

Šumové charakteristiky pasivních elektronických komponent

Noise characteristics of passive electronic components

Bc. Lubomír Lefler

Diplomová práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lubomír LEFLER**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Téma práce: **Šumové charakteristiky pasivních elektronických komponent.**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte literární rešerši zadané problematiky.
2. Seznamte se s přístrojovým parkem na FAI UTB určeným pro měření šumů.
3. Navrhněte metodiku měření požadovaných závislostí a vybraných typů šumů.
4. Sestavte laboratorní pracoviště a proveďte navrhnutá měření.
5. Analyzujte naměřená data a navrhněte postup dalších prací.
6. Pokuste se o nalezení souvislosti naměřených veličin s požadavky průmyslové diagnostiky součástek.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. C.A. Harper, *Passive Electronic Components Handbook*, McGraw-Hill, 2nd Edition, 1997, 142 s.
2. C.A. Lee and G.C. Dalman, *Microwave Devices, Circuits and their Interaction*, Wiley-Interscience Publication, New York, 1994, 33 s.
3. N. Coda and J. Selvaggi, *Design Considerations for High Frequency Chip Capacitors*, IEEE Trans. On Parts, Hybrids and Packaging, Vol.PHP-12, No.3, , 1976, s. 206-212
4. A.J. Baden Fuller, *Microwaves*, Pergamon Press, 2nd Edition, UK, , 1988. 311 s.
5. *Agilent High-Frequency Structure Simulator 5.6 -- User's Guide*, Agilent Technologies - 85180-90194, , September 2000. s. A1-A3
6. *25 th Anniversary Edition: Scientific and Engineering Instruments*. U.S.A.: Stanford Research Systems, Inc., 2005.212 s.

Vedoucí diplomové práce:

doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

19. února 2010

Termín odevzdání diplomové práce:

7. června 2010

Ve Zlíně dne 19. února 2010

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou měření tepelných a $1/f$ šumů prováděných na elektrotechnických pasivních komponentách. V teoretické části práce se autor zaměřil na literární rešerši na téma šumů a náhodných fluktuací, které generují elektrotechnické pasivní komponenty. V praktické části je navržena metodika měření šumů na pasivních komponentách. Měření tepelného a $1/f$ šumu je provedeno a naměřené hodnoty jsou prezentovány ve formě grafu a diskutovány. Poslední část práce se zabývá možnostmi aplikace měření šumů v oblasti průmyslu prodávajícího elektrotechnické pasivní komponenty

Klíčová slova:

Rezistor, kondenzátor, šum, $1/f$ šum, tepelný šum, měření, SR780, fluktuace, ESD, PSD, SR570,

ABSTRACT

Goal of this diploma work is to deal with theme of measurement of thermal and $1/f$ noises performed on passive electrotechnic components. Theoretical part is aimed onto background research of noises nad random fluctuations which are beány generated by passive elektrotechnic components. A method of measurement of noises on passive components has been suggested in practical part of this diploma thesis. Measurements has been performed and measured data are presented in form of graphs and are beány discussed. The last part is aimed on to possible applications of noise measurements within electrotechnic passive components industry.

Keywords:

Resistor, capacitor, noise, $1/f$ noise, thermal noise, measurement, SR780, fluktuations, ESD, PSD, SR570

Motto:

Štěstí si občas sedne na hlupáky, ale bůh přeje připraveným.

Ivan Hlas

Kolik třešní, tolik višní.

Ladislav Smoljak

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 FYZIKÁLNĚ MATEMATICKÝ POHLED NA ŠUM	13
1.1 DEFINICE ŠUMU	13
1.2 TYPY ŠUMŮ	13
1.2.1 Tepelný šum	13
1.2.1.1 Tepelný šum na rezistoru	14
1.2.1.2 Tepelný šum na kondenzátoru	16
1.2.2 Výstřelový šum.....	17
1.2.3 Gausův šum.....	18
1.3 MATEMATICKÝ POPIS ŠUMU	18
1.4 SPEKTRÁLNÍ ŠUMOVÁ HUSTOTA	19
1.4.1 Matematický aparát pro zjištění spektrální hustoty.....	20
1.4.1.1 Energy spectral density – ESD.....	20
1.4.1.2 Power spectral density – PSD	21
1.5 ŠUM V OBVODU	22
1.5.1.1 Celkový výstupní šum na měřené komponentě	23
2 PASIVNÍ ELEKTROTECHNICKÉ KOMPONENTY	24
2.1 DEFINICE PASIVNÍ KOMPONENTY	24
2.2 ROZDĚLENÍ PASIVNÍCH KOMPONENT DLE FUNKCE	24
2.2.1 Rezistory.....	24
2.2.1.1 Standardizace rezistorů a jejich výrobního procesu.....	25
2.2.1.2 Ideální versus reálný rezistor	25
2.2.1.3 Parametry rezistoru v závislosti na jeho mechanické konstrukci	27
2.2.2 Kondenzátory	28
2.2.2.1 Použití kondenzátoru	28
2.2.2.2 Standardizace kondenzátorů a jejich výrobního procesu.....	29
2.2.2.3 Ideální versus reálný kondenzátor.....	29
2.2.2.4 Náhradní schéma kondenzátoru.....	30
2.2.2.5 Parametry kondenzátoru v závislosti na jeho mechanické konstrukci.....	31
2.3 ROZDĚLENÍ PASIVNÍCH KOMPONENT DLE DALŠÍCH PARAMETRŮ	34
2.3.1 Single pack řešení versus array řešení.....	34
2.3.2 Rozdělení dle tvaru těla, respektive montáže.....	35
3 TECHNICKÉ VYBAVENÍ PRO MĚŘENÍ ŠUMŮ	36
3.1 MĚŘICÍ PŘÍSTROJ SR780	36
3.1.1 Čelní panel SR780.....	36
3.1.2 Příklad funkce SR780	38
3.1.3 Fázově citlivá detekce - PSD	39
3.1.4 Měření šumu pomocí SR780.....	40

