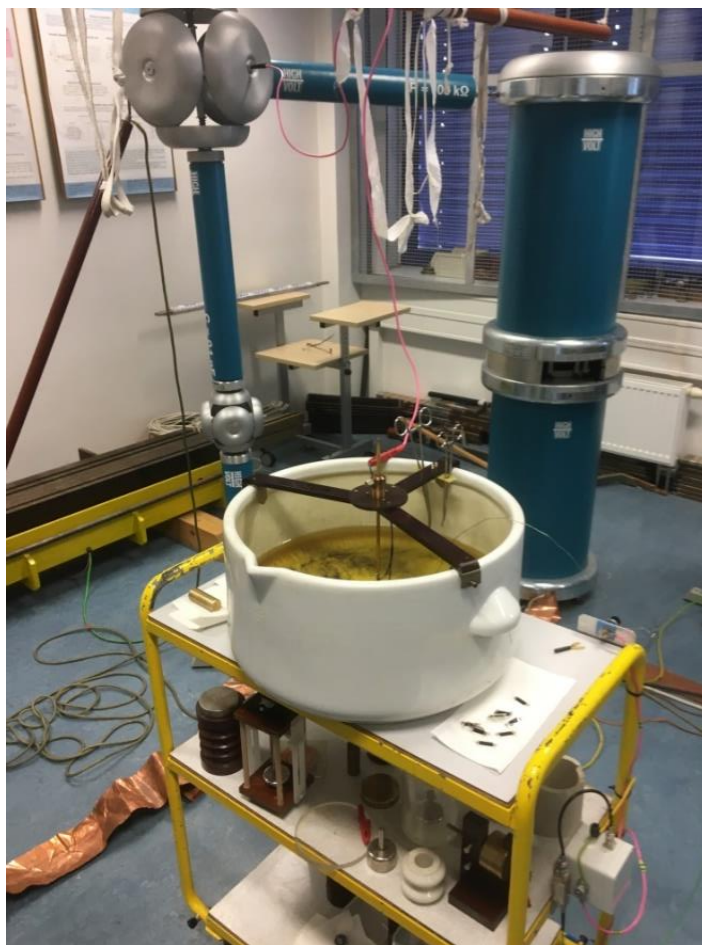
Podle normy musí být standardní meze pro izolační odpor minimálně 1 G Ω nebo po zkouškách vlhkosti 100 M Ω . Tato hodnota byla z měření splněna (viz tabulka 10). Měřené vzorky byly jednotlivě umísťovány na elektrodu do plechového boxu, který po uzavření minimalizoval příjem okolních vlivů. Na elektrometru Keithley 6017 bylo nastaveno stejnosměrné napětí 500 V. Po připojení k vzorku započalo měření proudu, které u každého vzorku trvalo několik minut, kvůli ustálení hodnoty. Z Ohmova zákona se podle výsledných hodnot proudu a nastaveného měřicího napětí 500 V dopočítal izolační odpor.

Tab. 10: Izolační odpor testovaných vzorků

Číslo vzorku	Proud [nA]	Izolační odpor [G Ω]
1	10,80	46,30
2	13,20	37,90
3	1,44	347,00
4	10,00	50,00
5	13,10	38,20
6	0,21	2440,00
7	1,20	416,00
8	1,55	323,00
9	1,49	336,00
10	0,20	2460,00
Průměrná hodnota	5,32	649,44

4.4 Měření průrazného napětí U_p

Toto měření probíhalo ve speciální laboratoři (viz obr. 13), kde bylo na vzorcích testováno průrazné napětí U_p . Vzorky umístěné v olejové lázni byly měřeny tak, že se zkratovaly vývody rezistorů – první elektroda a druhá elektroda byla umístěna na spodní straně substrátu. Měřilo se střídavým napětím při frekvenci 50 Hz. Průměrná hodnota U_p měřených vzorků vyšla 3,87 kV (viz. tab. 11).



Obr. 13: Testovací laboratoř

Tab. 11: Měření průrazného napětí

Číslo vzorku:	U_p [kV]
1	4,50
2	3,30
3	3,60
4	2,60
5	4,90
6	2,80
7	4,40
8	3,90
9	4,30
10	4,40
Průměr	3,87

V tabulce 12 jsou shrnuty základní informace a výsledné parametry měřených rezistorů dle požadovaných norem.

Tab. 12: Parametry měřených vzorků

Materiál substrátu	Al ₂ O ₃
Materiál kontaktů	Ag-Pt
Odpor [Ω]	340
Tolerance [%]	±10
TCR [ppm/°C]	±100
Jmenovité výkonové zatížení [W]	0,74
Průrazné napětí [kV]	3,87
Izolační odpor [GΩ]	650
Pracovní teplota [°C]	-55 až 155
Změna TCR po zkoušce suchým teplem [%]	±0,46
Změna odporu po zkoušce suchým teplem [%]	±0,05

Závěr

V první kapitole této práce byly uvedeny základní informace o technologii tlustých vrstev, pomocí které jsou tvořeny tlustovrstvé rezistory. Tlusté vrstvy jsou vytvářeny procesem zvaným sítotisk, který protlačuje požadované pasty skrze motiv obrazce na sítu. K nejdůležitějším složkám tlustovrstvých past patří funkční a pojivová složka. Mnoho odporových past bylo uvedeno v kapitole 2. Dále bylo popsáno tepelné zpracování past v pecích a teplota výpalu, která dosahuje u tlustovrstvých past nejčastěji 850 °C. Hodnota rezistorů může být doladována pomocí laserového trimování. Ve třetí kapitole jsou dohledatelné různé komerční výkonové tlustovrstvé rezistory.

Testování a specifikace elektrických parametrů dodaných tištěných výkonových rezistorů probíhalo dle příslušných norem ČSN EN 60115-1 a ČSN EN 140200. Z měření teplotní závislosti odporu byly vypočítány hodnoty změn odporu před a po stárnutí materiálu, které měly průměrnou hodnotu $\pm 0,05$ %. Dále byly vypočítány hodnoty změn TCR s průměrnou hodnotou $\pm 0,46$ %. V normě je pro neproměnné výkonové rezistory uvedena hodnota $\pm 0,8$ %, která byla splněna. Ve výsledných grafech jsou znázorněny charakteristiky závislosti odporu na teplotě (viz obr. 10, 11). Z měření výkonového zatížení vzorků byla získána průměrná hodnota vzorků jmenovitého výkonu 0,74 W, teplota na vzorcích byla snímána pomocí citlivé termokamery. Měřením izolačního odporu byla zjištěna průměrná hodnota vzorků izolačního odporu 649,44 G Ω , která splňovala minimální standardní mez 1 G Ω uvedenou v normě. V posledním měření bylo změřeno průrazné napětí vzorků. Aritmetickým průměrem všech vzorků byla vypočítána hodnota průrazného napětí 3,87 kV. Výsledné a zjištěné hodnoty parametrů a jejich specifikace byly uvedeny v tabulce 12.

