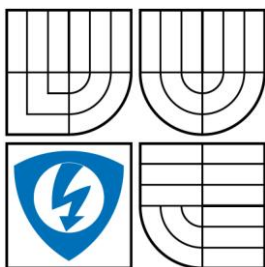


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ TLUSTOVRSTVÝCH RC PRVKŮ S ROZLOŽENÝMI PARAMETRY

MEASUREMENTS OF THICK-FILM RC ELEMENTS CHARACTERISTICS WITH
DISTRIBUTED PARAMETERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

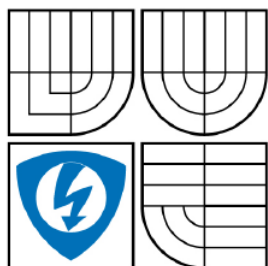
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

KSENIA OSTANINA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Studentko: Ostanina Ksenia
Ročník: 3

ID: 112285
Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Měření vlastností tlustovrstvých RC prvků s rozloženými parametry

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou tlustovrstvých RC prvků. Nastudujte teorii o jejich měření a aplikujte získané poznatky na proměření realizovaných vzorků. Výsledky experimentu vyhodnoťte a doporučte další postup prací.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 5.10.2007

Termín odevzdání: 30.5.2008

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Ksenia Ostanina
Bytem: Ruská Federace, Udmurtská Republika,
Iževsk, 9. Janvarja, 187-129, 426060
Narozen/a (datum a místo): 27.3.1987, Ustinov

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
Prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

Článek 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Měření vlastností tlustovrstvých RC prvků s rozloženými parametry

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Ústav: Ústav mikroelektroniky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☒ tištěné formě – počet exemplářů 2
- ☒ elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt:

Předkládaná práce se zabývá analýzou vlastností tlustovrstvých RC prvků s rozloženými parametry. Teoretická část řeší návrh RC prvků, na něž navazuje jejich realizace. Součástí práce je měření odporů a zjištění závislosti rozptylu daných odporů s různým počtem vrstev struktur v závislosti na jejich vypalovacích režimech.

Tato bakalářská práce souvisí s bakalářskou prací „Vlastnosti 3D prvků realizovaných tlustovrstvou technologií“.

Abstract:

The following work is focused on properties analysis of thick film RC elements with distributed parameters. The theoretical part offers projecting of RC elements, with their next realization. There are the following work parts: the resistance measurement and determination of the given resistances dependence scattering with different film number of the structures depending on their burning conditions.

This bachelor's thesis is closed to the bachelor's work "Properties of Thick Film Multilayer Component".

Klíčová slova:

RC struktura, RC prvky, rozložené parametry, tlustovrstvé prvky, vodivá vrstva, dielektrická vrstva, odporová vrstva.

Keywords:

RC structure, RC elements, distributed parameters, thicklayer elements, conductive level, dielectric level, resistance level.

Bibliografická citace díla:

OSTANINA, K. *Měření vlastností tlustovrstvých RC prvků s rozloženými parametry*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 46 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na bakalářskou práci.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	8
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	9
2 TEORETICKÝ ROZBOR DOTČENÉ PROBLEMATIKY	10
2.1 RC STRUKTURA	10
2.2 TECHNOLOGIE VÝROBY TLUSTOVRSTVÝCH RC-PRP	11
2.3 NÁVRHOVÉ PRAVIDLA PRO REALIZACI RC-PRP	13
2.3.1 <i>Počet vrstev</i>	14
2.3.2 <i>Geometrie vrstev</i>	16
2.3.3 <i>Překrývání vrstev</i>	19
2.3.4 <i>Elektrické kontakty</i>	20
2.3.5 <i>Výřezy a řezy ve vrstvách</i>	21
3 PRAKTICKÁ ČÁST	24
3.1 NÁVRH TOPOLOGIE OBVODU	24
3.1.1 <i>Rozložení prvků na substrátu</i>	24
3.1.2 <i>Realizovaná topologie obvodu</i>	27
3.2 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH HODNOT	31
3.2.1 <i>Podmínky provedení experimentů</i>	32
3.2.2 <i>Analýza naměřených hodnot pomocí grafů</i>	35
3.2.3 <i>Faktorová analýza hodnot</i>	39
4 ZÁVĚR	45
5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	46

Seznam použitých zkratek a symbolů

HIO		Hybridní integrovaný obvod
IČ		Infračervené
RC		Odporově-kapacitní
RC-PRP		RC prvek s rozloženými parametry
REZ		Radioelektronické zařízení
TKR	[K ⁻¹]	Teplotní součinitel odporu
UHF		Vysokofrekvenční
a	[m]	Šířka vrstvy kontaktních ploch a vrstvy rezistorů
b	[m]	Šířka plochy odporové a vodivé vrstvy
b _j		Hodnoty koeficientů regrese
C		Dielektrická vrstva
C _i		i-tá kapacitní vrstva
d	[m]	Tloušťka dielektrické vrstvy
F		Kritérium pro kontrolu hypotézy adekvátnosti modelu
G		Vysokoohmová odporová vrstva
MC		Kapacitní vrstva odlišující se od vrstvy C M – krát
NC		Kapacitní vrstva odlišující se od vrstvy C N – krát
NR		Odporová vrstva odlišující se od vrstvy R N - krát
R		Odporová vrstva
R _i		i-tá odporová vrstva
s ² (b)		Rozptyl koeficientů regrese
s ² _{ad}		Rozptyl adekvátnosti
s ² ($\bar{y}$)		Rozptyl reprodukovatelnosti
t	[m]	Tloušťka odporové vrstvy
X _i		i-tý faktor experimentu
0		Vodivá vrstva
<y>		Průměr z naměřených hodnot
$\hat{y}$		Výpočet z rovnice regrese
ε	[–]	Relativní permitivita
Δ	[m]	Šířka mezery

1 Úvod do problematiky

V současné době mohou být RC-PRP využité pro zlepšení vlastností širokého spektra analogových zařízení pro zpracování signálů v rozsahu frekvencí od jednotek Hz až po stovky MHz. Slouží jako základ pro vytvoření rozložených měřicích prostředí, používají se pro simulaci fyzických procesů, které jsou popisované diferenciálními a integrálními rovnicemi nízkých řádů.

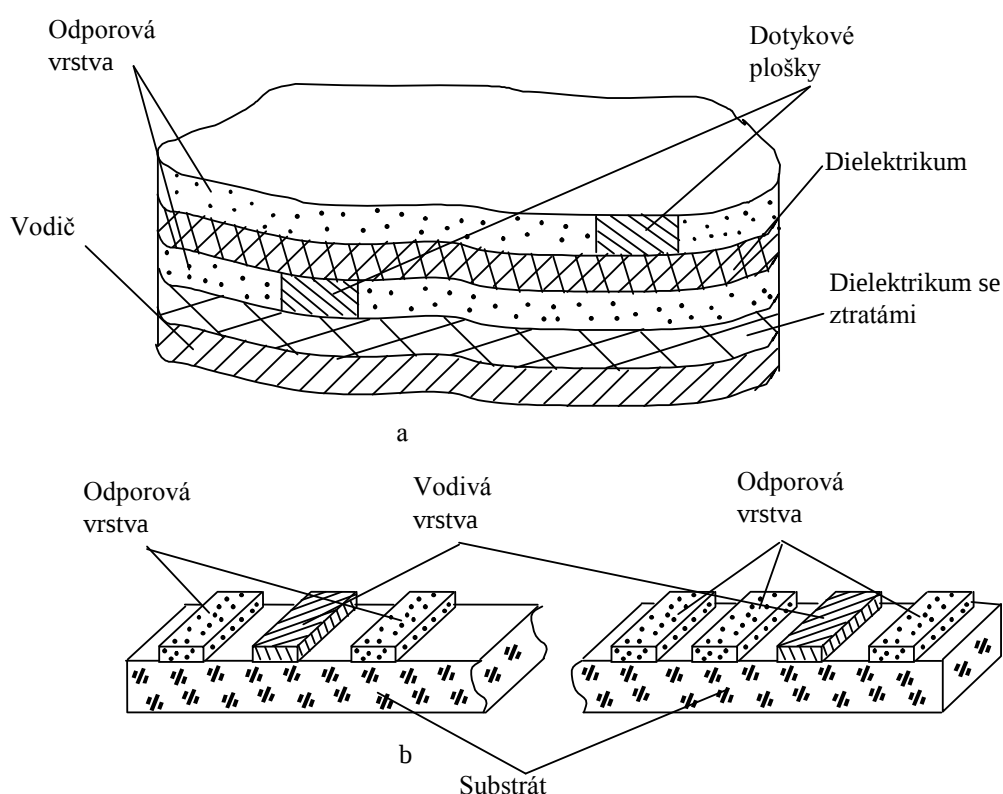
RC-PRP lze vyrobit tradičními tlustovrstvými a tenkovrstvými technologiemi, a to jak ve formě integrovaných obvodů, tak ve formě jednotlivých prvků. V rozmezí frekvencí od jednotek Hz do jednotek MHz lze požadované časové konstanty zajistit pomocí běžné tenkovrstvé technologie a v tlustovrstvé technologii zajistit pomocí běžně používaných odporových a dielektrických past a vrstev a superionizovaných vodičů. V oblastech vyšších frekvencí, když jsou rozměry vícevrstevných RC-PRP potřeba natolik malé, že vznikají problémy se zajištěním potřebné přesnosti výroby, je účelné vytvořit RC-PRP ve formě planární konstrukce.

2 Teoretický rozbor dotčené problematiky

2.1 RC struktura

Pod odporově-kapacitní strukturou s rozloženými parametry (RC struktura) budeme chápat systém střídajících se vodivých, odporových a dielektrických vrstev, ve kterých rozložení proudů a napětí záleží nejen na času, ale i na prostorových souřadnicích. Proto se rozložení potenciálu v odporových vrstvách popisuje diferenciálními rovnicemi v parciálních derivacích.

V obecném případě konstrukce takové struktury mohou vypadat tak, jak je zobrazeno na obr. 1.



Obr. 1: RC-struktury: a – vícevrstvá, b – planární

Na rozdíl od vícevrstvé struktury zobrazené na obr. 1a se ve struktuře zobrazené na obr. 1b střídají mezi sebou plošky různých materiálů, které se nacházejí v jedné rovině. V prostorech mezi těmito odporovými a vodivými cestami vznikají kapacity, které jsou závislé zejména na šířkách těchto prostorů, na dielektrické konstantě substrátu a na šířkách odporových a vodivých cest.

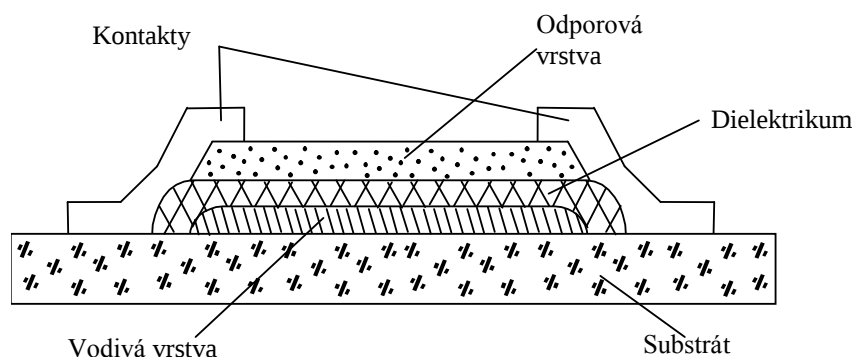
Skutečné propojovací prvky realizované na základě RC struktur při zadaných vnějších vývodech, při zadané geometrii střídajících se vrstev, omezení jejich množství, atd., budeme nazývat RC prvky s rozloženými parametry.

2.2 Technologie výroby tlustovrstvých RC-PRP

Tlustovrstvá technologie je v současné době dominantní metodou (takové obvody tvoří téměř 70 % celkového objemu vyráběných HIO v zahraničí). Výroba tlustovrstvých HIO je podněcována potřebou v komponentách REZ (radioelektronických zařízeních) s vysokými úrovněmi výkonu a vysokými pracovními napětími. Ale tenkovrstvé obvody jsou nutné pro vytvoření rychločinných miniaturních kontrolně-měřicích a radioelektronických zařízení určených pro provoz v centimetrovém a milimetrovém rozsahu délek vln.

Tlustovrstvé HIO se vyrábějí metodou sítotisku. Na dielektrický substrát se nanáší dielektrické, odporové a vodivé pasty s následným vypalováním za vysokých teplot (500 až 1000 °C). Tloušťka tlusté vrstvy může být od jednotek do několika desítek mikronů.

Konstrukce tlustovrstvého RC-PRP je uvedena na obr. 2. Můžeme si všimnout, že se odporová vrstva zpravidla nanáší přes dielektrické vrstvy. To se dělá z toho důvodu, že teplota vypalování odporové vrstvy je nižší než u dielektrické vrstvy.



Obr. 2: Tlustovrstvý odporově-kapacitní prvek s rozloženými parametry (průřez)

Při výrobě vodivých past pro kvalitní vodivý základ je nejrozšířenější použití drahých kovů (zlato, stříbro, platina a paladium), které se mohou využívat jak v čistém stavu, tak ve formě slitin.

Odporové pasty se ve většině případů vyrábějí na základě oxidu ruthenia. Tyto pasty zabezpečují pásmo hodnot povrchových odporů od 3 $\Omega/\square$ do 10 $M\Omega/\square$. Dielektrické pasty obsahují prášky feroelektrik (například titaničitan barnatý $BaTiO_3$), které mají vysokou hodnotu relativní permitivity ϵ . Přitom měrná kapacita dosahuje 40 až 100 pF/mm².

Velmi perspektivním se jeví použití polymerních tlustovrstvých past v HIO, přednostmi jsou rozsah měrného povrchového odporu, nízká teplota tvrzení, nízká cena i možnost výroby vodivých, odporových a dielektrických vrstev.

Stále větší zájem při výrobě HIO vzbuzují měděné pasty, díky možnosti výroby jak vodičů, tak i odporů, výborné smáčivosti mědi a vysoké odolnosti proti rozpouštění. Složitost aplikace past na základě mědi spočívá v tom, že měď při zvýšených teplotách reaguje s kyslíkem, proto se vypalování musí provádět v ovzduší dusíku při obsahu kyslíku v atmosféře maximálně $(1 \text{ až } 9) \cdot 10^{-4} \%$.

Důležitou výrobní etapou výroby tlustovrstvých HIO je vypalování. Obvykle se substrát HIO vypaluje za každým procesem sítotisku pro získání pevného spojení motivu se substrátem. Substrát se nahřívá s definovanou rychlostí, dodržuje se určitý čas při stabilní teplotě a potom chladne také s definovanou rychlostí. Pro dosažení vysoké úspěšnosti výstupu kvalitních tlustovrstvých HIO je nutná nejenom vysoká přesnost nastavené teploty, ale také její časová stabilita. Pro zvyšování pracovního výkonu se používají IČ (infračervené) pece, jejich odlišnost od běžných spočívá v tom, že ohřev substrátu se v nich uskutečňuje ze záření několika nahřívacích prvků, které mají velmi vysokou teplotu (kolem 2200 °C) a ne díky průchodu přes zóny, ve kterých teplota odpovídá požadované teplotě. Vypalování v IČ peci je 3 až 4 krát rychlejší než v běžných, ale je v nich náročnější vybrat takovou posloupnost nahřívacích prvků, která zajistí požadované parametry hodnot odporů.