3.2	PŘEDZESILOVAČ SR570	40
3.2.1	Čelní panel SR570.....	40
4	METODIKA MĚŘENÍ ŠUMŮ	43
4.1	NASTAVENÍ MĚŘÍCÍHO SYSTÉMU	43
4.1.1	Nastavení měřené komponenty	43
4.1.2	Nastavení předzesilovače	43
4.1.3	Nastavení frekvenčního analyzáru	44
4.1.4	Nastavení HP Vee	44
4.2	MĚŘENÍ TEPELNÉHO ŠUMU	44
4.2.1	Podmínky měření tepelných šumů	45
II	PRAKTICKÁ ČÁST	46
5	SESTAVENÍ LABORATORNÍHO PRACOVÍŠTĚ, PROVEDENÍ NAVRHNUTÝCH MĚŘENÍ A ANALÝZA NAMĚŘENÝCH HODNOT	47
5.1	TVORBA A VLASTNOSTI POUZDRA (ŠASÍ) MĚŘENÉHO OBVODU.....	48
5.1.1	Výrobní proces a mechanické vlastnosti pouzdra	49
5.1.2	Stínění měřící cely.....	49
5.1.3	Zdroje rušivých signálů	49
5.1.4	Zemnění měřící soustavy.....	50
5.2	MĚŘENÉ VZORKY	50
5.3	MLCC KERAMICKÝ KONDENZÁTOR	51
5.3.1	Naměřené hodnoty tepelného šumu na MLCC kondenzátoru	52
5.3.2	Naměřené hodnoty 1/f šumu na MLCC kondenzátoru.....	54
5.4	ELEKTROLYTICKÝ KONDENZÁTOR.....	55
5.4.1	Naměřené hodnoty tepelného šumu na elektrolytickém kondenzátoru.....	56
5.4.2	Naměřené hodnoty 1/f šumu na elektrolytickém kondenzátoru.....	58
5.5	FILMOVÝ (FÓLIOVÝ) KONDENZÁTOR	60
5.5.1	Naměřené hodnoty tepelného šumu na filmovém (fóliovém) kondenzátoru	60
5.5.2	Naměřené hodnoty 1/f šumu na filmovém (fóliovém) kondenzátoru	62
5.6	UHLÍKOVÝ REZISTOR	64
5.6.1	Naměřené hodnoty tepelného šumu na uhlíkovém rezistoru	64
5.6.2	Naměřené hodnoty 1/f šumu na uhlíkovém rezistoru	66
5.7	DRÁTOVÝ REZISTOR	67
5.7.1	Naměřené hodnoty tepelného šumu na drátovém rezistoru	67
5.7.2	Naměřené hodnoty 1/f šumu na drátovém rezistoru	69
5.8	FILMOVÝ (FÓLIOVÝ) REZISTOR	71
5.8.1	Naměřené hodnoty 1/f šumu na filmovém (fóliovém) rezistoru.....	71
6	APLIKACE ZJIŠTĚNÝCH HODNOT V PRŮMYSLU VÝROBY ELEKTROTECHNICKÝCH KOMPONENT	73

6.1	VÝZNAM MĚŘENÍ ŠUMŮ PRO PRŮMYSL VÝROBY PASIVNÍCH KOMPONENT.....	73
6.2	FAKTORY A VÝCHODISKA VÝROBCŮ PŘI MĚŘENÍ ŠUMŮ.....	73
6.3	COUNTERFEIT PRODUKTY	74
ZÁVĚR		76
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....		78
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		79
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEKCHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.		
SEZNAM OBRÁZKŮ		81
SEZNAM TABULEK.....		82

ÚVOD

I v dnešní době má tematika měření šumů pro mnoho elektrotechniků a dalších lidí zabývajících se přidruženou tematikou nádech abstrakce a snad i nadbytečného teoretizování, které má pramalý vztah k aktuální praxi. Souvisí to zejména s obsáhlým matematickým aparátem, jehož zvládnutí je základní podmínkou k úplnému pochopení problematiky měření šumových charakteristik pasivních elektrotechnických komponent. Současný stav trhu s elektronickými komponentami ale ukazuje vzrůstající požadavky na definování chování elektrotechnických komponent z hlediska šumových a vysokofrekvenčních parametrů.