Seznam literatury a informačních zdrojů

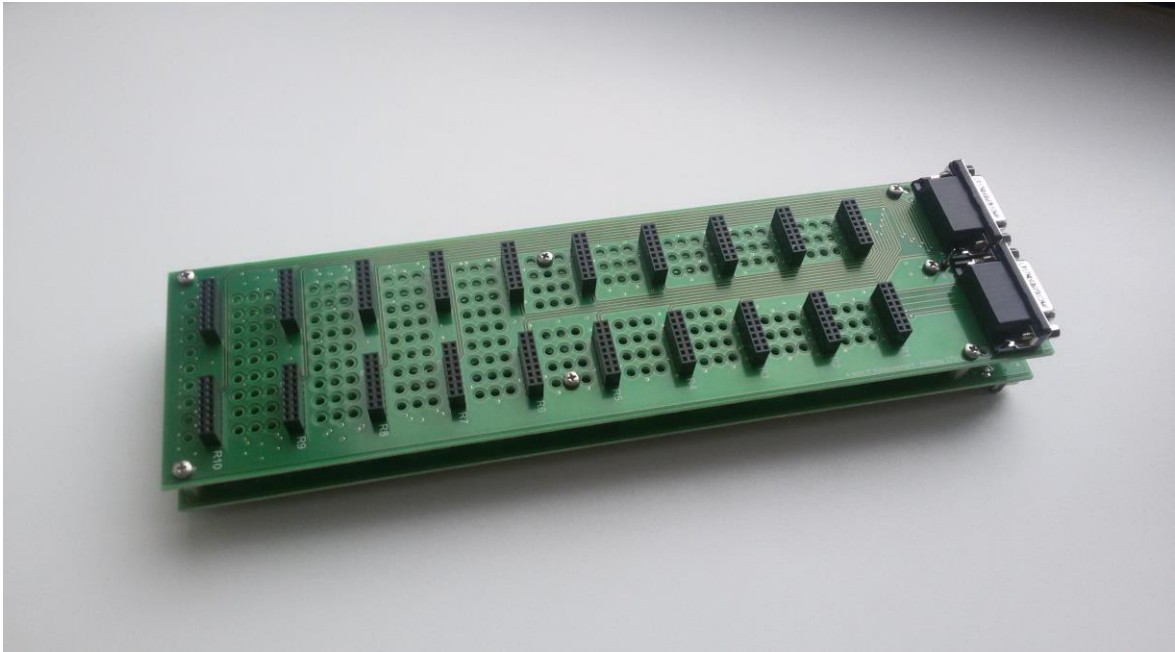
- [1] HLÍNA, J, Jan ŘEBOUN a Aleš HAMÁČEK. Vlastnosti měděných a stříbrných tlustých vrstev na keramických substrátech Properties of Copper and Silver Thick Films on Ceramic Substrates [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017, s. 3–6. ISBN 978–80–261–0712–5. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/26467>
- [2] MACH, P., V. SKOČIL a J. URBÁNEK. *Montáž v elektronice : pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [3] SZENDIUCH, Ivan. Vytváření tlustovrstvé pasivní sítě. *Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Ústav mikroelektroniky* [online]. [vid. 2019-03-14]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/L03_Vytváření_tlustovrstvé_pasivní_sítě.pdf
- [4] SERGENT, Jerry E a Charles A HARPER. *Hybrid Microelectronics Handbook*. Second. New York, San Francisco, Washington, D.C., Auckland, Bogotá, Caracas, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, Montreal, New Delhi, San Juan, Singapore, Sydney, Tokyo, Toronto: McGraw-Hill, Inc., 1995. ISBN 0-07-026691-3.
- [5] IDC TECHNOLOGIES. *Thick film technology* [online]. [vid. 2019-03-12]. Dostupné z: http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electronic_engineering/Thick_film_technology.pdf
- [6] ZAHRADNÍČEK, Tomáš. *ANGLICKO-ČESKÝ TECHNICKÝ SLOVNÍK A-L ENGLISH-CZECH TECHNICAL DICTIONARY* [online]. Velké tech. Ostrava - Mariánské Hory: MONTANEX a.s., 2002. ISBN 80-7225-081-7. Dostupné z: www.vsechnyknihy.cz
- [7] TSENG, Yen-Chang. Manufacturing process analysis of Ag/Pd thick film conductor circuits. *Lehigh University* [online]. 1995 [vid. 2019-03-18]. Dostupné z: <https://preserve.lehigh.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1389&context=etd>
- [8] GUPTA, Tapan K. *Handbook of thick- and thin-film hybrid microelectronics*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003. ISBN 0-471-27229-9.
- [9] HERAEUS ELECTRONICS. Thick film materials. *Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG* [online]. [vid. 2019-05-25]. Dostupné z: https://www.heraeus.com/en/het/products_and_solutions_het/thick_film_materials/th_overview/thick_film_materials_page.html
- [10] ELCERAM A.S. *Technical characteristics and design rules of thick film printed ceramic substrates production* [online]. [vid. 2019-06-02]. Dostupné z: http://www.elceram.cz/user-files/tinymce/files/technical_conditions_of_printed_ceramics_elceram_rev1.1_en.pdf

- [11] ZAHRADNÍČEK, Tomáš. *ANGLICKO-ČESKÝ TECHNICKÝ SLOVNÍK M-Z ENGLISH-CZECH TECHNICAL DICTIONARY* [online]. Ostrava - Mariánské Hory: MONTANEX a.s., 2002. ISBN 80-7225-082-5. Dostupné z: www.vsechnyknihy.cz
- [12] ADÁMEK, Martin. Technologie výroby a používané materiály. *VUT Brno* [online]. [vid. 2019-03-16]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_2_2_2.htm
- [13] HRNČÍŘ, Jan. Chemické názvosloví. *Gymnázium F. X. Šaldy* [online]. 2006 [vid. 2019-05-04]. Dostupné z: <http://anorganika.gfxs.cz>
- [14] OSAMU, Abe, Taketa YOSHIAKI a Haradome MIYOSHI. The Effect of various factors on the resistance and TCR of RuO₂ Thick film resistors - Relation between the electrical properties and particle size of constituents, the physical properties of glass and firing temperature. Japan: Active and Pasive Elec. Comp., 1988, s. 67–83.
- [15] DE VOS, Marc, Russel TORAH, Steve BEEBY a John TUDOR. Functional electronic screen-printing - Electroluminescent lamps on Fabric. *Procedia Engineering* [online]. 2014, **87**(0), 1513–1516. ISSN 18777058. Dostupné z: [doi:10.1016/j.proeng.2014.11.586](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.586)
- [16] SKOČIL, Vlastimil. Diferenciace ploch a objemů. 2018, 41.
- [17] MEDINA, Beatriz. Inkjet and screen printing for electronic applications [online]. 2016. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/2445/107156>
- [18] *Hliníkový rám* [online]. [vid. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.dickblick.com/products/speedball-screen-printing-frames/#photos>
- [19] THOMA, Patrik. Napínání sítotiskových rámců. *Svět tisku 9 / 2005* [online]. 2005 [vid. 2019-04-27]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=1872
- [20] THOMA, Patrik. Sítotiskové těrky. *Svět tisku 12 / 2005* [online]. 2005 [vid. 2019-03-14]. Dostupné z: [doi:Svět tisku 12 / 2005](https://doi.org/10.1016/j.svt.2005.12.005)
- [21] TKOTZ, Klaus. *Příručka pro elektrotechnika*. Vydání první. Praha: Europa-Sobotáles cz. s.r.o., 2002. ISBN 80-86706-00-1.
- [22] JANÍČEK, Jan. *Polovodičové snímače teploty - termistory* [online]. [vid. 2019-06-07]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/polovodicove-snimace-teploty-termistory-2015_01_53323_7922/
- [23] *DuPont* [online]. [vid. 2019-05-31]. Dostupné z: <https://www.dupont.com/products/thick-film-resistor-materials.html>
- [24] *LORD* [online]. [vid. 2019-05-31]. Dostupné z: <https://www.lord.com/products-and-solutions/electronic-materials/thick-film-materials>
- [25] *ESL ElectroScience* [online]. [vid. 2019-05-31]. Dostupné z: <http://www.electroscience.com/products>