Poměrně nedávno byly v USA zpracovány UHF (vysokofrekvenční) pece, které mají vysokou rychlost výrobního procesu a zabezpečují stejné rozvádění tepla v komoře. UHF-tepelné zpracování se může provádět jak ve vakuu, tak v oxidační, redukční nebo inertní atmosféře.

Odborníci v USA navrhli nový technologický postup výroby HIO s použitím organokovových spojů, které umožňují vyrábět obvody různého určení.

Organokovové materiály jsou dobře rozpustné organickými rozpouštědly, které se obvykle používají při výrobě past pro tlustovrstvé HIO. Vypálením organokovového spoje se vytvoří na povrchu substrátu velmi hladký tenký film, navenek připomínající vrstvu vzniklou vakuovým napařováním. Tloušťka organokovového filmu, získaného pomocí sítotisku, činí 150 – 200 nm (při tlustovrstvé technologii má nanosená pasta tloušťku 7 – 15 μm).

Organokovový povlak je možno na substrát nanést různými způsoby: ponořením, rozprášením, natíráním a sítotiskem. Proces ohřívání a vypalování organokovových spojů a tlustovrstvých past je podobný, nicméně v důsledku vyššího obsahu organických látek v organokovových spojkách je při vypalování nutné zajistit dobrou ventilaci peci. Maximální

teplota vypalování tady není kritická jako v případě tlustovrstvých past; musí být pouze dost vysoká na to, aby zajistila rozklad organických látek a tím zajistila vysokou adhezi povlaku k substrátu. Zpravidla, podle typu substrátu, je teplota vypalování organokovových vrstev v rozsahu 500 až 850 °C.

Organokovové materiály mají podstatné přednosti oproti tlustovrstvým pastám: jsou levnější, volba substrátů s použitím těchto materiálů je o mnoho širší (mohou jimi být oxidy a nitrid hlinitý, polyimid). Nakonec, pomocí chemického nebo plazmového leptání vypalovaných organokovových povlaků, je možno získat spoje s velmi malou šířkou a vysokou hustotou prvků, čehož nelze dosáhnout pomocí tlustovrstvé technologie.

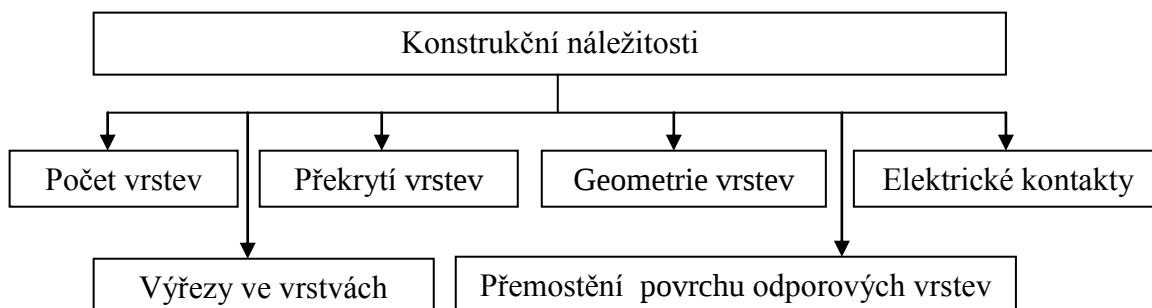
Z uvedeného přehledu technologických možností výroby vrstevových RC-PRP lze udělat následující závěry:

- Stávající metody vytváření tlustých vrstev s požadovanou topologií, při použití běžných i organokovových materiálů, dovolují vytvářet RC-PRP s časovou konstantou od jednotek sekund do desítek mikrosekund. To znamená, že jsou takové prvky využitelné v rozsahu frekvencí od jednotek Hz do desítek MHz. Přesnost časové konstanty hlavně závisí na přesnosti reprodukce elektrofyzikálních vlastností vrstev, které závisí na stálosti technologických postupů při výrobě substrátů, čili na dokonalosti technologického zařízení.
- Existence zvláštností u konkrétních technologií v matematických modelech RC-PRP může být vyjádřena výskytem parazitních vlivů RC prvků, nenulového odporu vodivých vrstev a výskytu ztrát v dielektrických prvcích. Chyby spojené s nerovnoměrnou tloušťkou vrstev na ploše struktury, s nehomogenitou vlastností povlaků v rozmezí prvku, s rozlišovací schopností metody vytváření vrstvy lze zanedbat.

2.3 Návrhové pravidla pro realizaci RC-PRP

Je zřejmé, že matematické modely RC-PRP především definují konstrukci prvku, ale možnosti konstrukce výrazně závisí na použité technologii výroby a na existenci mnoha možných konstrukčně-technologických verzí, a tak v rámci jedné práce prakticky není možné všechno popsat. Proto se v rámci této práce budeme soustředit na prozkoumání konstrukčních možností realizace ve vrstevových technologiích, v současné době nejrozšířenějšímu postupu při výrobě RC-PRP. Všechny mnohotvárnosti konstrukcí RC-PRP je možné formálně popsat pokud se zavedou konstrukční náležitosti, které charakterizují různé zvláštnosti konstrukce. Takové konstrukční náležitosti k vrstevovým technologiím jsou reprezentovány v klasifikačním diagramu, zobrazeném na obr. 3. Nyní se blíže podíváme na možné varianty

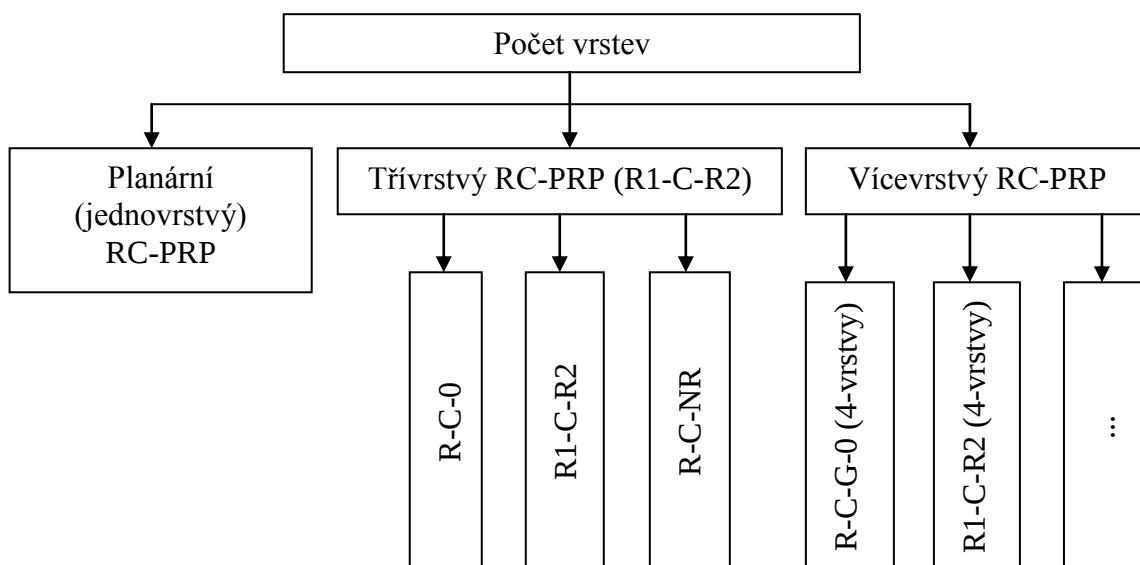
konstrukcí. S některými z nich se setkáme v literatuře, ale některé je možno získat s použitím zavedení klasifikace konstrukčních náležitostí, například u vrstevných RC-PRP.



Obr. 3: Klasifikace náležitostí, ukazující možnosti konstrukce vrstevných RC-PRP

2.3.1 Počet vrstev

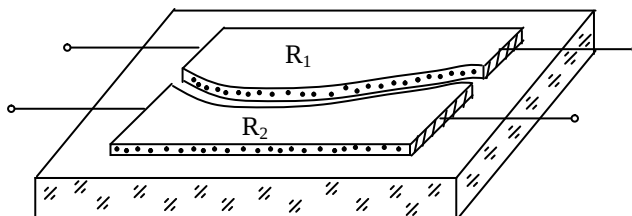
Variety konstrukcí RC-PRP, lišící se počtem vrstev, jsou reprezentovány na diagramu, který je zobrazen na obr. 4.



Obr. 4: Možnosti konstrukce RC-PRP, lišící se počtem vrstev

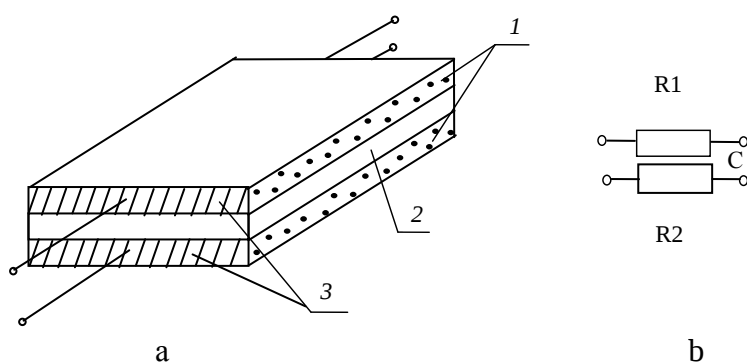
Planární konstrukce RC-PRP je zobrazena na obr. 5. Toto konstrukční uspořádání je tvořeno prvky R1-C-R2 (zde a později bude značeno: R – odporová vrstva; C – dielektrická vrstva; 0 - vodivá vrstva). Kapacita prvků se tvoří v mezeře mezi dvěma odporovými cestami. Je zřejmé, že v takové konstrukci předepsaných parametrů je možné elektrické charakteristiky měnit změnou tvaru mezery mezi prvky R1 a R2, aplikací různých materiálů na R1, R2 a také na C, čili vyplnit vzduchovou mezeru mezi R1 a R2 dielektrickým materiálem. Takový

RC-PRP je jednoduché vyrobit, ale má malou hodnotu kapacity, proto je vhodný hlavně pro použití v UHF (vysokofrekvenčním) rozsahu frekvencí.



Obr. 5: Planární konstrukce RC-PRP: R_1 , R_2 – odporové vrstvy

Třívrstvá konstrukce RC-PRP se strukturou vrstev typu R_1 -C- R_2 je vidět na obr. 6. To je neprostudovanější typ RC-PRP, odlišující se od ostatních jednoduchostí výroby a širokým rozsahem kapacit struktury.

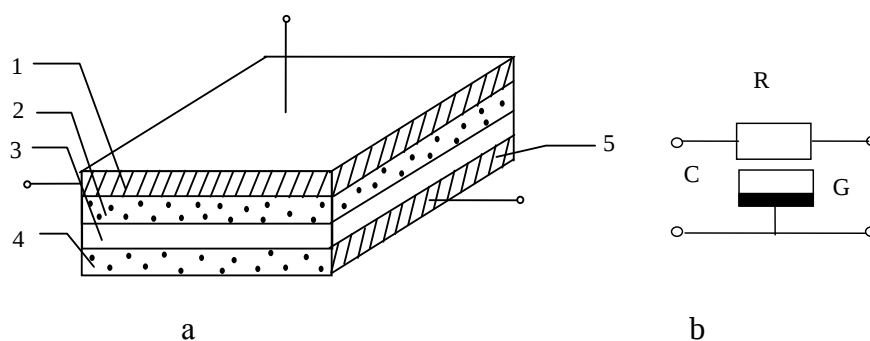


Obr. 6: Konstrukce (a) a schematická značka (b) vrstvého RC-PRP se strukturou vrstev typu R_1 -C- R_2 :
1 – odporová; 2 – dielektrická; 3 – kontaktní plochy

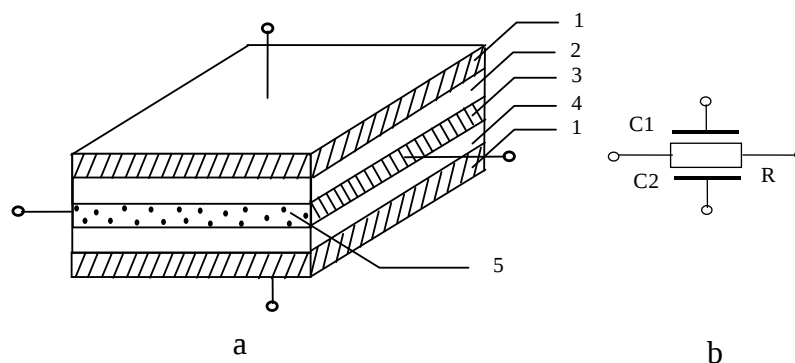
Ne vždy bývají odporové i vodivé vrstvy odděleny vrstvou dielektrickou. Tuto konstrukci můžeme vidět na obr. 7. Dolní odporová vrstva se nanáší bezprostředně na vodivou vrstvu, která je společným vývodem struktury.

Jako příklad pro prozkoumání vícevrstvé struktury nám může posloužit RC-PRP typu C_1 -R-C2, jehož konstrukce je zobrazena na obr. 8.

Známé jsou i struktury s velkým počtem vrstev, například struktura typu R-C-NC-MC-O (N, M - konstanty).



Obr. 7: Konstrukce (a) a schematická značka (b) vrstvého RC-PRP se strukturou vrstev typu R-C-G-O:
1 – vodivá; 2 – druhá odporová; 3 – dielektrická; 4 – první odporová; 5 – kontaktní plochy



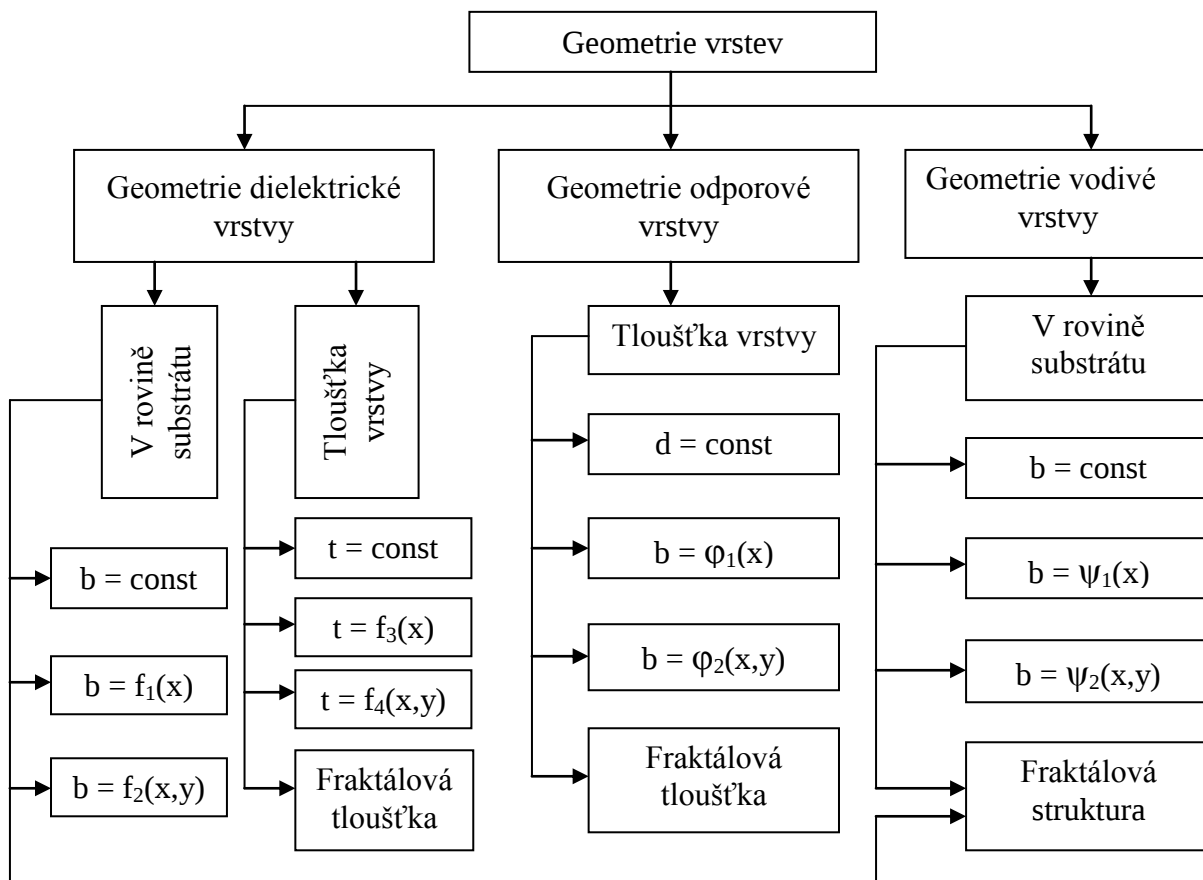
Obr. 8: Konstrukce (a) a schematická značka (b) vrstvého RC-PRP se strukturou vrstev typu C1-R-C2:
1 – vodivá vrstva; 2 – vrchní dielektrická vrstva; 3 – kontaktní plochy; 4 – spodní dielektrická vrstva;
5 – odporová vrstva

2.3.2 Geometrie vrstev

Variety konstrukcí RC-PRP, odlišující se počtem vrstev, jsou zobrazeny na obr. 9. Zde: b – šířka plochy odporové i vodivé vrstvy; t – tloušťka odporové vrstvy a d – tloušťka dielektrické vrstvy; f_i , φ_i a ψ_i – funkce (v obecném případě libovolné) změn geometrických parametrů vrstev.