Velikost světového trhu s pasivními elektrickými komponentami má neustále rostoucí charakter, a to zejména z důvodů obrovského nárůstu komerčních (spotřebních) produktů zaplavujících v nikdy nekončících vlnách maloobchodní trh. Pro pasivní elektrotechnické komponenty jsou komerční aplikace z hlediska objemu výroby hlavní destinací a žádané vlastnosti těchto komponent pak ze zjevných důvodů kopírují požadavky trhu s komerčními výrobky. Dominantním požadavkem v poslední dekádě byla a bude i v období následujícím miniaturizace a přenositelnost, stejně jako slučitelnost jednotlivých aplikací v aplikaci synergicky funkčnější. Všechny z požadavků zvyšují důraz výrobců pasivních elektrotechnických komponent na zkoumání vysokofrekvenčních a šumových vlastností jednotlivých komponent. [7]

Moje práce má několik cílů. V první řadě bude třeba pochopit teoretický aparát, který se váže k šumům generovaným pasivními komponentami. Druhým cílem, který bude mít na výsledek diplomové práce zásadní vliv, bude navrhnout metodiku, dle které bude měření provedeno. Následovat bude provedení samotného měření a analýza naměřených hodnot. Nakonec bych se rád pokusil o nalezení souvislostí mezi naměřenými daty a průmyslovým použitím měření šumů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 FYZIKÁLNĚ MATEMATICKÝ POHLED NA ŠUM

1.1 Definice šumu

Šum je rušivý signál, který působí na informaci a tuto pozměňuje. Každý proces v přírodě je podmíněn existencí šumu, což je dáno atomární a subatomární konstitucí hmoty. Každý ze stavebních kamenů hmoty pak má kvantový charakter a v subatomárních vzdálenostech se pohybuje skoky, tedy kvantově. Základní signál je pak co do přesnosti a uhlazenosti definován právě rozsahem těchto skoků, jelikož konečná přesnost měření je dána fluktuacemi měřené veličiny a přesností měřícího zařízení. V obecné fyzice energetická úroveň šumu (zejména tepelného šumu) definuje fundamentální limity toho, co ještě lze s jistotou změřit a co již změřit nelze. Můžeme zde najít souvislost s obecně známými principy termodynamiky [13].

1.2 Typy šumů

Typ šumu, který se vyskytuje v obvodu je závislý na konkrétní konstituci každého obvodu. Existují různé procesy, které mohou být obviněny z generování šumů. V každém obvodu se generuje tepelný a výstřelový šum, výskyt další typů šumů je pak závislý na výrobní kvalitě a přítomnosti polovodičů v obvodě. Pro moji diplomovou práci jsou nejpodstatnější následující typy šumů [3]:

- Tepelný šum
- Výstřelový šum
- Gaussův šum
- Bílý šum
- $1/f$ šum

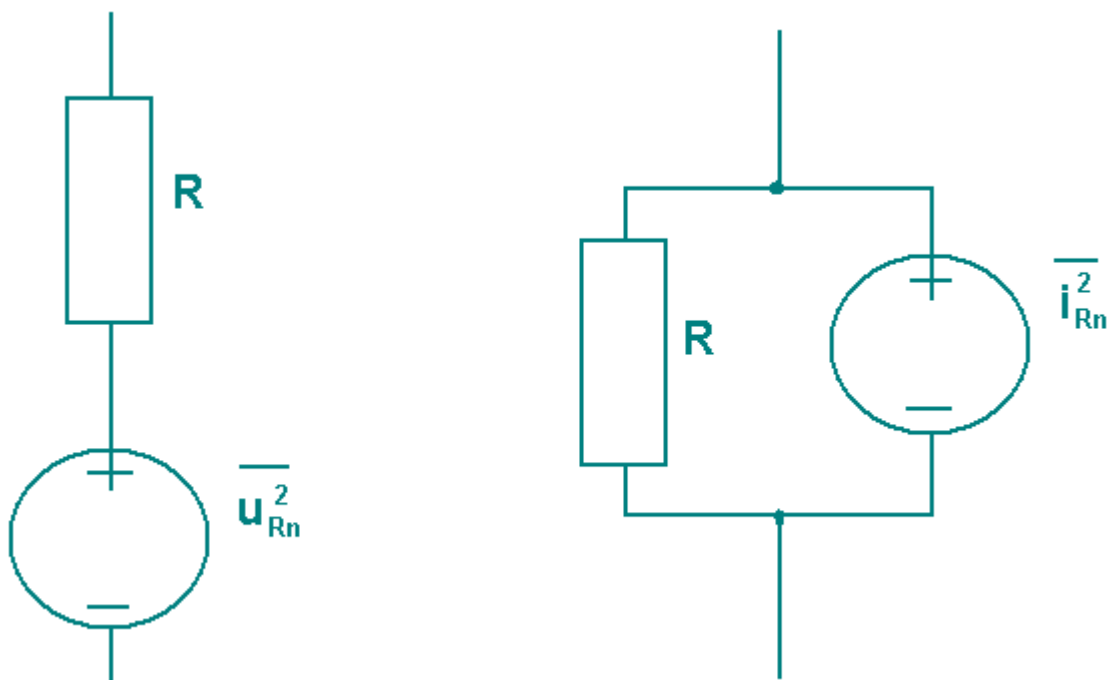
1.2.1 Tepelný šum

Tepelný šum je typ elektronického šumu, který vzniká tepelným pohybem nositelů proudu (zpravidla elektronů) uvnitř elektrického vodiče nezávisle na tom, zda je vodič vystaven elektrickému napětí nebo není. Tepelný šum je v průměru *bílý*, což znamená, že jeho spektrální hustota je konstantní v rámci celého frekvenčního pásma.

Tepelný šum je také označován jako Johnson-Nyquistův šum (respektive Johnsův šum a Nyquistův šum). John. B. Johnson tento šum v roce 1928 poprvé změřil a o výsledky se podělil s Henrym Nyquistem, který byl schopný výsledky Johnsova měření vysvětlit. Oba pánové toho času pracovali pro Bellovi laboratoře.