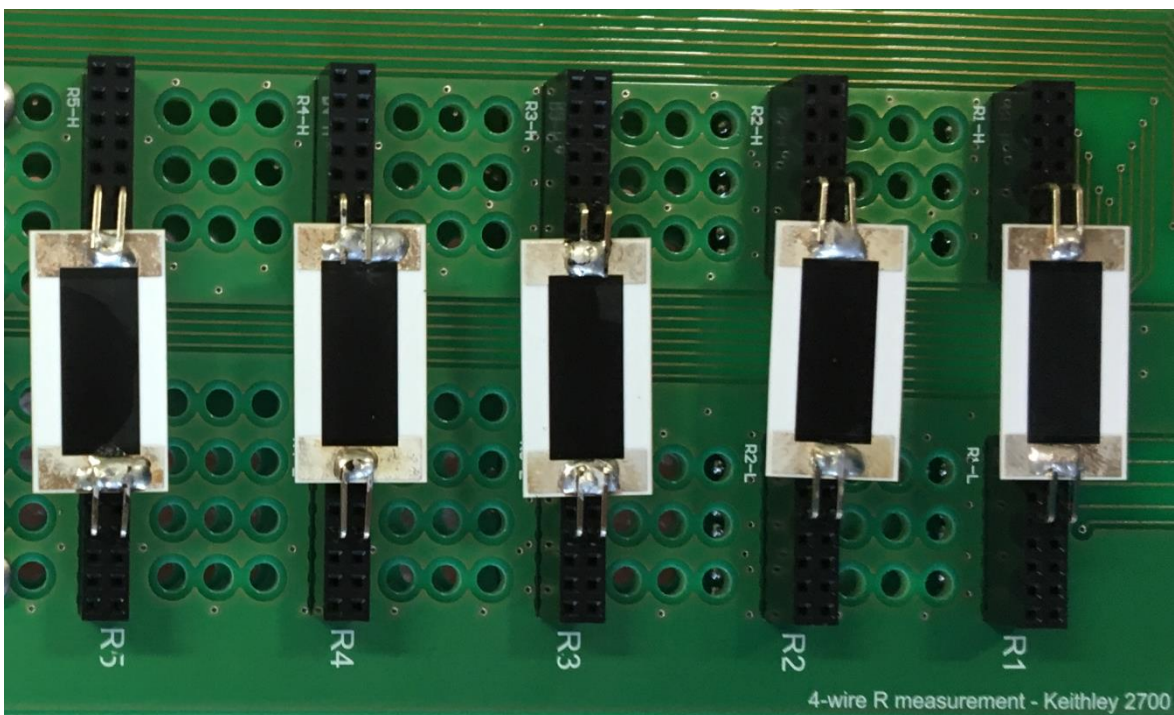
- [26] *TANAKA* [online]. [vid. 2019-05-31]. Dostupné z: <http://www.tanaka-europe.eu/products/thin-thick-film-metallization/thick-film-pastes-precious-metal-powders/resistor-pastes/#c267>
- [27] *Ohmite* [online]. [vid. 2019-06-01]. Dostupné z: <https://www.ohmite.com/thick-film/>
- [28] *Mouser Electronics* [online]. [vid. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://eu.mouser.com/>
- [29] *Farnell, An Avnet Company* [online]. [vid. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://cz.farnell.com/>

Přílohy

Příloha A – Obrázky z měření



Obr. 14: Měřicí přípravek



Obr. 15: Testované vzorky umístěné v měřícím přípravku

Příloha B – Pasty

Tab. 13: Přehled odporových past (data převzata z [9, 23–26])

Pasta	Rp [Ω/čtve- rec]	TCR [ppm/° C]	Šum [dB]	Teplota sušení [°C]	Tepl. výpa- lu [°C]	Velikost tisknutých částic [μm]	Tloušťka vysušené pasty [μm]	Sklado- vatelnost [měsíce]
Heraeus								
Série R100 R		β [°C]						
R115 R	50 ±10 %	-250 ±50	-	150	850	12,7	20 - 23	6
R121 R	100 ±10 %	-340 ±50	-	150	850	12,7	20 - 23	6
R131 R	1 k ±10 %	-1600 ±50	-	150	850	12,7	20 - 23	6
R135 R	5 k ±10 %	-1600 ±50	-	150	850	12,7	20 - 23	6
R136 R	5 k - 7,5 k	-2100 ±50	-	150	850	12,7	20 - 23	6
R141 R	10 k ±10 %	-1600 ±50	-	150	850	12,7	20 - 23	6
R145 R	50 k ±10 %	-2800 ±50	-	150	850	12,7	20 - 23	6
R151 R	100 k ±10 %	-3000 ±50	-	150	850	12,7	20 - 23	6
Série R400 AR								
R405 AR	0,05 ±15 %	< 425	-	150	850	12,7	12 - 19	6
R410 AR	0,1 ±10 %	100	-	150	850	12,7	17 - 21	6
R415 AR	0,15 ±10 %	75	-	150	850	12,7	14 - 17	6
R425 AR	0,25 ±10 %	75	-	150	850	12,7	14 - 17	6
R450 AR	0,5 ±10 %	75	-	150	850	12,7	14 - 17	6
R475 AR	0,75 ±10 %	75	-	150	850	12,7	15 - 18	6
R490 AR	1 ±10 %	75	-	150	850	12,7	15 - 18	6
R400 AR-05	5 ±10 %	75	-	150	850	12,7	14 - 17	6
R400 AR-10	10 ±10 %	75	-	150	850	12,7	14 - 17	6

Pasta	Rp [Ω/čtve- rec]	TCR [ppm/° C]	Šum [dB]	Teplota sušení [°C]	Tepl. výpa- lu [°C]	Velikost tisknutých částic [μm]	Tloušťka vysušené pasty [μm]	Sklado- vatelnost [měsíce]
Série R 2200								
R 2211	10 ±10 %	±100	-	150	850	30	22 - 28	6
R 2221	100 ±10 %	±100	-	150	850	30	14 - 20	6
R 2231	1 k ±10 %	±100	-	150	850	30	14 - 20	6
R 2241L	10k ±10 %	±100	-	150	850	30	14 - 20	6
R 2241H	10k ±10 %	±100	-	150	850	30	14 - 20	6
R 2251	100 k ±10 %	±100	-	150	850	30	14 - 20	6
R 2261	1 M ±10 %	±100	-	150	850	30	14 - 20	6
Série R 8900			-					
R 8901	1 ±20%	0 ±250	-	150	850	30 - 40	19 - 29	12
R 8911	10 ±10 %	0 ±100	-	150	850	30 - 40	19 - 29	12
R 8921	100 ±10 %	0 ±100	-32	150	850	30 - 40	19 - 29	12
R 8931	1 k ±10 %	0 ±100	-21	150	850	30 - 40	19 - 29	12
R 8935 L	5 k ±10 %	0 ±100	-10	150	850	30 - 40	19 - 29	12
R 8935 HN	5 k ±10 %	0 ±100	-13	150	850	30 - 40	19 - 29	12
R 8941 N	10 k ±10 %	0 ±100	-10	150	850	30 - 40	19 - 29	12
R 8951 N	100 k ±10 %	0 ±100	-3	150	850	30 - 40	19 - 29	12
R 8961 N	1 M ±10 %	0 ±150	-	150	850	30 - 40	19 - 29	12