Je zřejmé, že pravoúhlá geometrie RC-PRP je nejjednodušeji vyrobitelná. Nicméně, zaváděním změn šířky složek vrstev RC-PRP, je možno dostat dodatečné stupně volnosti pro zlepšení charakteristik zapojení.

Dobře je známé chování RC-PRP, v nichž se šířka struktury mění podle jasné funkce ve směru délky struktury. Přitom se patřičně mění jednotkový odpor $Z(x)$ a jednotková vodivost $Y(x)$ struktury. Analytické vyjádření existuje jen pro určité typy $Z(x)$ a $Y(x)$, zobrazené v tab. 1. Zde Z_0 , Y_0 , k – konstanty.

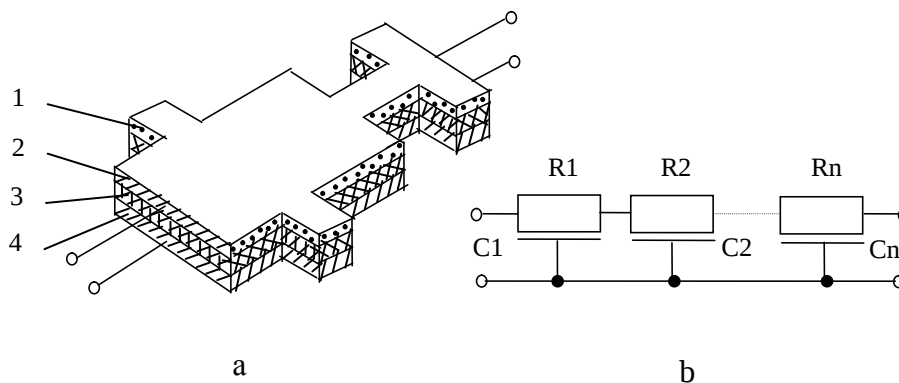


Obr. 9: Varianty konstrukce RC-PRP, lišící se geometrií vrstev

Tab. 1: Druhy jednorozměrných nehomogenních RC-PRP, pro které existuje analytické vyjádření

Funkce změny šířky $b(x)$	$Z(x)$	$Y(x)$
Lineární	$Z_0/(1-kx)$	$y_0(1-kx)$
Parabolická	$Z_0/(1+kx)^2$	$y_0(1+kx)^2$
Mocninná	Z_0x^k	y_0x^{-k}
Exponenciální	Z_0e^{kx}	y_0e^{-kx}
Trigonometrická	$Z_0\operatorname{cosec}^2(k_1x+k_2)$ $Z_0\operatorname{sec}^2(k_1x+k_2)$	$y_0\sin^2(k_1x+k_2)$ $y_0\cos^2(k_1x+k_2)$
Hyperbolická	$Z_0\operatorname{sech}^2(k_1x+k_2)$ $Z_0\operatorname{cosech}^2(k_1x+k_2)$	$y_0\operatorname{ch}^2(k_1x+k_2)$ $y_0\operatorname{sh}^2(k_1x+k_2)$

K těmto typům RC-PRP lze avšak podmíněčně zavést i "schodovité" struktury, šířka kterých se nemění plynule, ale skokově (obr. 10).



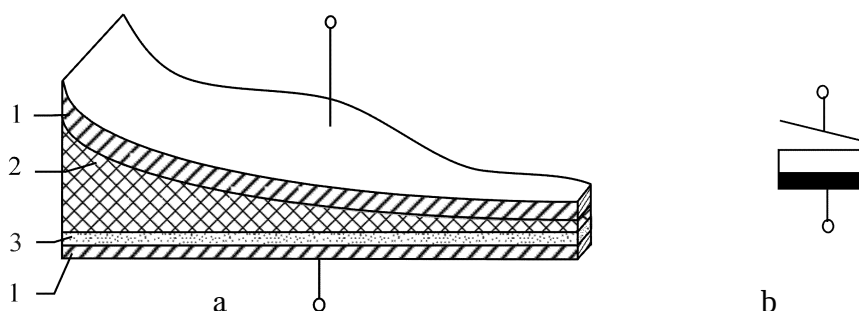
Obr. 1.15.: Konstrukce (a) a ekvivalentní schéma (b) vrstevného schodovitého RC-PRP:

1 – odporová vrstva; 2 – kontaktní elektroda; 3 – dielektrikum; 4 – vodivá vrstva

V takových strukturách se objevuje dodatečná míra volnosti pro zajištění předepsaných charakteristik v případě změny velikosti jednotlivých sekcí.

Je zřejmé, že ve výhledu se struktura RC-PRP může měnit podle libovolné funkce, včetně fraktální.

Pro získání zadaných elektrických charakteristik RC-PRP může sloužit změna tloušťky vrstev podle určité funkce. Jsou známy RC-PRP, v nichž se realizuje proměnná tloušťka dielektrické vrstvy. Zobecněná konstrukce takového RC-PRP je zobrazena na obr. 11.



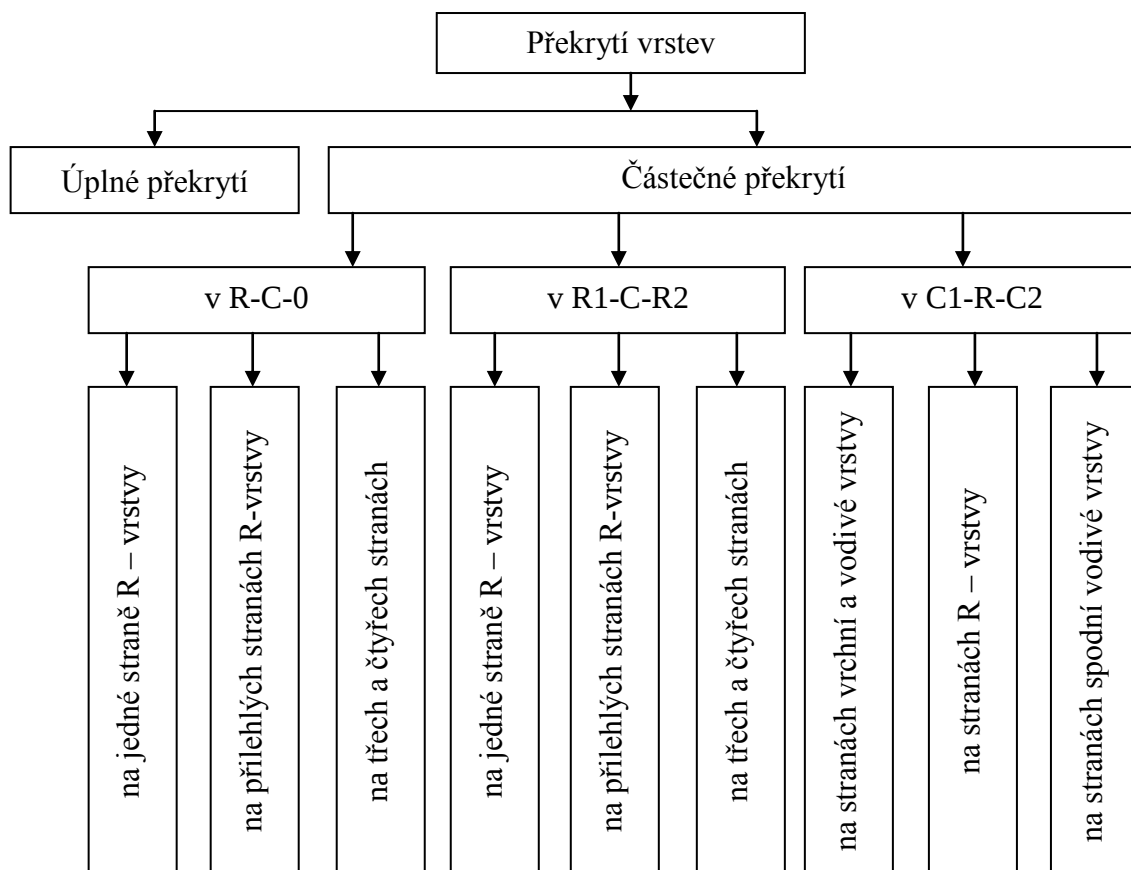
Obr. 11: Konstrukce (a) a schematická značka (b) RC-PRP s proměnnou tloušťkou dielektrické vrstvy:

1 – vodivá vrstva; 2 – dielektrická vrstva; 3 – odporová vrstva

Fraktální tloušťku vrstev lze realizovat konkrétně s využitím hlinitooxidové technologie. Zde je nutné, aby původní podklad (vodivá vrstva – hliník) měl velkou drsnost. Jak je známo, takové povrchy, tudíž i tloušťky vrstev, získané tímto způsobem, jsou fraktálními.

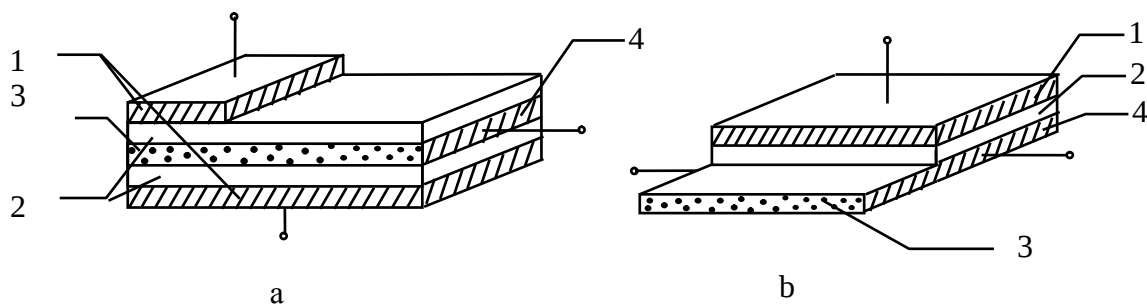
2.3.3 Překrývání vrstev

Ve všech uvedených vícevrstvých konstrukcích RC-PRP byly odporové, dielektrické i vodivé vrstvy plně překryté, nepřesahující vzájemné hranice. Nicméně jsou známy struktury s částečným překrytím vrstev, v nichž se rozměry jedné vrstvy neshodují s rozměry ostatních vrstev. Možné varianty částečného překrytí vrstev v RC-PRP jsou reprezentovány na obr. 12.



Obr. 12: Varianty konstrukce RC-PRP, lišící se velikostí překrytí vrstev

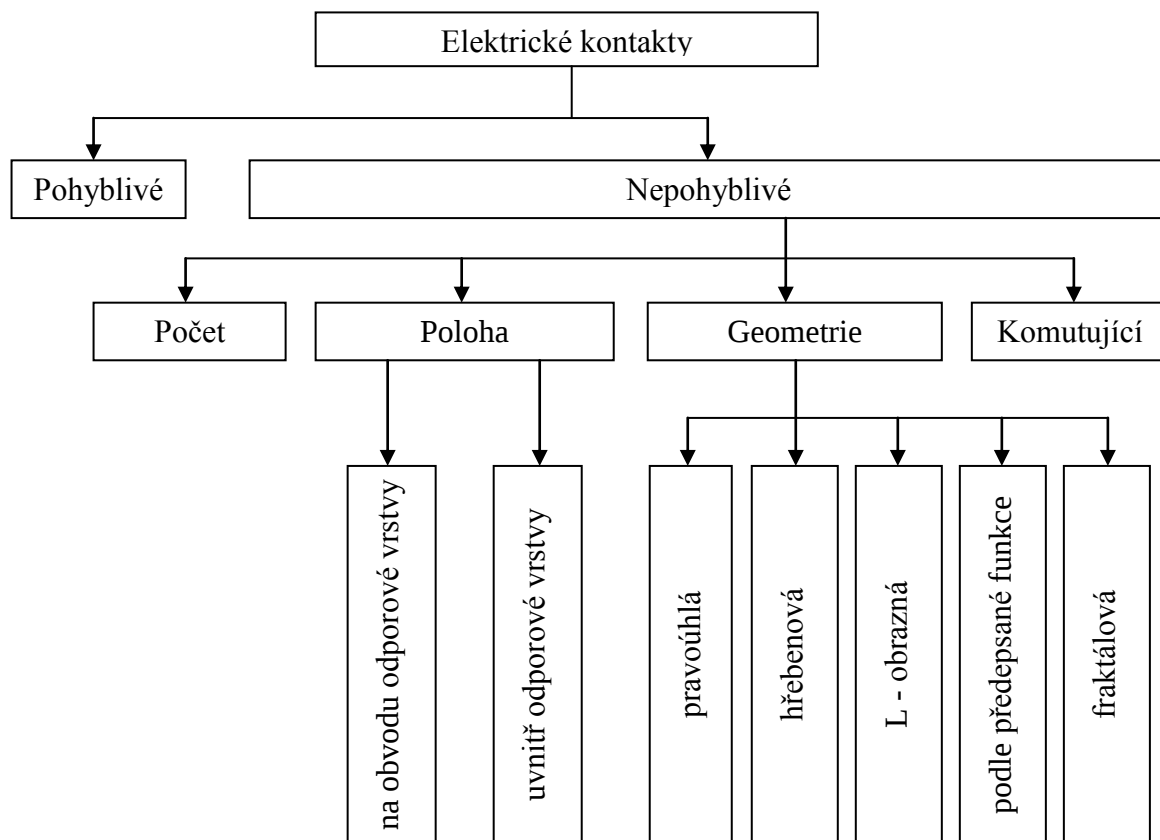
Konstrukce některých variant takového RC-PRP jsou zobrazeny na obr. 13. Zde jedna ze struktur (obr. 13a) patří ke strukturám s částečným překrytím vrchní elektrody (vodivé vrstvy) s odporovou vrstvou. Druhý příklad (obr. 13b) – struktura R-C-0 s částečným jednostranným překrytím odporové vrstvy.