1.2.1.1 Tepelný šum na rezistoru

Rezistor bývá častým příkladem pro ukázkou popisu tepelného šumu. Napěťový šum je generován fluktuacemi elektronů ve vodivé části rezistoru a intenzita tohoto šumu narůstá s vzrůstající kinetickou energií, nosičů náboje – elektronů. Intenzita tepelného šumu má tedy rostoucí charakter se zvyšující se teplotou rezistor. Tepelný šum se projevuje od frekvence 1kHz a výše. Následující obrázek popisuje náhradní schéma rezistoru, který je subjektem tepelného šumu.



Obrázek 1: Rezistor jako zdroj šumu

Tepelný napěťový šum, který je generován reálným odporem má charakter, který je popisován Nyquistovým vztahem:

$$u_{noise} = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad 1.$$

U kterého platí, že:

- U_{noise} je střední kvadratické napětí šumu
- k je Boltzmanova konstanta ($1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$)
- T je teplota v kelvinech
- R je odpor
- Δf je šířka pásma, v němž je měřen šum

Aplikací Ohmova zákona, tedy vydělením pomocí R dostaneme tepelný proudový šum:

$$i_n = \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R}} \quad 2.$$

Spektrální hustota signálu na odporu R je rovna:

$$\Phi(f) \approx 2RkT \quad 3.$$

Uvedený vztah platí za předpokladu, že:

$$f \ll \frac{kT}{h} \quad 4.$$

kde h je Planckova konstanta ($6,626 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$)

Další z parametrů které nás zajímají při zjišťování šumových charakteristik rezistoru je šumový výkon. Tento se dá určit pomocí následující formulace [8]:

$$P = \int_{f_{sd}}^{f_{sh}} kTdf = fTB \quad 5.$$

V kteréžto rovnici jsou následující prvky:

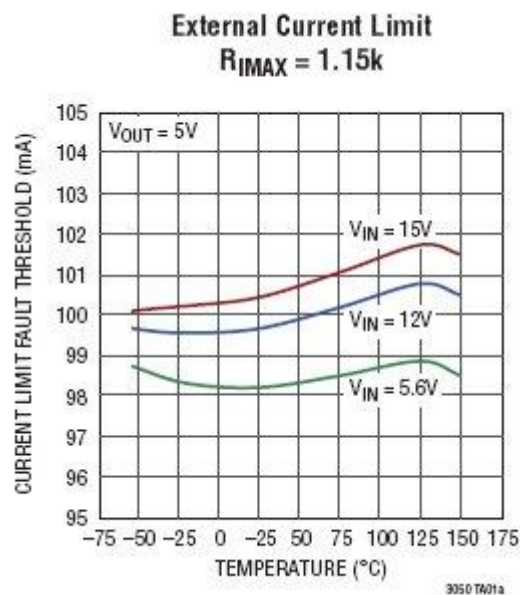
- k je Boltzmanova konstanta
- T je absolutní teplota v kelvinech
- f_{sd} je dolní mez šumového pásma kmitočtů
- f_{sh} je horní mez šumového pásma kmitočtů
- B šumová šířka pásma v Hz ($f_{sh} - f_{sd}$) při integraci

1.2.1.2 Tepelný šum na kondenzátoru

Tepelný šum na kondenzátoru je označován jako kTC šum. V případě, že uvažujeme šum na RC článku, můžeme hodnotu odporu R vypustit z rovnice a to proto, že strmost filtračního článku stejně jako šum rostou s se zvětšujícím se R . Za předpokladu, že R vynecháme z výpočtu je tedy tepelný napěťový šum [5]:

$$v_n = \sqrt{k_B T / C} \quad 6.$$

Tepelný šum je zodpovědný za 100% kTC šumu nehledě na to, zda je distribuován k odporové nebo kapacitní složce RC článku. Následující obrázek ukazuje hodnoty tepelného proudového šumu na kondenzátoru.