Pasta	Rp [Ω/čtve- rec]	TCR [ppm/° C]	Šum [dB]	Teplota sušení [°C]	Tepl. výpa- lu [°C]	Velikost tisknutých částic [μm]	Tloušťka vysušené pasty [μm]	Sklado- vatelnost [měsíce]
Série 9000								
9000. 1	0,1 ±20 %	250	-	-	850	12	20 - 22	6
9001	1 ±20 %	150	< -27	-	850	12	20 - 22	6
9011	10 ±10 %	50	< -29	-	850	12	20 - 22	6
9014	40 ±10 %	50	< -22	-	850	12	20 - 22	6
9114	40 ±10 %	50	< -31	-	850	12	20 - 22	6
9121	100 ±10 %	50	< -29	-	850	12	20 - 22	6
9131	1 k ±10 %	50	< -18	-	850	12	20 - 22	6
9135	5 k ±10 %	50	-13	-	850	12	20 - 22	6
9141	10 k ±10 %	50	< -13	-	850	12	20 - 22	6
9151	100 k ±10 %	50	< -6	-	850	12	20 - 22	6
9161	1 M ±10 %	50	< -1	-	850	12	20 - 22	6
9171	10 M ±10 %	100	-	-	850	12	20 - 22	6
9181	100 M ±20 %	100	-	-	850	12	20 - 22	6
9191	1 G ±20 %	-	-	-	850	12	20 - 22	6
9194	4 G ±20 %	-	-	-	850	12	20 - 22	6
91910	10 G ±20 %	-	-	-	850	12	20 - 22	6
91920	20 G ±20 %	-	-	-	850	12	20 - 22	6
Série HTR1 2000A R								
HTR1 2045A R	2 ±10 %	±700	-	150	550	12,7	21 - 25	6
HTR1 2019R	10 ±10 %	±700	-	150	550	12,7	21 - 25	6
HTR1 2020A R	20 ±10 %	±700	-	150	550	12,7	20 - 24	6

Pasta	Rp [Ω/čtve- rec]	TCR [ppm/° C]	Šum [dB]	Teplota sušení [°C]	Tepl. výpa- lu [°C]	Velikost tisknutých částic [μm]	Tloušťka vysušené pasty [μm]	Sklado- vatelnost [měsíce]
HTR1 2035A R	40 ±10 %	±700	-	150	550	12,7	10 - 12	6
HTR1 2038A R	100 ±10 %	±700	-	150	550	12,7	10 - 12	6
Série PCR1 2000								
PCR1 2045	2 ±10 %	300 ±300	-	150	590	12,7	16 - 20	6
PCR1 2019	10 ±10 %	300 ±300	-	150	590	12,7	16 - 20	6
PCR1 2020	20 ±10 %	300 ± 300	-	150	590	12,7	16 - 20	6
PCR1 2035	40 ±10 %	300 ±300	-	150	590	12,7	16 - 20	6
PCR1 2038	100 ±10 %	300 ±300	-	150	590	12,7	16 - 20	6
DuPont								
Série 00X0 A								
00L2 C	0,05 - 0,09	±100	-	150	850	10 - 15	18 - 22	6
00L1	0,14 - 0,20	±100	< -35	150	850	10 - 15	18 - 22	6
0001	0,85 - 1,15	±100	< -35	150	850	10 - 15	18 - 22	6
0004A	2,8 - 4,0	±100	< -35	150	850	10 - 15	18 - 22	6
0010A	8,5 - 11,5	±60	< -35	150	850	10 - 15	18 - 22	6
0020A	85 - 115	-60 až 50	< -29	150	850	10 - 15	18 - 22	6
0030	0,8 k - 1,2 k	-60 až 25	< -17	150	850	10 - 15	18 - 22	6
0040A	8,5 k - 11,5 k	-60 až 50	< -11	150	850	10 - 15	18 - 22	6
0050A	85 k - 115 k	-60 až 50	< -6	150	850	10 - 15	18 - 22	6
0060A	0,85 M - 1,15 M	-60 až 40	< -6	150	850	10 - 15	18 - 22	6
0071	8 M - 12 M	-70 až 50	< 10	150	850	10 - 15	13 - 15	6

Pasta	Rp [Ω/čtve- rec]	TCR [ppm/° C]	Šum [dB]	Teplota sušení [°C]	Tepl. výpa- lu [°C]	Velikost tisknutých částic [μm]	Tloušťka vysušené pasty [μm]	Sklado- vatelnost [měsíce]
Série 110X								
1105	80 k - 100 k	0 ±100	-	150	850	-	18 - 22	6
1106	1 M ±10 %	0 ±100	-	150	850	-	18 - 22	6
1107	10 M ±10 %	0 ±100	-	150	850	-	18 - 22	6
1108	100 M ±10 %	0 ±150	-	150	850	-	18 - 22	6
1109	1,0 - 1,4 G	-	-	150	850	-	18 - 22	6
Série 1700								
1711	10 ±10 %	0 ±100	< -30	150	850	18	22 - 28	6
1713	30 ±10 %	0 ±50	< -30	150	850	18	22 - 28	6
1721	100 ±10 %	0 ±50	-19	150	850	18	22 - 28	6
1729	1 k ±10 %	0 ±100	-	150	850	18	22 - 28	6
1731	1 k ±10 %	0 ±50	-15	150	850	18	22 - 28	6
1739	10 k ±10 %	0 ±100	-6	150	850	18	22 - 28	6
1749	100 k ±10 %	0 ±100	2	150	850	18	22 - 28	6
1759	100 k ±10%	0 ±100	-	150	850	18	22 - 28	6
Série 2000								
2004R	4 ±10 %	-100 až 50	-24	150 - 170	850	10 - 15	20	6
2009	10 ±10 %	≤ 100	-32	150 - 170	850	10 - 15	20	6
2004	-	-100 až 50	-25	150 - 170	850	10 - 15	20	6
2019	100 ±10 %	≤ 75	-32	150 - 170	850	10 - 15	20	6
2011	10 ±10 %	≤ 100	-35	150 - 170	850	10 - 15	20	6
2015	50 ±10 %	≤ 75	-35	150 - 170	850	10 - 15	20	6
2021	100 ±10 %	≤ 75	-31	150 - 170	850	10 - 15	20	6