Obr. 13: Struktura RC-PRP se strukturou vrstev typu C-R-NC (a) a R-C-0 (b) s neúplným překrytím vrstev:
1 – vodivá vrstva; 2 – dielektrická vrstva; 3 – odporová vrstva; 4 – kontakty

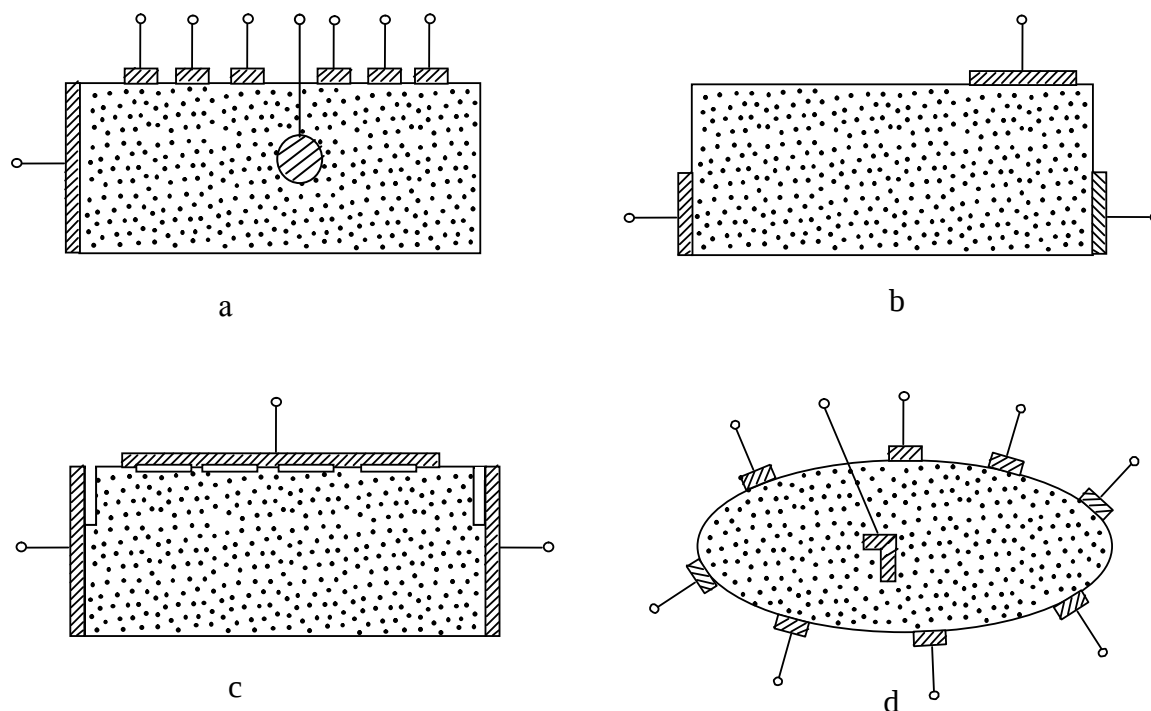
2.3.4 Elektrické kontakty

Dalším účinným konstrukčním faktorem pro splnění předepsaných elektrických charakteristik se jeví systém elektrických kontaktů, pomocí kterých se uskutečňuje jak vnitřní přepínání mezi vrstvami nebo částí vrstev, tak i spínání RC-PRP do obvodu. Poloha a tvar styku podmiňuje rozdělení potenciálů v odporové vrstvě a počet kontaktů – množství styků, které je možno realizovat jak uvnitř RC-PRP, tak i po obvodu RC-PRP obvodu. Varianty konstrukcí RC-PRP, odlišující se kontakty, jsou zobrazeny na obr. 14.



Obr. 14: Varianty konstrukce RC-PRP, lišící se kontakty

Příklady možných RC-PRP s nepohyblivými kontakty jsou uvedeny na obr. 15.



Obr. 15: Topologie odporových vrstev RC-PRP s různými pevnými kontakty

Konstrukce pohyblivých kontaktů sahá za rámec dané práce, proto je zde nebudeme popisovat.

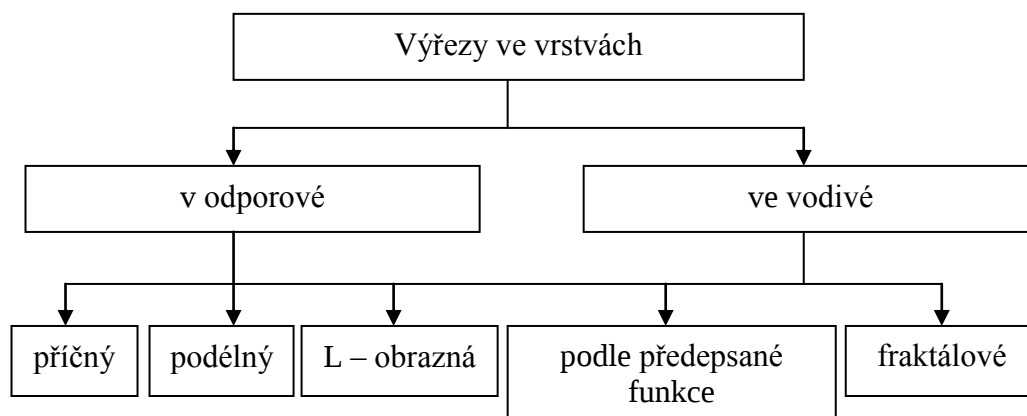
2.3.5 Výřezy a řezy ve vrstvách

Důležitým faktorem pro rozšíření funkčních možností RC-PRP a také pro zajištění předepsaných charakteristik se jeví zavádění řezů a výřezů jak v odporových, tak ve vodivých vrstvách (obr. 16).

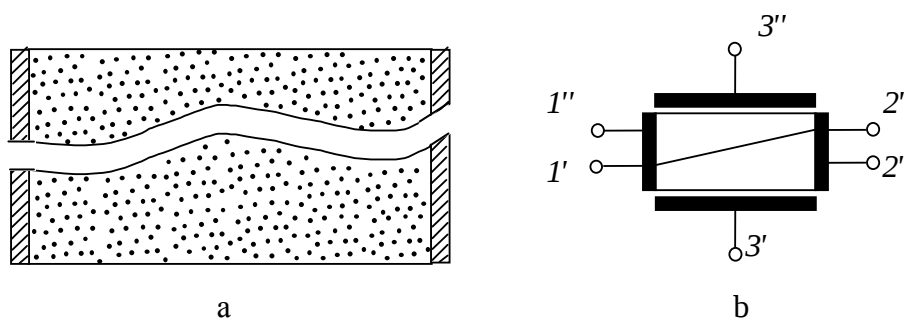
Je zřejmé, že příčné a podélné řezy do odporové vrstvy lze použít ke kompenzaci nevyhnutelných výrobních chyb a také pro získání nových vlastností.

Tak, při dělení vrstevové jednorozměrné stejnorodé (pravoúhlé) RC-PRP se skladbou vrstev typu R-C-0 na dva jednorozměrné nehomogenní prvky zářezem stálé šířky, která se mění podle předepsané funkce, je možno získat dva jednorozměrné nehomogenní prvky, které vytváří komplementární RC-PRP.

Topologie odporové vrstvy a schematická značka, získané při tomto RC-PRP, jsou zobrazeny na obr. 17.



Obr. 16: Varianty konstrukce RC-PRP, lišící se typem výřezů

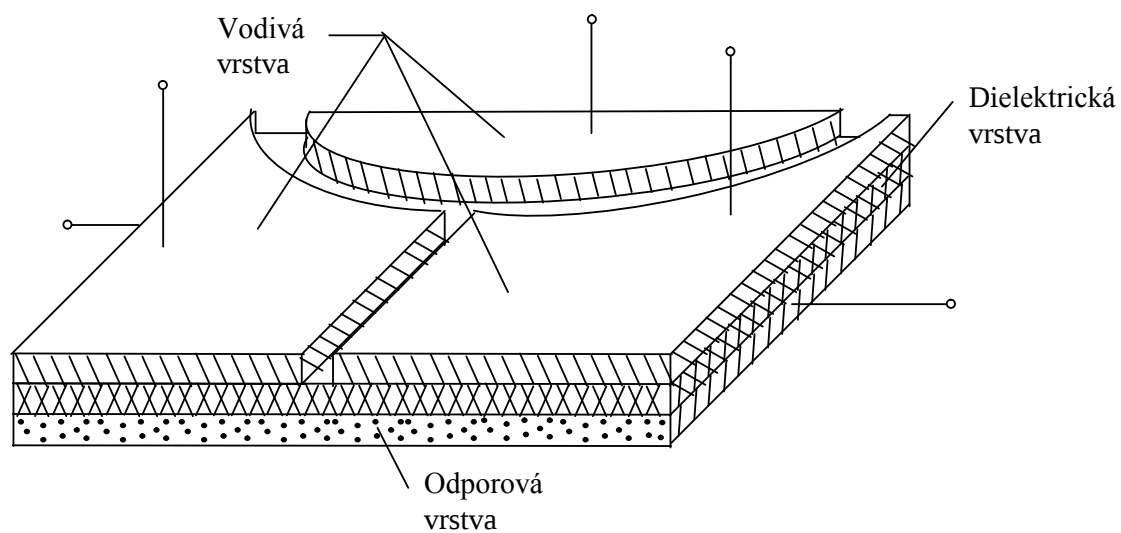


Obr. 17: Topologie odporové vrstvy (a) a schematická značka (b) jednorozměrného komplementárního RC-PRP

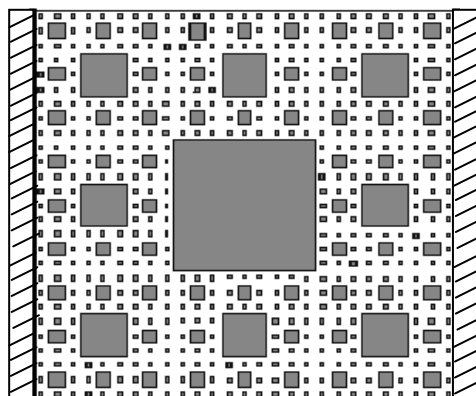
Vytvářením řezů podle předepsaných funkcí ve vodivé vrstvě pravoúhlého RC-PRP (typu R-C-0) je možno získat prvky s účelnými parametry. Jeden příklad takové struktury je uveden na obr. 18.

Jako příklad fraktálních řezů může sloužit RC-PRP se skladbou vrstev R-C-0, jehož topologii odporové vrstvy prezentuje dvojrozměrný koberec Serpinského (obr. 19).

Je zřejmé, že spojení nejrozumnějších konstrukčních faktorů ještě více zvětší funkční možnosti RC-PRP i oblasti jejich všemožné aplikace.



Obr. 18: Konstrukce RC-PRP s různými parametry



Obr. 19: Topologie odporové vrstvy RC-PRP typu koberce Serpinskogo

3 Praktická část

3.1 Návrh topologie obvodu

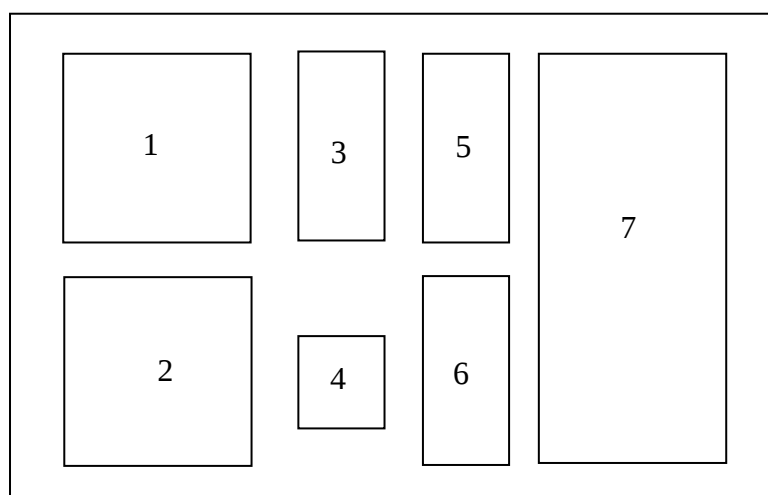
Pro náš experiment je třeba spojit na jednom substrátu tři typu RC-PRP:

1. RC-PRP se strukturami tvaru R-C-0,
2. RC-PRP se strukturami tvaru R-C-NR, kde místo vodivé vrstvy vytvoříme druhou odporovou vrstvu s nominálními hodnotami, odlišujícími se od první vrstvy N – krát,
3. RC-PRP se strukturami tvaru R-C-G-0, kde se na vodivý podklad nanáší vrstva vysokoohmového odporového materiálu.

Při výrobě je třeba pamatovat na to, že ve vícevrstvé konstrukci, vyrobené tlustovrstvou technologií, musí mít každá následující vrstva teplotu vypalování nižší než předcházející. V RC-PRP se strukturami vrstev R-C-0 nejprve formujeme vodivou vrstvu, potom dielektrikum, potom, pokud je třeba, druhou vodivou vrstvu a nakonec odporovou vrstvu, která má nejnižší teplotu vypalování. Struktury tvaru R-C-NR a R-C-G-0 obsahují dvě odporové vrstvy, jsou tedy nutné odporové materiály, u kterých budou teploty vypalování různé.

3.1.1 Rozložení prvků na substrátu

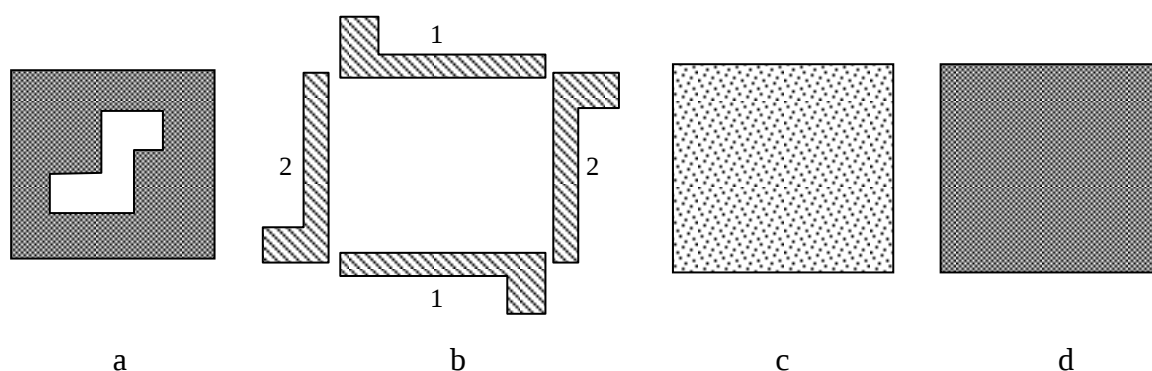
Navrhujeme rozložení vrstev RC-PRP podle níže uvedeného rozmístění prvků (schéma je uvedeno bez rozměrů). Rozměry určíme až při realizaci těchto RC-PRP na substrátu s ohledem na konkrétní technologické tolerance na vystředění vrstev a na mezery mezi prvky.