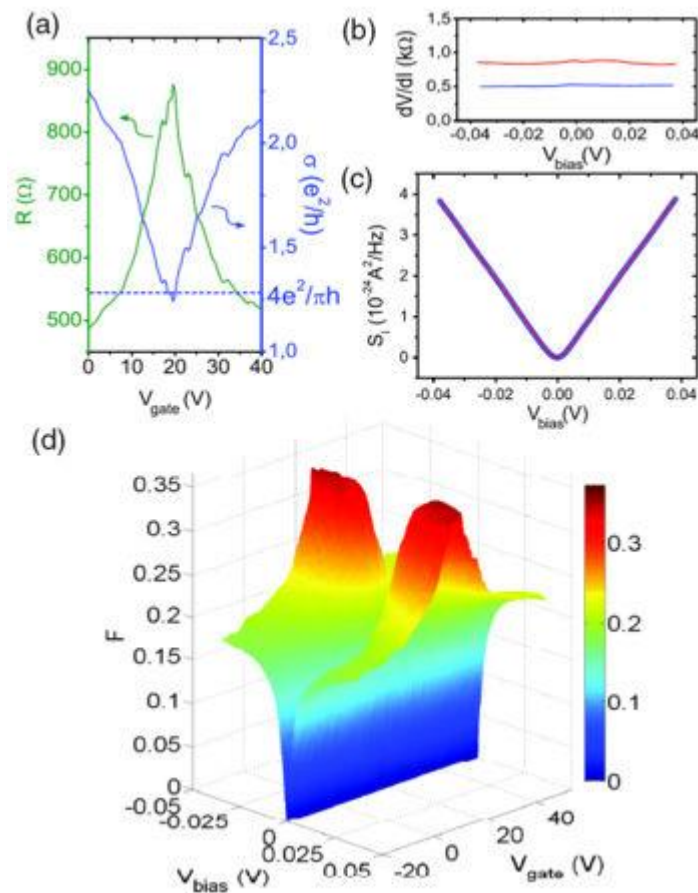


Obrázek 2: Změna šumového proudu v závislosti na teplotě

1.2.2 Výstřelový šum

Výstřelový šum (shot noise) je typem elektronického šumu, který se vyskytuje, pokud konečné množství částic nesoucích energii (tedy elektronů v elektrotechnice a fotonů v optice) má dostatečnou velikost, aby podpořilo růst detekovatelné statistické fluktuace v měření. Výstřelový šum a jeho parametry jsou důležité v elektronice, telekomunikacích stejně jako ve fyzice. Výstřelový šum hraje také roli při simulaci částicových systémů, kde dochází k detekovatelným statistickým fluktuacím díky malému množství částic v modelu. V reálném systému (tedy v systému s výrazně větším množstvím částic) tento jev nemusí být pozorován [12].

Mocnost výstřelového šumu narůstá s intenzitou střední hodnoty proudu respektive intenzity světla. Nicméně tento nárůst není lineární, a růst magnitudy šumu je výrazně pomalejší než růst magnitudy signálu. Tato disproporce má za následek, že výstřelový šum je problém pouze u malých proudů, respektive intenzit světla. Následující obrázek zobrazuje grafický popis chování výstřelového šumu vzorku PN přechodu.



Obrázek 3: Výstřelový šum

1.2.3 Gausův šum

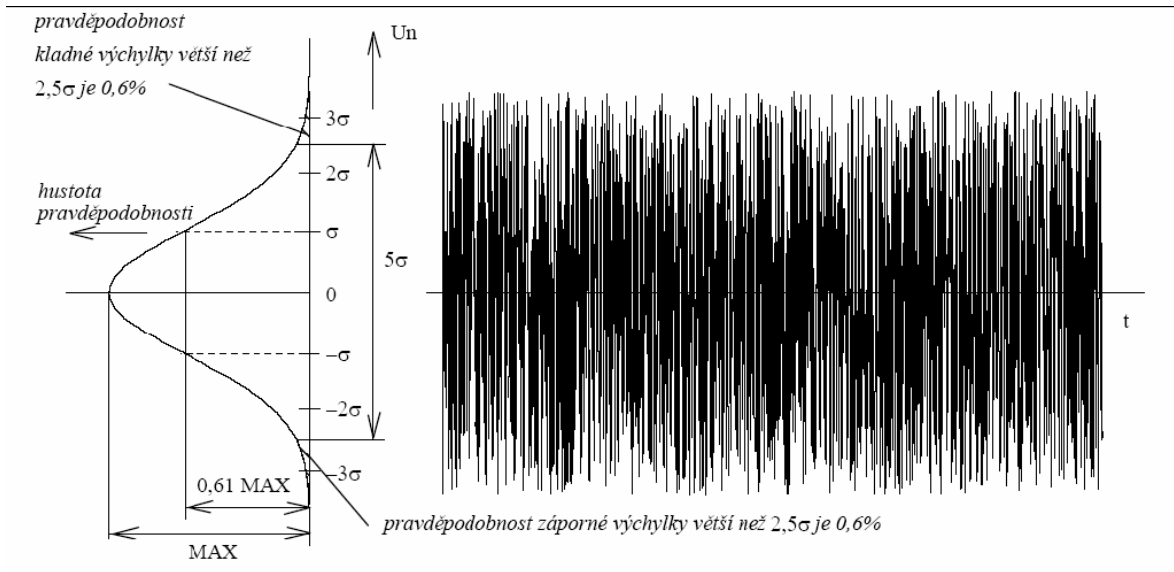
Zvláštní druh bílého šumu, který se vyznačuje užším frekvenčním pásmem. Tento šum se často označuje jako aditivní bílý gausův šum [12].

1.3 Matematický popis šumu

Můžeme říci, že střední úroveň šumu v systému je nula což je současně nejvíce pravděpodobná hodnota úrovně šumu. S rostoucí energetickou úrovní šumu naopak klesá pravděpodobnost výskytu takto zašuměného prvku v systému.

Vhodným matematickým aparátem pro popis rozložení pravděpodobností v systému je tzv. Gaussova křivka. Tvar této křivky je definován parametrem σ , což je směrodatná odchylka šumu od nulové hodnoty – jedná se v podstatě o efektivní hodnotu šumu. Zajímá nás i disperze šumu, která se značí D a jejíž hodnota je totožná s činným výkonem šumu.

Plocha ohraničená Gausovou křivkou je jednotková, což odpovídá stoprocentní pravděpodobnosti výskytu velikosti šumu v definovaném prostoru. Je tedy stoprocentně jisté, že vrcholová hodnota šumu bude někde v intervalu šumových energií $(-\infty, +\infty)$. Pravděpodobnost, že úroveň šumu bude větší, než $\pm 2,5 \sigma$ respektive, že jeho mezivrcholová hodnota bude větší než 5σ je asi 0,6%. Pro 6σ je pravděpodobnost pouze 0,27% a pro 10σ je to pouze $6 \times 10^{-5} \%$ [13].