Pasta	Rp [Ω/čtve-rec]	TCR [ppm/°C]	Šum [dB]	Teplota sušení [°C]	Tepl. výpalu [°C]	Velikost tisknutých částic [μm]	Tloušťka vysušené pasty [μm]	Skladovatelnost [měsíce]
2031	1 k ±10 %	≤ 75	-20	150 - 170	850	10 - 15	20	6
2041	10 k ±10 %	≤ 75	-17	150 - 170	850	10 - 15	20	6
2051	100 k ±10 %	≤ 75	-9	150 - 170	850	10 - 15	20	6
2061	1 M ±10 %	≤ 75	9	150 - 170	850	10 - 15	20	6
2071	10 M ±20 %	≤ 125	-	150 - 170	850	10 - 15	20	6
Série 4300								
4308	0,3 - 1,2	0 ±200	-	150	850	10 - 16	23 - 27	6
4311	3,0 - 12,0	0 ±200	-	150	850	10 - 16	23 - 27	6
4321	30 - 120	0 ±200	-	150	850	10 - 16	23 - 27	6
4331	300 - 1,2 k	0 ±200	-	150	850	10 - 16	23 - 27	6
4341	3 k - 12 k	0 ±200	-	150	850	10 - 16	23 - 27	6
4351	30 k - 120 k	0 ±200	-	150	850	10 - 16	23 - 27	6
4361	300 k - 1,2 M	0 ±200	-	150	850	10 - 16	23 - 27	6
Série S1X0								
S110	10 ±10 %	±100	-25	150	850	10 - 15	18 - 22	6
S115	50 ±10 %	±100	-22	150	850	10 - 15	18 - 22	6
S120	100 ±10 %	±100	-18	150	850	10 - 15	18 - 22	6
S130	1 k ±10 %	±100	-14	150	850	10 - 15	18 - 22	6
S140	10 k ±10 %	±100	-4	150	850	10 - 15	18 - 22	6
S150	100 k ±10 %	±100	-1	150	850	10 - 15	18 - 22	6
S160	1 M ±10 %	±100	15	150	850	10 - 15	18 - 22	6
Série QS87								
QS869	1,5 ±20 %	0 ±200	-	150	850	12 - 18	23 - 27	6
QS870	3 ±10 %	0 ±100	-23	150	850	12 - 18	23 - 27	6

Pasta	Rp [Ω/čtve- rec]	TCR [ppm/° C]	Šum [dB]	Teplota sušení [°C]	Tepl. výpa- lu [°C]	Velikost tisknutých částic [μm]	Tloušťka vysušené pasty [μm]	Sklado- vatelnost [měsíce]
QS87 1	10 ±10 %	0 ±100	-22	150	850	12 - 18	23 - 27	6
QS87 2	100 ±10 %	0 ±100	-19	150	850	12 - 18	23 - 27	6
QS87 3	1 k ±10 %	0 ±100	-15	150	850	12 - 18	23 - 27	6
QS87 4	10 k ±10 %	0 ±100	-5	150	850	12 - 18	23 - 27	6
QS87 5	100 k ±10 %	0 ±100	-8	150	850	12 - 18	23 - 27	6
QS87 6	1 M ±20 %	0 ±150	-	150	850	12 - 18	23 - 27	6
ESL ElectroScience								
Série 3414								
3414- B- LBM	1,0 - 1,5	±150	0	125	850	12,5	-	6
3414- B- HBM	2,5 - 3,0	±150	3	125	850	12,5	-	6
3414- A	7,2 - 8,8	±100	1	125	850	12,5	-	6
3414- B	3,6 - 4,4	±100	6	125	850	12,5	-	6
Série R- 300P								
R- 310-P	1,5 ±20 %	±150	< 1,0%	125	850	9 - 15	20 - 25	-
R- 311-P	10 ±10 %	±100	< 0,5 %	125	850	9 - 15	20 - 25	-
R- 312-P	100 ±10 %	±50	< 0,3 %	125	850	9 - 15	20 - 25	-
R- 313-P	1 k ±10 %	±50	< 0,3 %	125	850	9 - 15	20 - 25	-
R- 314-P	10 k ±10 %	±50	< 0,3 %	125	850	9 - 15	20 - 25	-
R- 315-P	100 k ±10 %	±50	< 0,3 %	125	850	9 - 15	20 - 25	-
R- 316-P	1 M ±10 %	±50	< 0,3 %	125	850	9 - 15	20 - 25	-
Série 29000								
29106	0,1 ±10 %	600 ±50	-	125	850	5	20 - 22	6

Pasta	Rp [Ω/čtve- rec]	TCR [ppm/° C]	Šum [dB]	Teplota sušení [°C]	Tepl. výpa- lu [°C]	Velikost tisknutých částic [μm]	Tloušťka vysušené pasty [μm]	Sklado- vatelnost [měsíce]
29206	0,2 ±10 %	600 ±50	-	125	850	5	20 - 22	6
29109	0,1 ±10 %	900 ±50	-	125	850	5	20 - 22	6
29115	0,1 ±10 %	1500 ±50	-	125	850	5	20 - 22	6
29215	0,2 ±10 %	1500 ±50	-	125	850	5	20 - 22	6
29130	0,1 ±10 %	3320 ±50	-	125	850	5	20 - 22	6
29230	0,2 ±10 %	3320 ±50	-	125	850	5	20 - 22	6
29515	0,5 ±10 %	1500 ±50	-	125	850	5	20 - 22	6
29100 3	1,0 ±10 %	350 ±50	-	125	850	5	20 - 22	6
Série 3100								
3100- 0,65	0,65 ±5 %	-	-	125	625	20	22 - 28	-
3110	1 ±30 %	±250	-	125	625	20	22 - 28	-
3111	10 ±30%	±250	-	125	625	20	22 - 28	-
3112	100 ±25 %	±200	-	125	625	20	22 - 28	-
3113	1 k ±25 %	±200	-	125	625	20	22 - 28	-
3114	10 k ±25 %	-50 ±200	-	125	625	20	22 - 28	-
3115	100 k ±25 %	-50 ±200	-	125	625	20	22 - 28	-
3116	1 M ±30 %	100 ±200	-	125	625	20	22 - 28	-
Série 33000								
33002	0,02 ±30 %	400 - 500	-	125	850	25	22 - 27	6
33005	0,05 ±20 %	200	-	125	850	25	22 - 27	6
33010	0,10 ±10 %	± 100	-	125	850	25	18 - 23	6
33020	0,20 ±10 %	± 100	-	125	850	25	18 - 23	6
33050	0,50 ±10 %	± 100	-	125	850	25	18 - 23	6
33100	1,00 ±10 %	± 100	-	125	850	25	18 - 23	6

Pasta	Rp [Ω/čtve- rec]	TCR [ppm/° C]	Šum [dB]	Teplota sušení [°C]	Tepl. výpa- lu [°C]	Velikost tisknutých částic [μm]	Tloušťka vysušené pasty [μm]	Sklado- vatelnost [měsíce]
33101	10,0 ±10 %	±100	-	125	850	25	18 - 23	6
Série 3900- J								
3910-J	1 ±30 %	0 ±100	-	125	850	12,5	20 - 25	6
3911-J	10 ±10 %	0 ±100	-	125	850	12,5	20 - 25	6
3912-J	100 ±10 %	0 ±50	-	125	850	12,5	20 - 25	6
Série R- 300- A/B								
R- 310-A	1 ±30 %	50 ±100	-	-	850	-	20 - 25	-
R- 311-A	10 ±10 %	0 ±100	-	-	850	-	20 - 25	-
R- 312-A	100 ±10 %	0 ±100	≤ -10	-	850	-	20 - 25	-
R- 313-A	1 k ±10 %	0 ±50	≤ -10	-	850	-	20 - 25	-
R- 314-A	10 k ±10 %	0 ±50	≤ -10	-	850	-	20 - 25	-
R- 314-B	10 k ±10%	0 ±100	≤ 2	-	850	-	18 - 22	-
R- 315-B	100 k ±10 %	0 ±100	≤ 5	-	850	-	18 - 22	-
R- 316-B	1 M ±10 %	0 ±100	-	-	850	-	18 - 22	-
Polym erní rezist orová pasta					Vytvr- zení [°C]			
15501	35 - 45	-	-	125	320	20 - 30	10 - 15	3 - 6
Série NTC- 2100		β [°C]						
NTC- 2131	3 - 300	300	-	125	850	10-25	20 - 25	6
NTC- 2112	10 - 1 k	725	-	125	850	10-25	20 - 25	6
NTC- 2113	100 - 10 k	1700	-	125	850	10-25	20 - 25	6
NTC- 2114	1 k - 100 k	2125	-	125	850	10-25	20 - 25	6