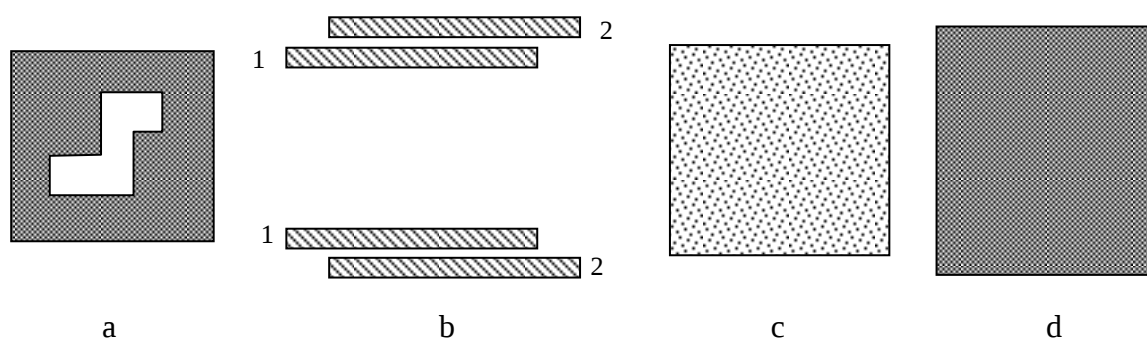
Obr. 20: Rozložení prvků na substrátu:

1 – R-C-NR-1; 2 – R-C-NR-2; 3 – R-C-0; 4 – C; 5 – R; 6 – R-C-G-0; 7 – R1-C1-R-C2-R2

Na obr. 21 a obr. 22 jsou zobrazeny R-C-NR-1 a R-C-NR-2 struktury.



Obr. 21: R-C-NR-1 (prvek 1): a - spodní odporová vrstva;
b – vrstva kontaktní ploch (1 – k spodní odporové vrstvě, 2 – k vrchní odporové vrstvě);
c – dielektrická vrstva; d – vrchní odporová vrstva



Obr. 22: R-C-NR-2 (prvek 2): a - spodní odporová vrstva;
b – vrstva kontaktní ploch (1 – k spodní odporové vrstvě, 2 – k vrchní odporové vrstvě);
c – dielektrická vrstva; d – vrchní odporová vrstva

Požadavky na tyto struktury:

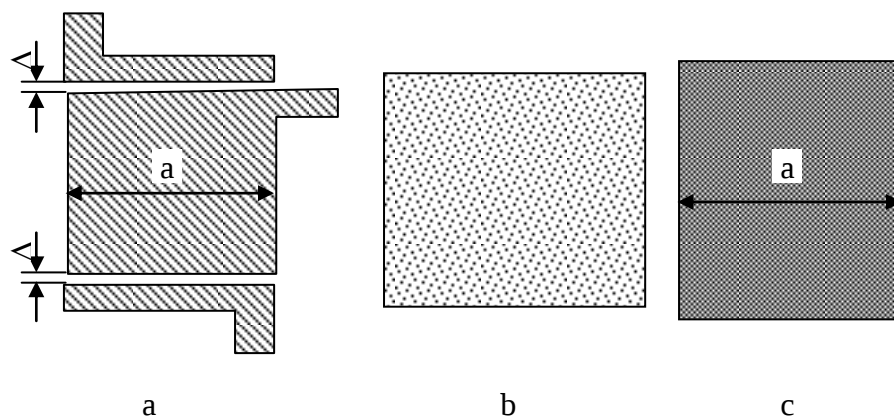
Odporové vrstvy musí (pokud možno) utvářet na průsečíku čtverec (pro R-C-NR-1) a rozkládat se nad sebou bez přechlápání po šířce (pro R-C-NR-2).

Dielektrická vrstva má mít takovou velikost, aby nevznikl zkrat mezi vrstvami, ale zároveň aby byl zabezpečen kontakt mezi odporovými vrstvami a odpovídajícími kontaktními plochami, vyrobenými ve vodivé vrstvě, při předepsaných tolerancích vystředění vrstev.

Kontaktní plochy musí plně překrývat odporové vrstvy po šířce (délce). Jejich zakončení musejí být plochy dostatečně velké pro připájení vodičů a pro přiložení měřicích sond.

Velikost výřezů v odporových vrstvách může být libovolná, ale jejich plocha nesmí být menší než $\frac{1}{4}$ plochy odporové vrstvy. Výřezy se umístí doprostřed oblasti nanesených vrstev.

Na obr. 23 je zobrazena R-C-0 struktura.



Obr. 23: R-C-0 (prvek 3): a – vrstva vodičů a kontaktních ploch;
b – dielektrická vrstva; c – vrchní odporová vrstva

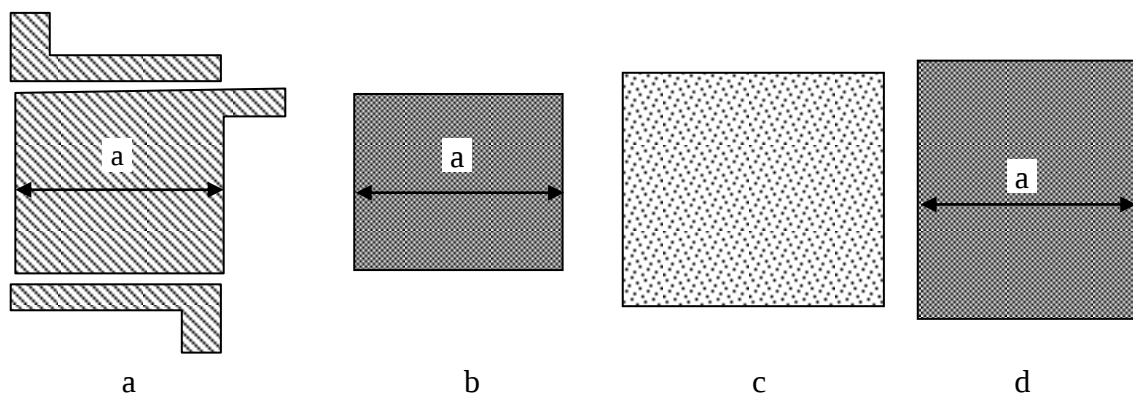
Požadavky na tyto struktury:

Je to testovací RC-PRP, jehož parametry budou měřeny po vyrobení.

Mezery Δ musejí být pokud možno minimální.

Vrstva kontaktních ploch a vrstva rezistorů musejí mít stejnou šířku a a musejí se rozkládat přesně (přesné ztotožnění masek) nad sebou.

Na obr. 24 je zobrazena R-C-G-0 struktura.



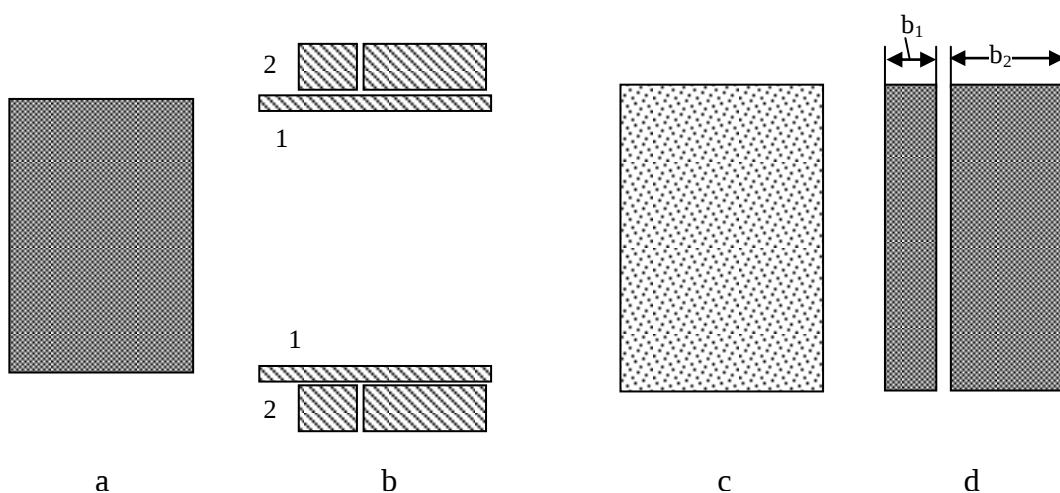
Obr. 24: R-C-G-0 (prvek 6): a – vrstva vodičů a kontaktních ploch; b – odporová vrstva;
c – dielektrická vrstva; d – vrchní odporová vrstva

Požadavky na tyto struktury:

Na rozdíl od R-C-0 se na vodivou vrstvu nanáší vysokoohmová odporová vrstva (vrstva G), ve které se používá příčná vodivost. Ostatní podmínky jsou stejné jako u R-C-0.

Kontrolní kondenzátor C (prvek 4) má čtvercovou formu pro kontrolu měrné kapacity a TKR. Kontrolní odpor R (prvek 5) má stejnou velikost jako rezistor RC-PRP se strukturou R-C-0.

Na obr. 25 je zobrazena R1-C1-R-C2-R2 struktura.



Obr. 25: R1-C1-R-C2-R2 (prvek 7): a - spodní odporová vrstva;

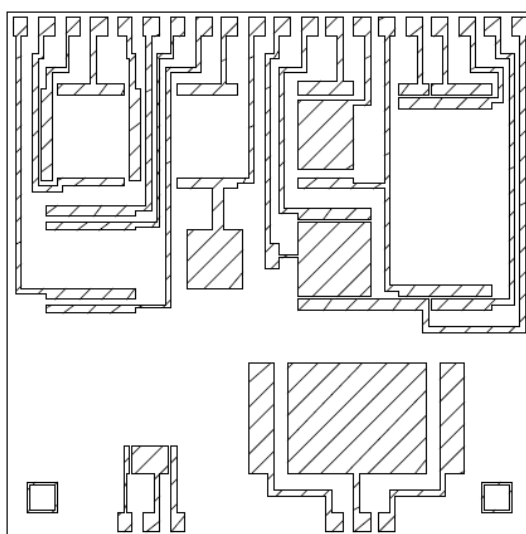
b – vrstva kontaktních ploch (1 – k spodní odporové vrstvě, 2 – k vrchní odporové vrstvě);

c – dielektrická vrstva; d – vrchní odporová vrstva

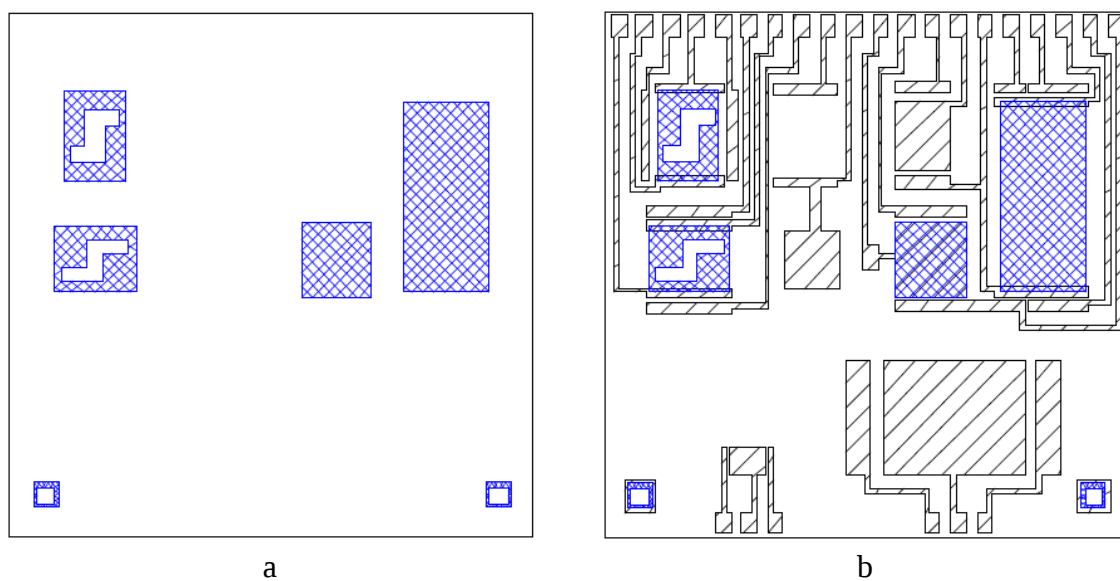
Požadavky na tyto struktury: všechny mezery minimální a poměr $b_1:b_2 = 1:2$.

3.1.2 Realizovaná topologie obvodu

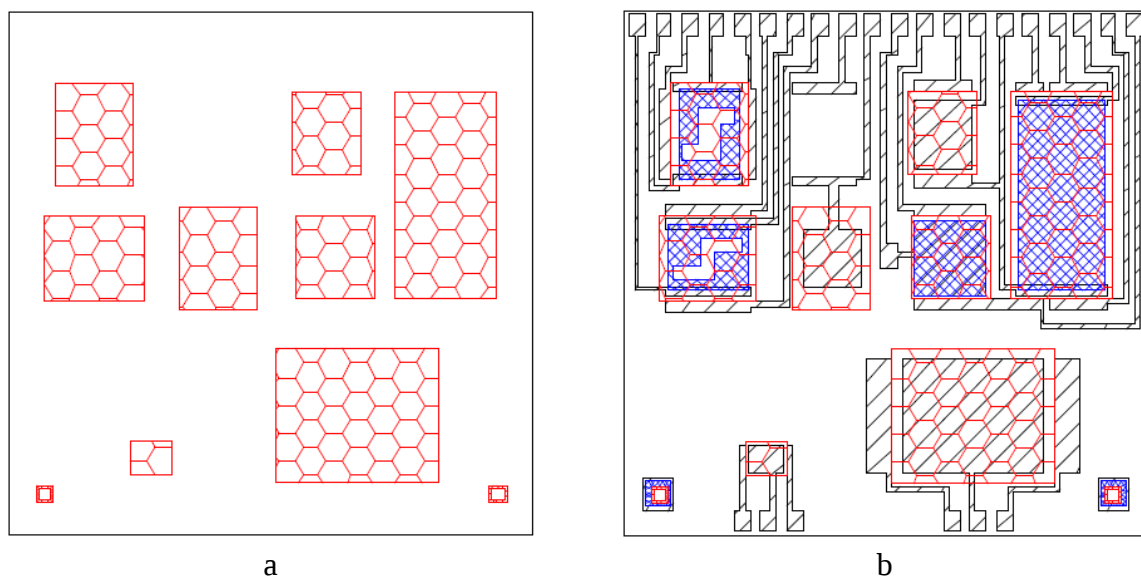
Podle zadaných požadavků jsme navrhli topologii vrstev, kterou můžeme vidět na následujících obrázcích. Na obrázcích je zobrazen postup nanášení jednotlivých vrstev past, na obrázku vlevo můžeme vždy vidět topologii aktuálně nanášené vrstvy a na obrázku napravo zobrazení všech dosud nanesených vrstev past.