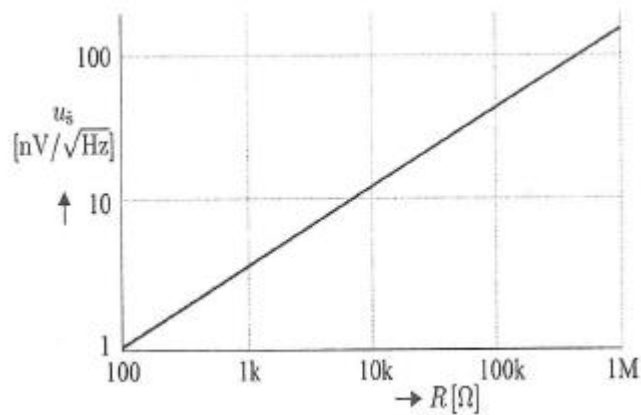


Obrázek 4: Gaussova křivka

1.4 Spektrální šumová hustota

V pasivních elektronických prvcích a strukturách najdeme šum, jehož spektrum projevuje nerovnoměrné rozdělení energie. Tuto nerovnoměrnost je třeba zohlednit a proto se začal používat pojem spektrální hustota šumu signálu N_0 . Je to informace udávající, jaké množství energie je přiřazeno šumu signálu o určité frekvenci. Tedy, je to intenzita spektrální hustoty šumu.

Spektrální šumová hustota může být vztažena k napětí, proudu nebo výkonu a je vždy určována pro určitou šířku pásma. Jednotkou spektrální hustoty šumu je watt-sekunda nebo Joul. Pokud je zjišťovaný šum konstantní s frekvencí, pak je N_0 v rámci pásma B rovna BN_0 . Následující obrázek ukazuje závislost šumové spektrální hustoty proudu i_s na velikosti odporu R [13].



Obrázek 5: Šumová spektrální hustota rezistoru

1.4.1 Matematický aparát pro zjištění spektrální hustoty

Cílem zjišťování a popisování spektrální hustoty je popis spektrální hustoty časově omezeného vzorku signálu a zjistit frekvenční složení signálu a tak zjistit určité periodicity v signálu [13].

Existují dva pohledy na matematický popis spektrální hustoty:

- Energy spectral density – ESD
- Power spectral density – PSD

1.4.1.1 Energy spectral density – ESD

Máme-li signál $f(t)$ jehož spektrální hustota je $\Phi(\omega)$, pak je $\Phi(\omega)$ druhou mocninou Fourierovy transformace signálu, která je spojitá.

$$\Phi(\omega) = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2 = \frac{F(\omega) F^*(\omega)}{2\pi} \quad 7.$$

V tomto případě je ω úhlovým kmitočtem a $F(\omega)$ je spojitá Fourierova transformace $f(t)$. Je-li signál diskrétní a jeho jednotlivé partie jsou označeny f_n , pak je $f(t)$ definována jako:

$$f(t) \approx \sum_n f_n \delta(t - n) \quad 8.$$

kde $\delta(x)$ je diracova delta funkce. Množství elementů v sumě může být konečné, ale i nekonečné. Je-li množství elementů \mathbf{n} nekonečné, potom platí následující formulace:

$$\Phi(\omega) = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_n e^{-i\omega n} \right|^2 = \frac{F(\omega)F^*(\omega)}{2\pi} \quad 9.$$

V předchozí formulaci je $F(\omega)$ diskrétní časovou Fourierovou transformací z f_n . Je-li číslo \mathbf{n} konečné a rovno \mathbf{N} , pak můžeme tvrdit, že $\omega=2\pi m/N$ pak

$$\Phi_m = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-2\pi imn/N} \right|^2 = \frac{F_m F_m^*}{2\pi} \quad 10.$$

1.4.1.2 Power spectral density – PSD

Předchozí matematické znázornění spektrální hustoty vyžadovalo a bylo postaveno na tom, že Fourierova transformace signálu existuje, respektive, že existuje integrál anebo suma tohoto signálu. Častěji používanou volbou je ale zjištění výkonové spektrální hustoty (PSD), která definuje způsob, jakým je energie signálu nebo jeho komponent (v případě diskrétního signálu) distribuována s frekvencí [17]. Energií je v tomto případě myšlena skutečná energie z hlediska fyzikálního. Pro snažší projekci do naší problematiky budu nadále uvažovat čtverec energie signálu, tedy skutečnou energii signálu, jehož napěťová část je podrobena zátěži jeden ohm. Tato okamžitá energie může být definována vztahem:

$$P = s(t)^2 \quad 11.$$

V tomto případě neexistuje Fourierova transformace, jelikož není možné integrovat přes čtverec signál s nenulovou průměrnou energií. Existuje ale Wienerův-Kičinův teorém, který nám poskytne jednoduchou alternativu [17] :

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau = \mathcal{F}(R(\tau)). \quad 12.$$

Energie signálu na konkrétní frekvenci nebo frekvenčním pásmu může být spočítána integrací přes frekvence [17]:

$$P = \int_{F_1}^{F_2} S(f) df + \int_{-F_2}^{-F_1} S(f) df. \quad 13.$$

Výkonová spektrální hustota existuje pouze v případech, že signál je statický. Pokud tomu tak není, nastává situace, při které se autokorelační funkce stává funkcí dvou proměnných. V takovém případě je třeba použít některou z jiných technik.