Pasta	Rp [Ω/čtve- rec]	TCR [ppm/° C]	Šum [dB]	Teplota sušení [°C]	Tepl. výpa- lu [°C]	Velikost tisknutých částic [μm]	Tloušťka vysušené pasty [μm]	Sklado- vatelnost [měsíce]
NTC-2115	10 k - 1 M	2500	-	125	850	10-25	20 - 25	6
NTC-2116	100 k - 10 M	3100	-	125	850	10-25	20 - 25	6
Série PTC- 2600		β [°C]						
PTC-2650	5 ±10 %	4000 ±500	-	125	850	18	20 - 25	6
PTC-2611	10 ±10 %	4100 ±500	-	125	850	18	20 - 25	6
Série PTC- 2600-I		β [°C]						
2650-I	5 ±30 %	3400 ±400	-	125	825 - 850	18	20 - 25	6
2611-I	10 ±20 %	3000 ±400	-	125	825 - 850	18	20 - 25	6
2612-I	100 ±20 %	2200 ±400	-	125	825 - 850	18	20 - 25	6
2613-I	1 k ±10 %	1600 ±400	-	125	825 - 850	18	20 - 25	6
LORD								
Série 8600					Vytvr- zení [°C]			
8601	0,9 - 1,1	< 1500	-	120 - 150	210	12,7 - 25,4	14 - 18	6
8611	9 - 11	< 650	-	120 - 150	210	12,7 - 25,4	14 - 18	6
8621	90 - 110	< 700	-	120 - 150	210	12,7 - 25,4	14 - 18	6
8631	900 - 1,1 k	< 800	-	120 - 150	210	12,7 - 25,4	14 - 18	6
8641	9 k - 11 k	< 800	-	120 - 150	210	12,7 - 25,4	14 - 18	6
8651	90 k - 110 k	< 1100	-	120 - 150	210	12,7 - 25,4	14 - 18	6
8661	900 k - 1,1 M	< 1300	-	120 - 150	210	12,7 - 25,4	14 - 18	6

Pasta	Rp [Ω/čtve- rec]	TCR [ppm/° C]	Šum [dB]	Teplota sušení [°C]	Tepl. výpa- lu [°C]	Velikost tisknutých částic [μm]	Tloušťka vysušené pasty [μm]	Sklado- vatelnost [měsíce]
TANAKA								
Série AN- 9000							Tloušťka vypálené pasty [μm]	
AN- 9030	0,03 ±30 %	400 - 700	-	-	850	-	7 - 13	-
AN- 9100	0,1 ±30 %	400 - 700	-	-	850	-	9 - 15	-
AN- 9300	0,3 ±30 %	400 - 700	-	-	850	-	9,5 - 15,5	-
AN- 9500	0,5 ±30 %	400 - 700	-	-	850	-	9,5 - 15,5	-
Série GZC								
GZC- 1K	1 k ±10 %	-	-	-	800	-	2,5 - 4,5	-
GZC- 5K	5 k ±10 %	-	-	-	800	-	2,5 - 4,5	-
GZC- 10K	10 k ±10 %	-	-	-	800	-	2,5 - 4,5	-
GZC- 20K	20 k ±10 %	-	-	-	800	-	2,5 - 4,5	-
Série EZ							Tloušťka vypálené pasty [μm]	
EZ-11	10 ±15 %	±100	-	-	850	-	8 - 12	-
EZ-12	100 ±15 %	±100	-	-	850	-	8 - 12	-
EZ-13	1 k ±15 %	±100	-	-	850	-	8 - 12	-
EZ-14	10 k ±15 %	±100	-	-	850	-	8 - 12	-
Série HC							Tloušťka vypálené pasty [μm]	
HC11 A	10 ±10 %	±100	-	-	850	10	6 - 10	-
HC21	100 ±10 %	±100	-	-	850	10	4 - 8	-
HC31	1 k ± 10 %	±100	-	-	850	10	4 - 8	-
HC41	10 k ± 10 %	±100	-	-	850	10	4 - 8	-
HC51	100 k ±10 %	±100	-	-	850	10	4 - 8	-
HC61	1 M ±10 %	±100	-	-	850	10	4 - 8	-

Pasta	Rp [Ω/čtve- rec]	TCR [ppm/° C]	Šum [dB]	Teplota sušení [°C]	Tepl. výpa- lu [°C]	Velikost tisknutých částic [μm]	Tloušťka vysušené pasty [μm]	Sklado- vatelnost [měsíce]
Série RAN								
RAN1 1	10 ±10 %	±100	-	-	850	10	9 - 15	-
RAN2 1	100 ±10 %	±100	-	-	850	10	9 - 15	-
RAN3 1	1 k ±10 %	±100	-	-	850	10	9 - 15	-
Série RJ							Tloušťka vypálené pasty [μm]	
RJ-05	5 ±10 %	±100	-	-	850	-	8 - 12	-
RJ-11	10 ±10 %	±100	-	-	850	-	8 - 12	-
RJ-21	100 ±10 %	±100	-	-	850	-	8 - 12	-
RJ-31	1 k ± 10 %	±100	-	-	850	-	8 - 12	-
Série TR- 9000							Tloušťka vypálené pasty [μm]	
TR- 9100	0,1 ±30 %	-50 - 90	-	-	850	-	9 - 13	-
TR- 9200	0,2 ±30 %	-50 - 90	-	-	850	-	9 - 13	-
TR- 9101	1 ±30 %	-50 - 90	-	-	850	-	9 - 13	-
TR- 9102	10 ±30 %	-50 - 90	-	-	850	-	9 - 13	-
TR- 9010A	0,01 ±60 %	400 - 800	-	-	850	-	6 - 10	-
TR- 9020	0,02 ±30 %	400 - 500	-	-	850	-	9 - 13	-
TR- 9040	0,04 ±30 %	350 - 450	-	-	850	-	9 - 13	-
TR- 9070	0,07 ±30 %	300 - 450	-	-	850	-	9 - 13	-
TR- 9075	0,075 ±30 %	0 - 200	-	-	850	-	8 - 12	-

Příloha C – Rezistory

Tab. 14: Přehled tištěných výkonových rezistorů (data převzata z [27–29])