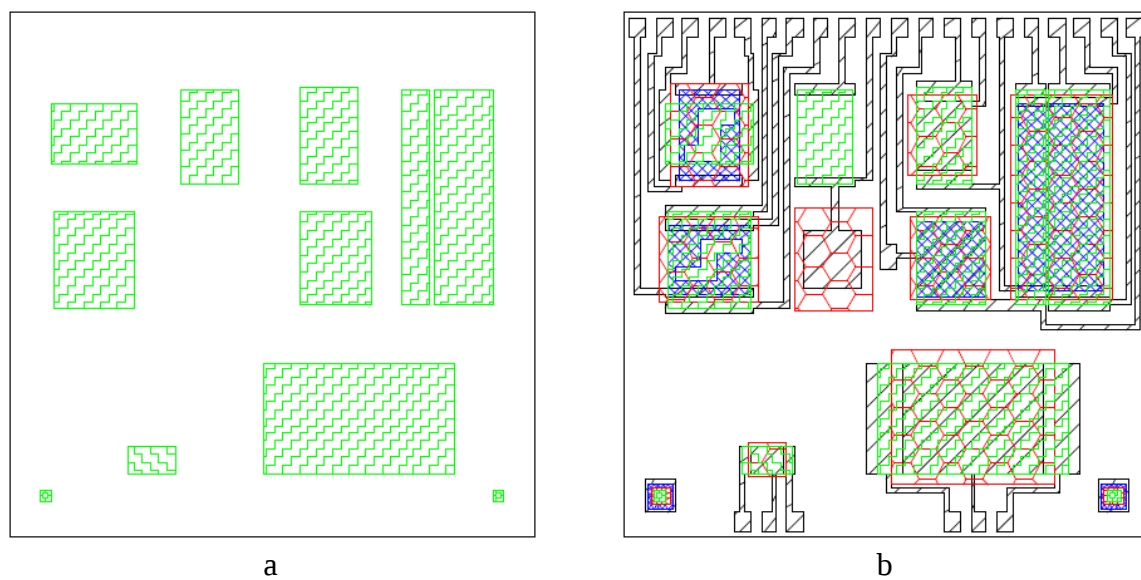
Obr. 26: Vodivá vrstva (1. vrstva)



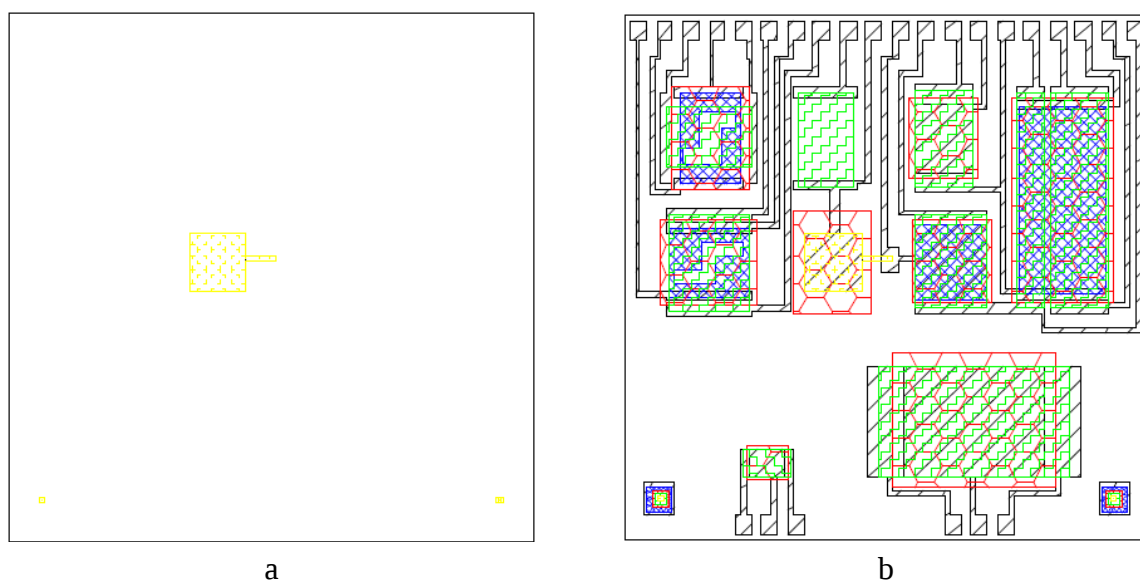
Obr. 27: 2. vrstva: a – spodní odporová vrstva; b – vrstvy dohromady



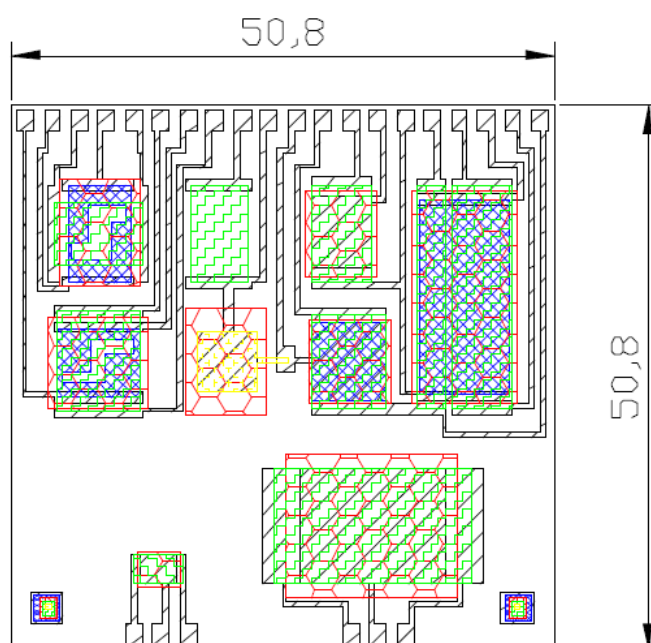
Obr. 28: 3. vrstva: a – dielektrická vrstva; b – vrstvy dohromady



Obr. 29: 4. vrstva: a – vrchní odporová vrstva (4. vrstva); b – vrstvy dohromady



Obr. 24: 5 vrstva: a – vodivá vrstva; b – vrstvy dohromady



Obr. 25: Tlustovrstvé RC prvky s rozloženými parametry

Na obr. 25 můžeme vidět celkovou navrženou topologii všech vrstev na substrátu.

3.2 Analýza naměřených hodnot

V praktické části jsme nechali jednotlivé vrstvy osmnácti vyrobených substrátů vypalovat při různých podmínkách (vypalovacích režimech), které jsou níže uvedeny v tab. 2. Měřili jsme odpor spodní odporové vrstvy, naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.

Z naměřených hodnot jsme vytvořili grafy závislosti odporu prvků spodní odporové vrstvy v závislosti na vypalovacích režimech této vrstvy a zjistili jaký vliv na odpor prvků spodní odporové vrstvy má vypalování následné dielektrické vrstvy.

Naměřené hodnoty jsme poté vyhodnotili faktorovou analýzou, našli rovnice regrese pro hodnotu odporu prvků spodní odporové vrstvy po vypálení všech vrstev.

Tab. 2: Podmínky při vytváření vrstev

Číslo experimentu	Číslo substrátu	Teplota výpalu [°C]	Doba výpalu [min]
Spodní vodivá vrstva			
1	1 – 18	850	7
Spodní odporová vrstva (100 kΩ/□). Pasta ESL 3915			
1	1, 2, 5, 6	810	7
2	3, 4, 7, 8	810	13
3	10, 11, 14, 15	890	7
4	12, 13, 16, 17	890	13
5	9, 18	850	10
Dielektrická vrstva. Pasta ESL 4917			
1	1, 2, 3, 4, 10, 11, 12, 13	810	10
2	5, 6, 7, 8, 14, 15, 16, 17	890	10
5	9, 18	850	10
Vrchní odporová vrstva (10 kΩ/□). Pasta ESL 2914			
1	1, 2, 5, 6	810	7
2	3, 4, 7, 8	810	13
3	10, 11, 14, 15	890	7
4	12, 13, 16, 17	890	13
5	9, 18	850	10
Vrchní vodivá vrstva. Pasta ESL 9562			
1	1 - 18	810	7

Tab. 3: Naměřené hodnoty odporu prvků spodní odporové vrstvy

Číslo experimentu	Číslo substrátu	Po vypálení odporové vrstvy			Po vypálení dielektrické vrstvy			Po vypálení všech vrstev		
		R1 [kΩ]	R2 [kΩ]	R7 [kΩ]	R1* [kΩ]	R2* [kΩ]	R7* [kΩ]	R1** [MΩ]	R2** [MΩ]	R7** [MΩ]
1	1	713	451	560	376	256	269	0,350	0,350	0,480
	2	1345	811	678	602	463	315	2,300	1,650	1,110
2	3	1121	670	570	502	387	236	1,780	2,200	0,980
	4	1040	626	502	413	335	230	1,480	1,430	0,930
3	5	1180	724	632	276	317	204	1,080	1,230	0,630
	6	1044	665	628	273	361	218	1,180	1,340	0,810
4	7	595	329	494	97	104	163	0,274	0,437	0,574
	8	741	412	617	122	130	178	0,370	0,405	0,600
5	10	190	183	185	203	108	184	0,240	0,350	0,410
	11	88	52	122	100	72	130	0,210	0,180	0,210
6	12	320	160	363	405	288	538	0,970	1,350	2,900
	13	497	302	327	551	410	353	3,200	3,320	-
7	14	370	215	216	305	376	185	1,400	1,560	0,640
	15	368	214	215	285	400	181	1,350	1,570	0,610
8	16	477	280	304	461	483	370	4,550	3,720	4,370
	17	505	302	328	526	590	351	5,250	3,110	3,820
9	9	269	150	247	119	123	157	0,280	0,340	0,550
	18	546	314	327	435	417	263	2,270	2,170	1,300

3.2.1 Podmínky provedení experimentů

Pro provedené experimenty byly vybrány následující parametry optimalizace:

- Teplotní koeficient odporu
- Kapacita struktury

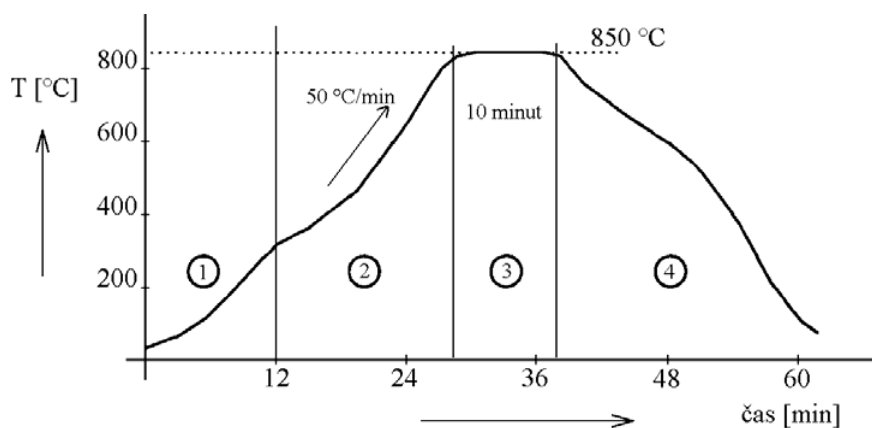
Dále byly vybrány faktory, které ovlivňují hodnoty odporů R1, R2 a R7:

X1 – teplota výpalu odporových vrstev,

X2 – teplota výpalu dielektrické vrstvy,

X3 – doba výpalu (žárové pásmo).

Na obr. 26 můžeme vidět typický průběh vypalovacího procesu pro tlusté vrstvy. V našem případě byl v experimentech čas výpalu (faktor X3, který je na obr. 26 představován oblastí 3) 7; 10 a 13 min.



Obr. 26: Teplotní profil pro výpal tlustovrstvých RC-PRP ve čtyřzónové průběžné peci:
1 – předehřev, 2 – pozvolný nárůst teploty, 3 – žárové pásmo, 4 – pozvolné chlazení

V tab. 4 můžeme vidět, jakých hodnot nabývají jednotlivé faktory. “–” znamená spodní úroveň, 0 je základní úroveň a “+” je vrchní úroveň.

Tab. 4: Úrovně faktorů a intervalů změn

Faktory	Úroveň			Interval změny	Jednotky
	-	0	+		
X1	810	850	890	80	°C
X2	810	850	890	80	°C
X3	7,5	10	12,5	5	min

V tab. 5 můžeme vidět matici plánování, podle které byl proveden experiment.

Tab. 5: Matice plánování experimentů

Číslo experimentu	X1	X2	X3
1	-	-	-
2	-	-	+
3	-	+	-
4	-	+	+
5	+	-	-
6	+	-	+
7	+	+	-
8	+	+	+

Tab. 6: Naměřený odpor prvků spodní odporové vrstvy

Číslo experimentu	Číslo substrátu	Faktory						Po vypálení odporové vrstvy			Po vypálení dielektrické vrstvy			Po vypálení všech vrstev		
		X1		X2		X3		R1 [kΩ]	R2 [kΩ]	R7 [kΩ]	R1* [kΩ]	R2* [kΩ]	R7* [kΩ]	R1** [MΩ]	R2** [MΩ]	R7** [MΩ]
		Kód	T [°C]	Kód	T [°C]	Kód	t [min]									
1	1	-	810	-	810	-	7	713	451	560	376	256	269	0,350	0,350	0,480
	2							1345	811	678	602	463	315	2,300	1,650	1,110
2	3	-	810	-	810	+	13	1121	670	570	502	387	236	1,780	2,200	0,980
	4							1040	626	502	413	335	230	1,480	1,430	0,930
3	5	-	810	+	890	-	7	1180	724	632	276	317	204	1,080	1,230	0,630
	6							1044	665	628	273	361	218	1,180	1,340	0,810
4	7	-	810	+	890	+	13	595	329	494	97	104	163	0,274	0,437	0,574
	8							741	412	617	122	130	178	0,370	0,405	0,600
5	10	+	890	-	810	-	7	190	183	185	203	108	184	0,240	0,350	0,410
	11							88	52	122	100	72	130	0,210	0,180	0,210
6	12	+	890	-	810	+	13	320	160	363	405	288	538	0,970	1,350	2,900
	13							497	302	327	551	410	353	3,200	3,320	-
7	14	+	890	+	890	-	7	370	215	216	305	376	185	1,400	1,560	0,640
	15							368	214	215	285	400	181	1,350	1,570	0,610
8	16	+	890	+	890	+	13	477	280	304	461	483	370	4,550	3,720	4,370
	17							505	302	328	526	590	351	5,250	3,110	3,820
9	9	0	850	0	850	0	10	269	150	247	119	123	157	0,280	0,340	0,550
	18							546	314	327	435	417	263	2,270	2,170	1,300

Pozn.: R1*, R2*, R7* - doba vypalování 10 min při zadaných teplotách.

V tab. 6 jsou shrnuty všechny podmínky, charakteristiky a naměřené hodnoty daného experimentu.

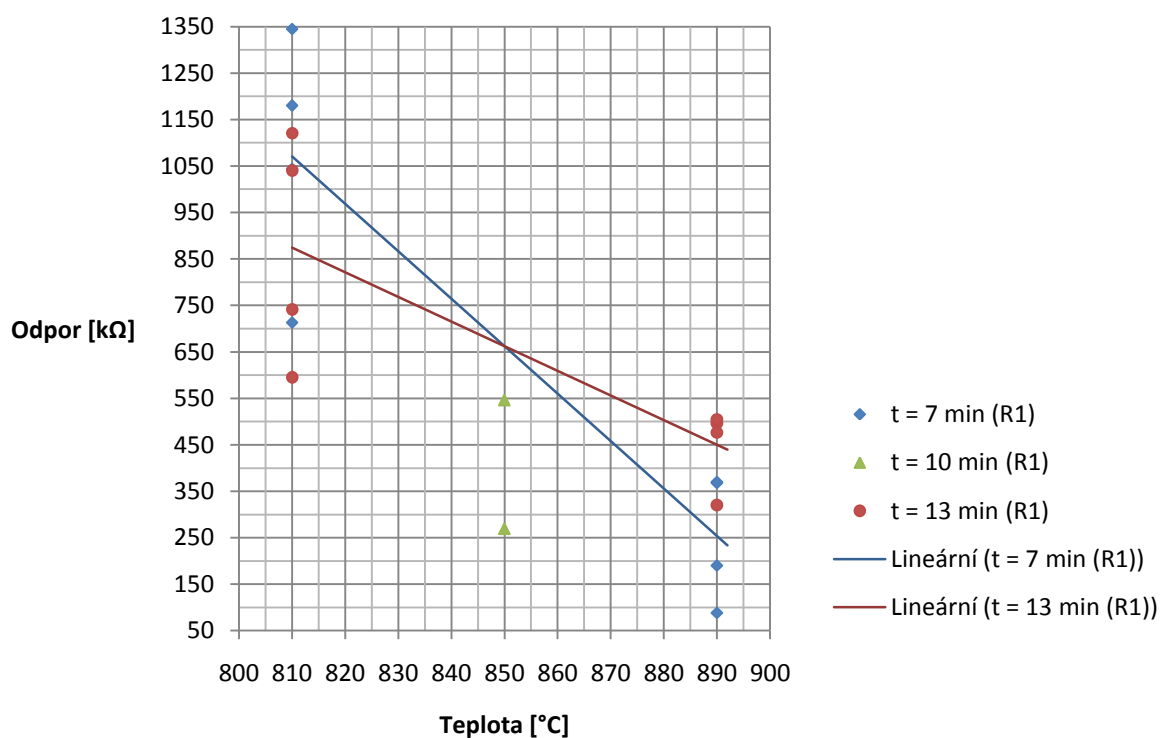
3.2.2 Analýza naměřených hodnot pomocí grafů

Na prvních třech grafech (obr. 27, 28, 29) můžeme vidět závislost odporu prvků na teplotě výpalu po vypálení spodní odporové vrstvy.