1.5 Šum v obvodu

Šumová charakteristika elektronické komponenty a obvodu je zpravidla vyjadřována jako šumová hustota. Každý obvod má na vstupu nějaký proud a nějaké napětí, potřebujeme tedy dvě veličiny abychom šum mohli dobře popsat. Jedná se o napěťovou šumovou (jejíž jednotkou je $V/\sqrt{\text{Hz}}$) a proudovou šumovou hustotu (jejíž jednotkou je $A/\sqrt{\text{Hz}}$). Šum může být vyjádřen z hlediska jeho efektu na výstupní signál z obvodu, nebo můžeme popsat takový šum, který interaguje se vstupním signálem. Šum modulovaný do vstupního signálu se označuje RTO (referred to output) a šum na výstupu je značen RTI. Při měření celkových šumových parametrů pasivních komponent se budeme více zajímat o šum modulovaný na výstup, jinak též zvaný celkový výstupní šum. V podobném duchu se nesou i oficiální specifikace dodávané výrobcí komponent [8].

1.5.1.1 Celkový výstupní šum na měřené komponentě

V každém reálném obvodu je zpravidla více zdrojů šumu. V zájmu posouzení celkového výstupního šumu musíme vědět, zda jsou individuální zdroje šumu korelované, nebo zda jsou nekorelované. Nekorelované komponenty generují šum nezávisle jedna na druhé, tedy chovají se autonomně. Celkový výstupní šum je definován má následujícím vztahem:

$$V_{noise,total} = \sqrt{V_{N1}^2 + V_{N2}^2 + V_{N3}^2 + \dots} \quad 14.$$

2 PASIVNÍ ELEKTROTECHNICKÉ KOMPONENTY

2.1 Definice pasivní komponenty

Pasivní komponenta v elektrickém obvodu je taková komponenta, která do obvodu nedodává energii, ale tuto naopak spotřebovává. Rozdíl energie je zpravidla vyzářen jako mechanické teplo.

2.2 Rozdělení pasivních komponent dle funkce

Každá z komponent v obvodu má svoji funkci, která v zásadě vyplývá z toho, jak na obvod působí. Následující výčet pasivních komponent není zdaleka konečný, ale obsahuje velkou většinou součástek používaných v obvodech. Jedná se o:

- Rezistory
- Kondenzátory
- Cívky
- Relé a spínače
- Součástky pro ochranu před vysokým proudem v obvodu
- Filtry
- Konektory a spojovací technologie
- Zařízení pro chlazení
- Součástky schopné snést ESD

Ne všechny z výše uvedených komponent budou předmětem měření šumů, nicméně jim bude věnována pozornost v následujícím detailnějším rozboru

2.2.1 Rezistory

Rezistor je dvojbran, který se v elektrickém obvodě projevuje ideálně jen jedinou vlastností – elektrickým odporem. Nejčastějším důvodem pro zapojení rezistoru do obvodu je snížení (omezení) proudu případně snížení napětí.

2.2.1.1 Standardizace rezistorů a jejich výrobního procesu

Všechny společnosti vyrábějící rezistory při návrhu, výrobě a testování vycházejí z americké normy MIL-STD-202, kterážto je citována ve většině národních a firemních norem. Následuje výpis některých norem, které se používají při výrobě a testování rezistorů:

- BS 1852 - Barevné kódy pro značení rezistorů
- EIA-RS-279 - Barevné kódy pro značení rezistorů
- MIL-PRF-26 – Kvalifikační a kvalitativní parametry
- MIL-PRF-39007 - Kvalifikační a kvalitativní parametry
- MIL-PRF-55342 Thin-film a thick-film SMD rezistory
- MIL-PRF-914 – Obecné vlastnosti SMD chip rezistorů
- MIL-R-11 – Mechanické uspořádání a parametry
- MIL-R-39017 – Thin-film rezistory pro použití v kosmu a letectví
- MIL-PRF-32159 – Rezistory s nulovým odporem - jumpery

Všechny MIL-PRF-xxx normy mají svůj původ v USA. Norma BS 1852 je Britskou normou.

2.2.1.2 Ideální versus reálný rezistor

Ideální rezistor nevykazuje jiný parametr než svůj odpor. Odpor ideálního rezistoru není závislý na externích ani jakýchkoliv jiných vlivech a je definován chemicko-mechanickou konstitucí rezistoru podle následujícího vztahu[4]:

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad 15.$$

kde ρ je měrný elektrický odpor, l je délka vodiče a S je obsah plochy průřezu vodiče.

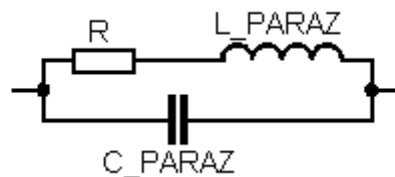
V případě ideálního rezistoru je proud rezistorem roven poměru napětí na svorkách rezistoru a jeho nominálního odporu - Ohmův zákon [4]:

$$I = \frac{U}{R}$$

16.