Výrobek	Výkon [W]	Max. pracovní napětí [V]	Max. krátkodobé napěťové přetížení [V]	Rezistivita podle tolerance [Ω]			Provozní teplota [° C]
				5 %	1 %	0,5 %	
Ohmite							
AMC0201	0,05	25	50	1 - 10 MΩ	1 - 10 MΩ	10 - 1 MΩ	-55 až 155
AMC0402	0,0625	50	100	1 - 22 MΩ	1 - 10 MΩ	10 - 1 MΩ	-55 až 155
AMC0603	0,1	75	150	1 - 22 MΩ	1 - 10 MΩ	1 - 10 MΩ	-55 až 155
AMC0805	0,125	150	300	1 - 22 MΩ	1 - 10 MΩ	10 - 1 MΩ	-55 až 155
AMC1206	0,25	200	400	1 - 22 MΩ	1 - 10 MΩ	10 - 1 MΩ	-55 až 155
AMC1210	0,5	200	500	1 - 22 MΩ	1 - 10 MΩ	10 - 1 MΩ	-55 až 155
AMC2010	0,75	200	500	1 - 22 MΩ	1 - 10 MΩ	10 - 1 MΩ	-55 až 155
AMC2512	1	200	500	1 - 22 MΩ	1 - 10 MΩ	10 - 1 MΩ	-55 až 155
				10 %	5 %	1 %	
AP101	100	700	1050	10 - 10 k	3 - 10	0,05 - 1	-65 až 175
AP725	20	250	375	-	0,02 - 130 k	0,02 - 130 k	-55 až 155
AP830	30	350	525	0,05 - 10 k	0,05 - 10 k	1,02 - 10 k	-65 až 150
AP836	35	350	525	0,05 - 10 k	0,05 - 10 k	3,01 - 10 k	-65 až 150
AP851	50	420	630	0,1 - 10 k	0,1 - 10 k	1,02 - 10 k	-65 až 150
				1 - 10 %	0,25 - 10 %	0,1 - 5 %	
ARC2-2	3,8	9 k	13,5 k	400 - 10 G	400 - 1 G	60 k - 50 M	-55 až 225
ARC2-3	5	12 k	18 k	500 - 15 G	500 - 1,5 G	80 k - 750 M	-55 až 225
ARC2-5	7,5	18 k	27 k	900 - 20 G	900 - 2 G	120 k - 1 G	-55 až 225

Výrobek	Výkon [W]	Max. pracovní napětí [V]	Max. krátkodobé napěťové přetížení [V]	Rezistivita podle tolerance [Ω]			Provozní teplota [° C]
				1 - 10 %	0,25 - 10 %	0,1 - 5 %	
ARC2-7	10	24 k	36 k	1,2 k - 30 G	1,2 k - 3 G	180 k - 1,5 G	-55 až 225
ARC2-10	12,5	36 k	54 k	1,7 k - 30 G	1,7 k - 3 G	240 k - 2 G	-55 až 225
ARC2-12	15	42 k	53 k	2,6 k - 30 G	2,6 k - 3 G	300 k - 2 G	-55 až 225
ARC2-15	17	54 k	81 k	3,2 k - 20 G	3,2 k - 3 G	350 k - 2 G	-55 až 225
				2 - 10 %	0,5 - 10 %	0,1 - 10 %	
ARC3-11	11	24 k	36 k	500 - 5 G	500 - 1 G	50 k - 500 M	-55 až 225
ARC3-23	23	48 k	72 k	700 - 10 G	700 - 1 G	100 k - 1 G	-55 až 225
ARC3-54	54	48 k	72 k	2 - 10 G	2 - 1 G	100 k - 1 G	-55 až 225
ARC3-71	71	64 k	96 k	20 - 15 G	20 - 1 G	100 k - 1,5 G	-55 až 225
ARC3-105	105	96 k	144 k	80 - 25 G	80 - 2 G	150 k - 2 G	-55 až 225
				10 %	5 %	1 %	
FPA600	600	5 k	7 k	0,5 - 1 M	0,5 - 1 M	0,5 - 1 M	-55 až 150
TFBR100	100	1 k	-	5 - 680	-	-	-50 až 200
TFBR300	300	1 k	-	5 - 680	-	-	-50 až 200
TFBR900	900	1 k	-	5 - 680	-	-	-50 až 200
				20%	10 %	5 %	
AS08	0,33	150	300	1 - 10 M	1 - 10 M	1 - 10 M	-55 až 155
AS12	0,5	200	400	1 - 10 M	1 - 10 M	1 - 10 M	-55 až 155
AS25	1,5	500	500	1 - 20 M	1 - 20 M	1 - 20 M	-55 až 155
				10 - 30 %	5 - 20 %	5 - 10 %	
HVC0402	0,05	30	-	1 - 10 G	100 M - 1 G	100 k - 100 M	-55 až 155
				5 - 20 %	5 - 20 %	1 - 10 %	
HVC0603	0,1	75	-	1 G - 10 G	100 M - 1 G	100 k - 100 M	-55 až 155
				10 - 30 %	2 - 20 %	0,5 - 10 %	
HVC0805	0,125	200	-	10 G - 100 G	100 M - 1 G	100 k - 100 M	-55 až 155
HVC1206	0,25	600	-	10 G - 100 G	100 M - 1 G	100 k - 100 M	-55 až 155

Výrobek	Výkon [W]	Max. pracovní napětí [V]	Max. krátkodobé napěťové přetížení [V]	Rezistivita podle tolerance [Ω]			Provozní teplota [° C]
				5 - 30 %	2 - 20 %	0,5 - 10 %	
HVC2512	1	2 k	-	10 G - 100 G	1 G - 10 G	100 k - 100 M	-55 až 155
				5- 30 %	0,5 - 20 %	0,25 - 10 %	
HVC4020	1,5	4 k	-	100 G - 1 T	100 M - 1 G	100 k - 100 M	-55 až 155
				20 %	10 %	-	
IS175	175	300	-	5 - 10 k	5 - 10 k	-	-
IS200	200	300	-	5 - 10 k	5 - 10 k	-	-
IS250	250	300	-	5 - 10 k	5 - 10 k	-	-
IS270	270	300	-	5 - 10 k	5 - 10 k	-	-
				1 - 20 %	0,5 %	0,1 %	
MOX200	0,25	500	-	1500 M	10 M	10 M	-55 až 155
MOX300	0,5	1000	-	2500 M	10 M	10 M	-55 až 155
				5 %	-	-	
MC101	0,75	2 k	-	100 - 1 G	-	-	-55 až 180
MC102	1,5	5 k	-	200 - 5 G	-	-	-55 až 180
MC103	2	7,5 k	-	250 - 5 G	-	-	-55 až 180
MC104	2,5	10 k	-	1 k - 5 G	-	-	-55 až 180
MC202	2,5	5 k	-	500 - 5 G	-	-	-55 až 180
MC204	3,25	10 k	-	1 k - 5 G	-	-	-55 až 180
				1 - 20 %	0,1 - 20 %	-	
MOX-1-12	2,5	10 k	-	250 - 300 G	-	-	-55 až 210
MOX-2-12	5	20 k	-	500 - 700 G	-	-	-55 až 210
MOX-3-12	7,5	30 k	-	750 - 1 T	-	-	-55 až 210
MOX-4-12	10	40 k	-	1 k - 1 T	-	-	-55 až 210
MOX-5-12	12,5	50 k	-	1,25 k - 1 T	-	-	-55 až 210
MOX-1-13	2	10 k	-	-	250 - 300 G	-	-55 až 210
MOX-2-13	3	20 k	-	-	500 - 700 G	-	-55 až 210
MOX-3-13	4	30 k	-	-	750 - 1 T	-	-55 až 210
MOX-4-13	5	40 k	-	-	1 k - 1 T	-	-55 až 210
MOX-5-13	6	50 k	-	-	1,25 k - 1 T	-	-55 až 210