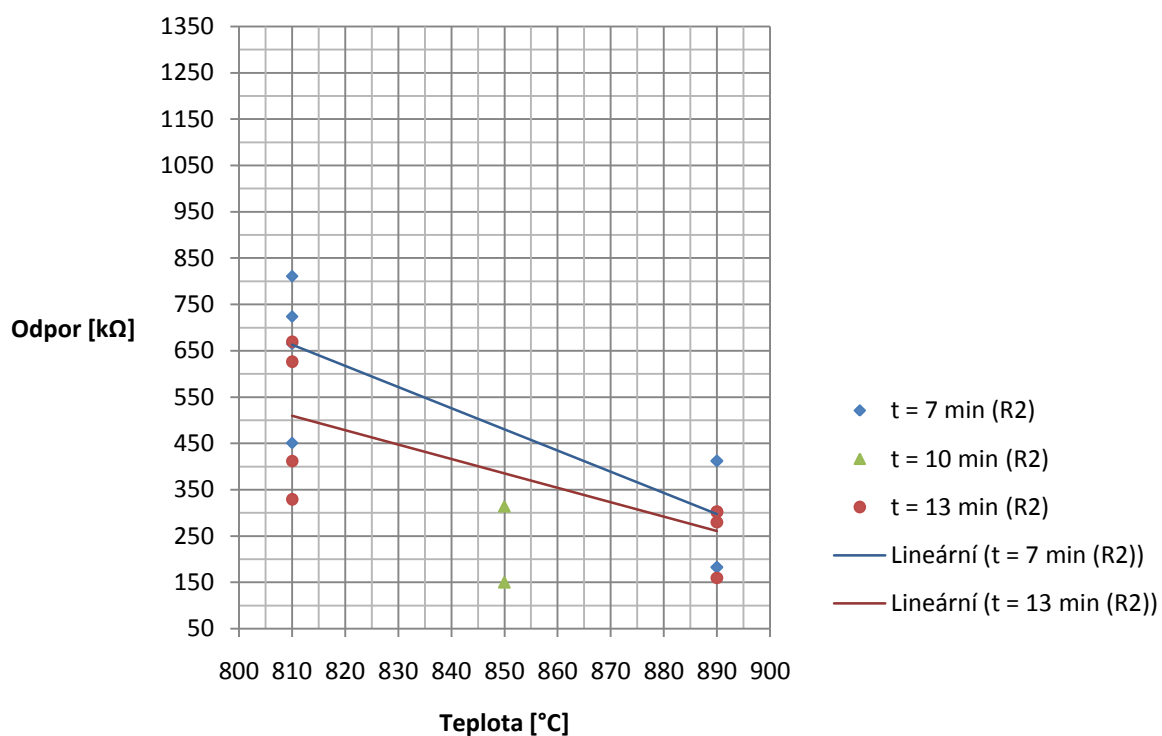
Z níže uvedených grafů (grafy závislostí po vypálení spodní odporové vrstvy) lze vyvodit následující závěry:

- Čím vyšší je teplota výpalu, tím nižší je průměrná hodnota odporu.
- Čím je delší doba vypalování vrstev, tím je závislost odporu na teplotě výpalu menší.

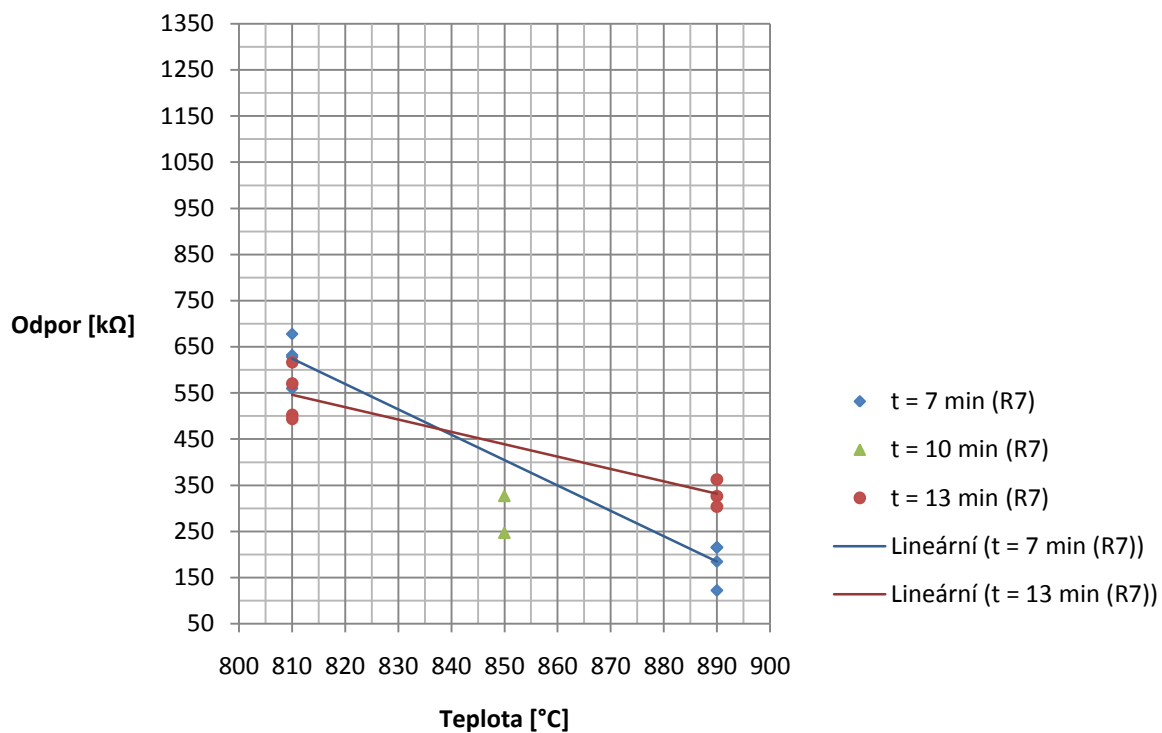
Pozn.: protože bylo měření provedeno maximálně při dvou teplotách výpalu pro jednu dobu výpalu, nemůžeme určit průběh závislosti mezi odporem a teplotou.



Obr. 27: Závislost odporu R1 na teplotě výpalu



Obr. 28: Závislost odporu R2 na teplotě výpalu



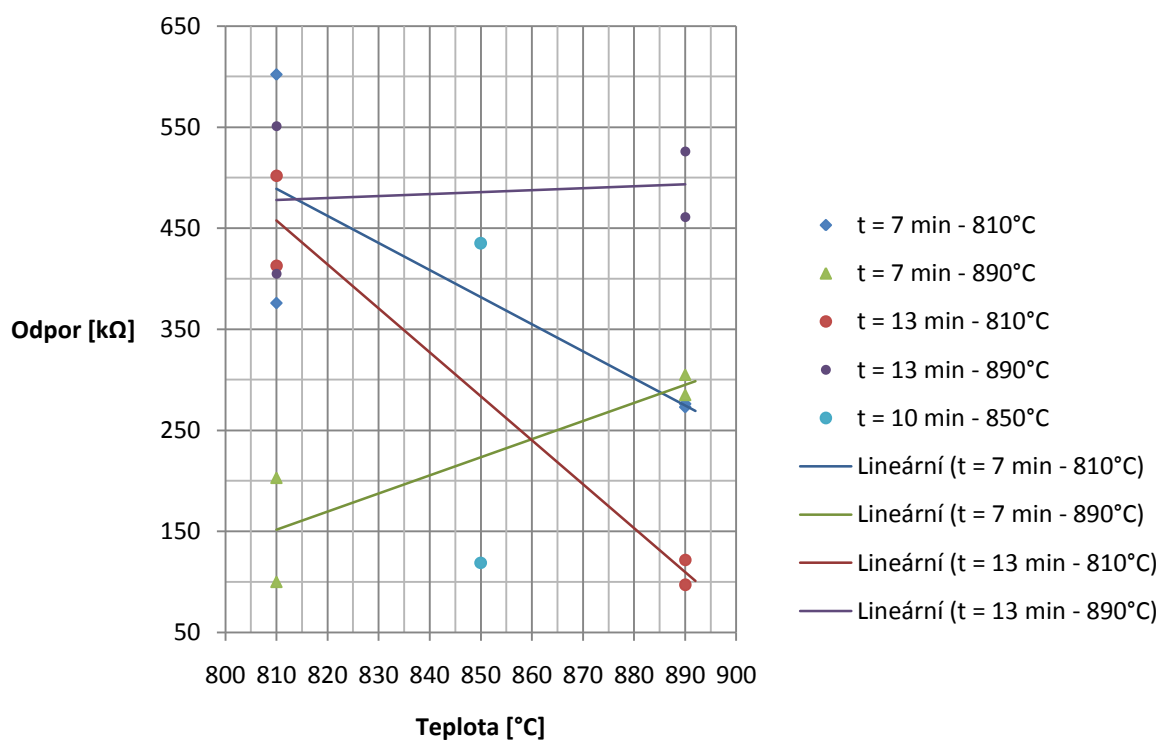
Obr. 29: Závislost odporu R7 na teplotě výpalu

Na níže uvedených grafech (obr. 30, 31, 32) můžeme vidět závislost prvků spodní odporové vrstvy po vypálení dielektrické vrstvy.

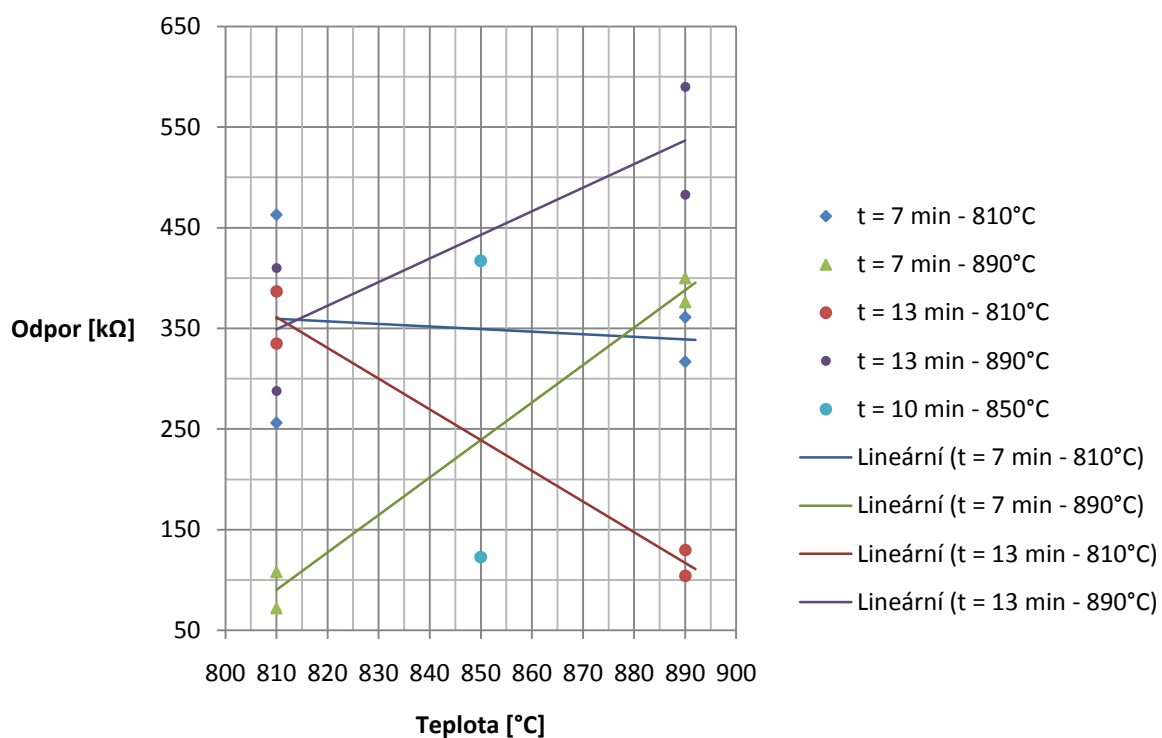
Pozn.: např. legenda “ $t = 7,5 \text{ min} - 810^\circ\text{C}$ “ ve tří níže uvedených grafech znamená, že dielektrická vrstva substrátu byla vypalována po dobu 10 min po tom, co byla odporová vrstva vypálena při $T = 810^\circ\text{C}$ a $t = 7,5 \text{ min}$.

Z níže uvedených grafů (grafy závislosti po výpalu dielektrické vrstvy) lze udělat následující závěry:

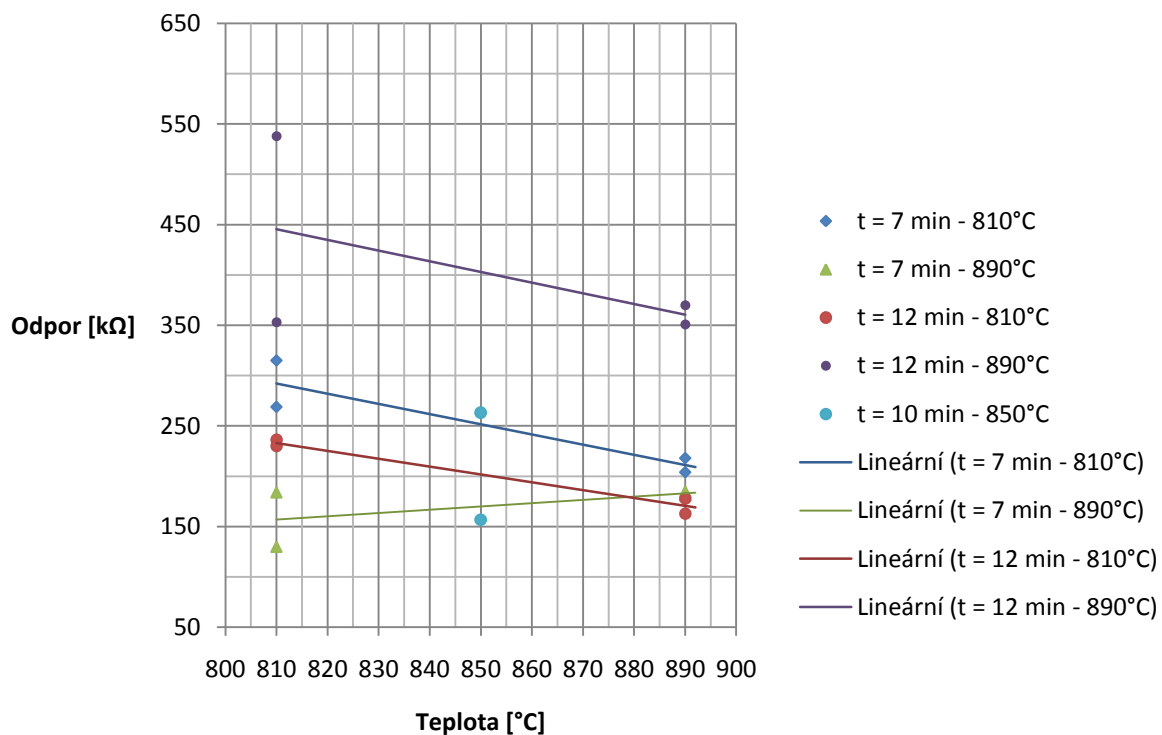
- Při výpalu dielektrické vrstvy při $T > 810^\circ\text{C}$ hodnota odporu bude záviset na podmínkách výpalu odporové vrstvy. Všeobecně – teplota výpalu následující vrstvy musí být menší, než teplota výpalu vrstvy předchozí.



Obr. 30: Závislost odporu $R1^*$ na teplotě výpalu



Obr. 31: Závislost odporu R2* na teplotě výpalu



Obr. 32: Závislost odporu R7* na teplotě výpalu

3.2.3 Faktorová analýza hodnot

Zpracování výsledků je provedeno způsobem opakovaného použití následující posloupnosti:

1. Vyhodnocení rozptylu od středního aritmetického průměru;
2. Ověření homogeneity rozptylu s pomocí kritéria Kochrena;
3. Jestli rozptyl vyšel homogenní, provede se výpočet disperze reprodukovatelnosti;
4. Určení koeficientů regrese;
5. Ověření adekvátnosti modelu;
6. Ověření významnosti koeficientů regrese.

Pozn.: budeme dělat výpočty z rozptylu od střední hodnoty.

Rozptyl od středního aritmetického průměru se vypočítá [2]:

$$s_i^{-2} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_{iq} - \bar{y}_i)^2}{N \cdot (n-1)}. \quad (1)$$

Hodnoty rozptylu pro každý pokus jsou uvedeny v tab. 7.

Ověření homogeneity rozptylu s pomocí kritéria Kochrena [2]:

$$G = \frac{s_i^{-2} \max}{\sum_{i=1}^N s_i^{-2}}. \quad (2)$$

Kritérium Kochrena je uvedeno v tab. 7.

Tabulkové hodnoty kritéria pro 9 různých pokusů a počtu stupňů volnosti $n - 1 = 1$ je rovno 0,6385 (úroveň významnosti 0,05). Experimentální veličina G-kritéria nepřesahuje tabulkovou hodnotu, proto se hypotéza o homogeneity rozptylu přijímá.

Rozptyl reprodukovatelnosti se rovná [2]:

$$s^2(\bar{y}) = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^N s_i^{-2}. \quad (3)$$

$$R1^{**}: s^2(\bar{y}) = \frac{1}{9} \cdot 3,335 = 0,371,$$

$$R2^{**}: s^2(\bar{y}) = \frac{1}{9} \cdot 2,482 = 0,276,$$

$$R7^{**}: s^2(\bar{y}) = \frac{1}{9} \cdot 0,335 = 0,037.$$

Počet stupňů volnosti tohoto rozptylu je $N \cdot (n - 1) = 9$.

Tab. 7: Rozptyl střední hodnoty naměřených hodnot po výpalu všech vrstev

Číslo experimentu	Číslo substrátu	Naměřené hodnoty			Střední hodnota			Rozptyl střední hodnoty		
		R1** [MΩ]	R2** [MΩ]	R7** [MΩ]	R1** [MΩ]	R2** [MΩ]	R7** [MΩ]	R1** [MΩ]	R2** [MΩ]	R7** [MΩ]
1	1	0,350	0,350	0,480	1,33	1,00	0,80	0,9506	0,4225	0,0992
	2	2,300	1,650	1,110						
2	3	1,780	2,200	0,980	1,63	1,82	0,96	0,0225	0,1482	0,0006
	4	1,480	1,430	0,930						
3	5	1,080	1,230	0,630	1,13	1,29	0,72	0,0025	0,0030	0,0081
	6	1,180	1,340	0,810						
4	7	0,274	0,437	0,574	0,32	0,42	0,59	0,0023	0,0003	0,0002
	8	0,370	0,405	0,600						
5	10	0,240	0,350	0,410	0,23	0,27	0,31	0,0002	0,0072	0,0100
	11	0,210	0,180	0,210						
6	12	0,970	1,350	2,900	2,09	2,34	2,90	1,2432	0,9702	-
	13	3,200	3,320	-						
7	14	1,400	1,560	0,640	1,38	1,57	0,63	0,0006	0,0000	0,0002
	15	1,350	1,570	0,610						
8	16	4,550	3,720	4,370	4,90	3,42	4,10	0,1225	0,0930	0,0756
	17	5,250	3,110	3,820						
9	9	0,280	0,340	0,550	1,28	1,26	0,93	0,9900	0,8372	0,1406
	18	2,270	2,170	1,300						
							Σ	3,335	2,482	0,335
							G	0,249	0,379	0,029

Zhodnotíme koeficienty regrese a jejich rozptyl, koeficienty regrese získáme z tab. 8 podle rovnice [2]:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i \cdot x_{ji}}{N}. \quad (4)$$

$$b_{uj} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i \cdot x_{ui} \cdot x_{ji}}{N}. \quad (5)$$

Hodnoty koeficientů regrese jsou uvedeny v tab. 9.

Tab. 8: Výpočtová matice se středními výsledky experimentu

Číslo experimentu	X0	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X1X2X3	Střední hodnota odporu		
									R1** [MΩ]	R2** [MΩ]	R7** [MΩ]
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1,325	1,000	0,795
2	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1,630	1,815	0,955
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1,130	1,285	0,720
4	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0,322	0,421	0,587
5	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,225	0,265	0,310
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	2,085	2,335	2,900
7	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1,375	1,565	0,625
8	1	1	1	1	1	1	1	1	4,900	3,415	4,095
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1,275	1,255	0,925

Hodnoty koeficientů regrese jsou uvedeny v tab. 9.

Tab. 9: Hodnota koeficientů regrese

Odpor	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₃	b ₁₂₃
R1**	1,62	0,52	0,31	0,61	0,68	0,74	0,07	0,35
R2**	1,51	0,38	0,16	0,48	0,44	0,50	-0,24	0,18
R7**	1,37	0,61	0,13	0,76	0,24	0,75	0,07	0,15

Z tab. 9 obdržíme následující rovnice regrese:

$$R1^{**} = 1,62 \cdot X_0 + 0,52 \cdot X_1 + 0,31 \cdot X_2 + 0,61 \cdot X_3 + 0,68 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,74 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,07 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,35 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$$

$$R2^{**} = 1,51 \cdot X_0 + 0,38 \cdot X_1 + 0,16 \cdot X_2 + 0,48 \cdot X_3 + 0,44 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,50 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,24 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,18 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$$

$$R7^{**} = 1,37 \cdot X_0 + 0,61 \cdot X_1 + 0,13 \cdot X_2 + 0,76 \cdot X_3 + 0,24 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,75 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,07 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,15 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$$

Rozptyl koeficientů regrese [2]:

$$s^2(b_j) = \frac{s^2(\bar{y})}{N}. \quad (6)$$

$$R1^{**}: s^2(b) = \frac{0,371}{9} = 0,041,$$

$$R2^{**}: s^2(b) = \frac{0,276}{9} = 0,031$$

$$R7^{**}: s^2(b) = \frac{0,037}{9} = 0,004$$

Výsledky výpočtu zbytkového součtu kvadrátů při kontrole adekvátnosti lineárním modelem jsou uvedeny v tab. 10, 11, 12.

V této tabulce $\langle y \rangle$ – průměr ze dvou paralelních hodnot experimentálních veličin parametru optimalizace, $\hat{y}$ – výpočet z rovnice regrese.

Tab. 10: Zbytkový součet kvadrátů pro R1**

R1**				
Číslo pokusu	$\langle y \rangle$	$\hat{y}$	$\Delta y = \hat{y} - \langle y \rangle$	$(\Delta y)^2$
1	1,33	1,32	-0,01	0,0001
2	1,63	1,62	-0,01	0,0001
3	1,13	1,14	0,01	0,0001
4	0,32	0,32	0,00	0,0000
5	0,23	0,22	-0,01	0,0001
6	2,09	2,08	-0,01	0,0001
7	1,38	1,36	-0,02	0,0004
8	4,90	4,90	0,00	0,0000
Σ				0,0009

Tab. 11: Zbytkový součet kvadrátů pro R2**

R2**				
Číslo pokusu	$\langle y \rangle$	$\hat{y}$	$\Delta y = \hat{y} - \langle y \rangle$	$(\Delta y)^2$
1	1,00	1,01	0,01	0,0001
2	1,82	1,81	-0,01	0,0001
3	1,29	1,29	0,00	0,0000
4	0,42	0,41	-0,01	0,0001
5	0,27	0,25	-0,02	0,0004
6	2,34	2,33	-0,01	0,0001
7	1,57	1,57	0,00	0,0000
8	3,42	3,41	-0,01	0,0001
Σ				0,0009

Tab. 11: Zbytkový součet kvadrátů pro R7**

R7**				
Číslo pokusu	$\langle y \rangle$	$\hat{y}$	$\Delta y = \hat{y} - \langle y \rangle$	$(\Delta y)^2$
1	0,80	0,78	-0,02	0,0004
2	0,96	0,96	0,00	0,0000
3	0,72	0,72	0,00	0,0000
4	0,59	0,58	-0,01	0,0001
5	0,31	0,32	0,01	0,0001
6	2,90	2,90	0,00	0,0000
7	0,63	0,62	-0,01	0,0001
8	4,10	4,08	-0,02	0,0004
Σ				0,0011

Rozptyl adekvátnosti [2]:

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{f}. \quad (7)$$

$$R1^{**}: s_{ad}^2 = \frac{0,0009}{5} = 0,00018,$$

$$R2^{**}: s_{ad}^2 = \frac{0,0009}{5} = 0,00018,$$

$$R7^{**}: s_{ad}^2 = \frac{0,00028}{5} = 0,000056.$$

Počet stupňů volnosti rozptylu adekvátnosti $f = N - (k + 1) = 9 - (3 + 1) = 5$. Kritérium pro kontrolu hypotézy adekvátnosti modelu [2]:

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s^2(\hat{y})}. \quad (8)$$

$$R1^{**}: F = \frac{0,00018}{0,371} = 0,0005$$

$$R2^{**}: F = \frac{0,00018}{0,276} = 0,0006$$

$$R7^{**}: F = \frac{0,000056}{0,037} = 0,0015$$

Tabulkové hodnoty kritéria Fišera pro stupeň volnosti čitatele 5 a jmenovatele 9 se rovná 3,5. První experimentální veličina F-kritéria nepřevyšuje tabulkové hodnoty. Proto nemáme důvod popírat hypotézu o adekvátnosti modelu.

Zbylo zhodnotit významnost koeficientů regrese. Veličina t-kritéria pro úroveň významnosti 0,05 a stupňů volnosti, se kterými definují S, je rovna 2,262. Spolehlivý interval [2]:

$$\Delta b_j = \pm t \cdot s(b_j). \quad (9)$$

$$R1^{**}: \Delta b_j = 2,262 \cdot 0,041 = 0,093,$$

$$R2^{**}: \Delta b_j = 2,262 \cdot 0,031 = 0,070,$$

$$R7^{**}: \Delta b_j = 2,262 \cdot 0,004 = 0,009.$$

Zjistili jsme, že pro R1** a pro R7** je efekt vazby prvního řádu nepatrný.

Absolutní hodnoty zbývajících koeficientů regrese leží ve více spolehlivých intervalech, proto se jeví významnými.

Lineární koeficienty regrese přibližně stejně ovlivňují parametr optimalizace. Charakter jejich vlivu je také stejný; se zvětšením hodnot faktoru roste a veličina velikosti optimalizace. Když uvážíme, že pro R1** a R7** je koeficient vazby kladný, tak lze předpokládat, že zvýšení teploty vypalování dielektrických a odporových vrstev a zvýšení doby vypalování vrstev povede k růstu hodnot odporu.

4 Závěr

Získali jsme matematické modely pro odpor spodní odporové vrstvy. Analýzou těchto modelů jsme došli k těmto závěrům.

Na základě získaných modelů jsme schopni měnit odpor spodní odporové vrstvy.

Kvůli tomu, aby si spodní odporová vrstva zachovala svoje vlastnosti, je nutno dodržet podmínku, aby teplota výpalu následujících vrstev byla nižší, než teplota výpalu vrstev předchozích.

Při plánování výroby, kdy budou parametry vypalování následných vrstev ovlivňovat vlastnosti vrstvy podle požadovaného koeficientu teplotního odporu, budeme moci lépe vybrat nominální hodnotu odporových past (spodních i horních), abychom dostali požadovaný vztah jejich specifického odporu.

5 Seznam použité literatury

- [1] SZENDIUCH, I. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. 379 stran. ISBN 80-214-3292-6.
- [2] АДЛЕР, Ю., МАРКОВА, Е., ГРАНОВСКИЙ, Ю. *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. Москва: Наука, 1976. 279 stran.
- [3] МАРКОВА, Е., ЛИСЕНКОВ, А. *Планирование эксперимента в условиях неоднородностей*. Москва: Наука, 1973
- [4] ЮРМОЛАЕВ, Ю., ПОНОМАРЕВ, М., КРЮКОВ, Ю. *Конструкции и технология микросхем*. Москва: Советское радио, 1980. 256 stran.
- [5] ЯНОШИН, Л. *Теория и практика обработка результатов измерений*. Москва: Мир, 1968

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Autor: Ksenia Ostanina

Název závěrečné práce: Měření vlastností tlustovrstvých RC prvků
s rozloženými parametry

Název závěrečné práce ENG: Measurements of thick-film
RC elements characteristics with distributed parameters

Anotace závěrečné práce:

Předkládaná práce se zabývá analýzou vlastností tlustovrstvých RC prvků s rozloženými parametry. Teoretická část řeší návrh RC prvků, na nějž navazuje jejich realizace. Součástí práce je měření odporů a zjištění závislosti rozptylu daných odporů s různým počtem vrstev struktur v závislosti na jejich vypalovacích režimech.

Tato bakalářská práce souvisí s bakalářskou prací „Vlastnosti 3D prvků realizovaných tlustovrstvou technologií“.

Anotace závěrečné práce ENG:

The following work is focused on properties analysis of thick film RC elements with distributed parameters. The theoretical part offers projecting of RC elements, with their next realization. There are the following work parts: the resistance measurement and determination of the given resistances dependence scattering with different film number of the structures depending on their burning conditions.

This bachelor's thesis is closed to the bachelor's work "Properties of Thick Film Multilayer Component".

Klíčová slova:

RC struktura, RC prvky, rozložené parametry, tlustovrstvé prvky, vodivá vrstva, dielektrická vrstva, odporová vrstva.

Klíčová slova ENG:

RC structure, RC elements, distributed parameters, thicklayer elements, conductive level, dielectric level, resistance level.

Typ závěrečné práce: bakalářská práce

Datový formát elektronické verze: formát pdf

Jazyk závěrečné práce: český
Přidělovaný titul: Bc.
Vedoucí závěrečné práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Škola: Vysoké učení technické v Brně
Fakulta: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav: Ústav mikroelektroniky
Studijní program: Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika
Studijní obor: Mikroelektronika