Výrobek	Výkon [W]	Max. pracovní napětí [V]	Max. krátkodobé napět'ové přetížení [V]	Rezistivita podle tolerance [Ω]			Provozní teplota [$^{\circ}$ C]
				0,5 - 5 %	-	-	
MC1RD	1,5	5 k	-	1 M - 5 G	-	-	-
				0,5 - 20 %	0,5 - 5 %	-	
RX-1M	0,5	1 k	-	1 M - 10 T	-	-	-
Série Slim-Mox	0,25 - 5,5	1,5 k - 25 k	-	100 - 5 G	-	-	-55 až 110
Série Slim-Mox Divider	0,75 - 5	5 k - 25 k	-	-	1 M - 5 G	-	-
Série Slim-Mox HT	0,4 - 9	1,5 k - 25 k	-	100 - 5 G	-	-	-55 až 180
				5%	1%	0,1%	
Série SMC	0,02 - 1	10 - 200	25 - 500	1 - 100 M	1 - 10 M	10 - 1 M Ω	-55 až 155
				0,1 - 1 %	-	-	
Série Super Mox	3,9 - 19,4	9,4 k - 60 k	-	400 - 50 G	-	-	-55 až 225
				1 %	5 %	10 %	
Série TA	3-100	1,5 k	-	0,25 - 10 M	0,25 - 10 M	0,25 - 10 M	-55 až 180
				5 %	1 %	-	
Série TAH20	20	350	525	0,05 - 1 M	0,1 - 1 M	-	-
				10 %	5 %	1%	
Série TA1K & TA2K	1 k, 2 k	2000	-	0,5 - 1 k	-	-	-55 až 85
Série TAP650	650	5 k	-	0,25 - 1 M	0,25 - 1 M	-	-55 až 150
Série TAP600	600	12 k	-	0,25 - 100 k	0,25 - 100 k	-	-55 až 150
Série TAP800	800	5 k	-	1 - 10 k	1 - 10 k	-	-55 až 150
Série TBH25	25	350	525	-	0,1 - 10 k	-	-55 až 150
Série TCH35	35	350	525	-	0,05 - 10 k	0,05 - 10 k	-55 až 175
Série TDH35	35	350	525	0,05 - 10 k	0,05 - 10 k	0,05 - 10 k	-55 až 150
Série TKH45	45	500	-	-	-	0,02 - 510 k	-55 až 175
Série TEH 100 Watt	100	350	525	0,05 - 1 M	0,05 - 1 M	0,05 - 1 M	-
Série TEH 140	140	500	-	-	0,01 - 510 k	0,1 - 510 k	-55 až 175

Výrobek	Výkon [W]	Max. pracovní napětí [V]	Max. krátkodobé napěťové přetížení [V]	Rezistivita podle tolerance [Ω]			Provozní teplota [° C]
				10 %	5 %	1%	
Série TFS	0,5 - 2	3 - 11 k	-	100 - 100 k	100 - 100 k	100 - 100 k	-55 až 200
Série TGH	120, 200	500	-	-	0,1 - 1 M	-	-55 až 155
Série TGHM	300	1000	-	-	0,1 - 1 M	-	-55 až 175
Série TGH600	600	1000	-	0,25 - 1 k	0,25 - 1 k	-	-55 až 155
Série TL	18 - 137	1200	-	0,3 - 4 M	0,3 - 4 M	0,3 - 4 M	-40 až 125
Série TNP10	10	-	-	-	0,09 - 9,1	0,1 - 51 k	-55 až 155
Série TP High Energy	10	500	-	10 - 1 M	10 - 1 M	10 - 1 M	-
Série WFH	90 - 330	1200	-	0,22 - 39k	0,22 - 39k	-	> -45
ROHM							
				5 %	1 %	0,5 %	
LTR10	0,25	150	300	1 - 1 M	1 - 1 M	10 - 1 M	-55 až 155
LTR18	0,75	200	400	1 - 1 M	1 - 1 M	10 - 1 M	-55 až 155
LTR50	1	200	400	1 - 1 M	1 - 1 M	10 - 130 k	-55 až 155
LTR100	2	200	400	1 - 1 M	1 - 1 M	10 - 1 M	-55 až 155
ARCOL							
AP851	50	420	630	0,1 - 10 k	1,02 - 10 k	10,2 - 10 k	-
Multicomp							
MCSTR35	35	500	750	0,5 - 100 k	1 - 100 k	10 - 100 k	-55 až 175
MCTR35	35	350	525	0,5 - 100 k	1 - 100 k	10 - 100 k	-65 až 150
MCTR50	50	350	525	0,1 - 10 k	1 - 10 k	10 - 10 k	-65 až 150
MCTR50-H	50	420	630	0,1 - 10 k	1 - 10 k	10 - 10 k	-

Výrobek	Výkon [W]	Max. pracovní napětí [V]	Max. krátkodobé napěťové přetížení [V]	Rezistivita podle tolerance [Ω]			Provozní teplota [° C]
				10 %	5 %	1 %	
MCTR100	100	700	1050	0,05 - 100 k	0,05 - 100 k	1 - 100 k	-65 až 175
TE Connectivity							
				5 %	1 %		
3520510RJT	1	200	-	510	-		-55 až 125
35205R1JT	1	200	-	5,1	-		
352075KJT	1	200	-	75 k	-		
Série 3522	3	250	500	10 - 10 M	10 - 1 M		-55 až 155
Bourns							
				5%	1%		
CHP0603	0,33	75	125	1 - 1 M	1 - 1 M		-55 až 155
CHP0805	0,5	200	300	1 - 1 M	1 - 1 M		-55 až 155
CHP1206	0,75	250	500	1 - 1 M	1 - 1 M		-55 až 155
CHP2512	3	250	500	0,1 - 1 M	0,1 - 1 M		-55 až 155
TT Electronic							
				5 %	2 %	1 %	
Série WSHMP	20 - 35	500	750	0,5 - 100k	-	1 - 100 k	-55 až 175
Série SC3	3	200	-	1 - 10 k	1 - 10 k	1 - 10 k	-55 až 175
Vishay							
				5 %	1 %	0,5 %	
Série CRCW-HP e3	0,2 - 1,5	50 - 500	-	1 - 1 M	1 - 1 M	1 - 1 M	-55 až 155
Série CRCW-HR e3	0,1 - 0,25	75 - 200	-	11 M - 470 M	-	-	-55 až 155
Série RCS e03	0,2 - 0,5	50 - 200	-	1 - 10 M	1 - 10 M	1 - 10 M	-55 až 155
				5 %	2 %	1 %	
D2TO20	20	500	-	0,01 - 550 k	0,01 - 550 k	0,01 - 550 k	-55 až 155
D2TO35	35	500	-	0,01 - 550 k	0,01 - 550 k	0,01 - 550 k	-55 až 175
DTO25	25	500	-	0,016 - 700 k	0,047 - 700 k	0,11 - 700 k	-55 až 150
Série RCL	0,25 - 2	50 - 200	-	1 - 1 M	-	1 - 1 M	-55 až 155
Série RCP	1,4 - 3,5	-	-	10 - 2 k	10 - 2 k	10 - 2 k	-65 až 155
RTO 50	50	500	-	0,01 - 550 k	0,01 - 550 k	0,01 - 550 k	-55 až 155