Reálný rezistor naopak vykazuje i jiné parametry, než jen odpor, což je způsobeno elektromechanickými parametry a konstitucí rezistoru. Parametry se také mění v závislosti na čase a externích činitelích, které interagují s rezistorem. Jedná se následující vlastnosti:

1. Vykazuje sériovou indukčnost a paralelní kapacitu. Toto nehraje roli, pokud je rezistor zatížen ss napětím nebo napětím o nízké frekvenci. Ovšem při vyšších frekvencích procházejícího proudu se tyto parazitní veličiny znatelně projeví. Následující obrázek přibližuje náhradní zapojení neideálního rezistoru.



Obrázek 6: Schéma reálného rezistoru

2. Hodnota odporu při pokojové teplotě je odlišná od hodnoty nominální, která je uvedena v datasheetu rezistoru. Toto je ošetřeno pomocí tolerance odporu tak, že v datasheetu je uvedena nominální hodnota následovaná tolerancí, např. $R=[100\pm 5\%]\ \Omega$
3. Hodnota odporu je závislá na teplotě rezistoru. Se vzrůstající teplotou vzrůstá odpor.
4. Rezistor vykazuje teplotní a výstřelový šum.
5. Při velmi vysokých frekvencích na něm dochází ke skin efektu, při kterém jsou nosiče náboje (elektrony) vedeny pouze po povrchu vodiče a v jeho těsné blízkosti, což vede k tvorbě vířivých protiproudů ovlivňujících vlastnosti vodiče.
6. Hodnota odporu rezistoru klesá s velikostí přiloženého napětí.

2.2.1.3 Parametry rezistoru v závislosti na jeho mechanické konstrukci

Nejenom odporem živ je rezistor, proto nás v reálném obvodu zajímají i další parametry rezistoru. Jedná zejména se o mechanické rozměry, pracovní napětí, energetická zatížitelnost, tolerance nominálního odporu, rozsah pracovních teplot a teplotní drift. Tyto parametry jsou definovány z největší části technologií výroby rezistoru. Následuje popis hlavních technologií pro výrobu rezistoru, se kterými se můžeme setkat v dnešní době [8]:

- **Karbonové (uhlíkové) rezistory** – jsou tvořeny válcovým odporovým tělesem, ke kterému jsou připojeny elektrody v rotační ose odporového tělesa. Tyto rezistory vykazují vysokou časovou stabilitu (nestárnou). Nedají se ale použít ve vlhkém prostředí, nedisponují dostatečně malou tolerancí odporu a jejich odpor je nestabilní při změnách teplot. Karbonové rezistory se vyrábějí s nominálním odporem $0,1\Omega$ až $22M\Omega$.
- **Thick-film a thin-film rezistory** – jedná se o nejčastěji používané SMD rezistory dnešní doby. Vznikají nanášením rezistivní vrstvy na nevodivou destičku. Takto vytvořený substrát je pak zapouzdřen do vhodného obalu. Tyto typy rezistorů dosahují solidní tolerance $\pm 1\%$ a také výborné teplotní stability - při změně teploty rezistoru o 20K se odpor změní pouze o $\pm 0,5\%$. Disponují také nízkou cenou.
- **Rezistory z kovového filmu** – nejčastěji používané through hole rezistory dnešní doby. Na keramický nevodivý cylindr se nanese vrstva rezistivního filmu. Po obou stranách jsou k rezistoru připojeny elektrody v ose rotace cylindru. Tento typ rezistoru vykazuje výbornou toleranci odporu až $\pm 0,5\%$ a kvalitní tepelnou stabilitu.



Obrázek 7: Ukázka různých typů rezistorů

2.2.2 Kondenzátory

Kondenzátor je elektrický dvojbran sestávající z páru (nebo více párů) elektrod, které jsou odděleny nevodivým prostředím – dielektrikem. Ve své nejjednodušší formě je tvořen dvěma metalickými deskami, kde jedna deska má pozitivní náboj a druhá deska má negativní náboj. Pokud jsou elektrody vystaveny rozdílnému elektrickému potenciálu, tak se mezi elektrodami vytvoří elektrostatické pole. Toto pole má definovanou energii a vytváří sílu působící na obě elektrody [8].

2.2.2.1 Použití kondenzátoru

Obecný kondenzátor může být použit pro široké spektrum funkcí. Typický kapacitor z rodiny MLCC je zpravidla použit v následujících aplikacích[6]:

- *Filtrování* – za použití samorezonance se odfiltruje určité frekvenční pásmo.
- *Bypassování a oddělování* – umístění poblíž zdrojové části, pomáhá udržovat stabilní napětí a odstraní AC složku signálu
- *DC blokování* – odstraní DC složku signálu
- *Ladění* – zapojení kapacitoru a induktoru pro potlačení celého spektra signálu s výjimkou úzkého spektra konkrétních frekvencí
- *Časování* – za použití nabíjecí a vybíjecí časové konstanty, dle které se pak definuje čas.

- *Zásobník energie* – pokud je energie nahromaděná v kondenzátoru použita pro další komponenty v obvodu.

2.2.2.2 *Standardizace kondenzátorů a jejich výrobního procesu*

Podobně jako u rezistorů, tak i u kondenzátorů existuje silné zázemí v normách, které unifikuji jejich výrobu, použití a testování.

- EIA-401 – Papírové kondenzátory.
- EIA 198-1F – kondenzátory s keramickým dielektrikem: požadavky a charakteristika
- BS EN 60384-4:2007 – Testování elektrolityckých kondenzátorů
- BS 9000-4:1991 – Obecný systém pro zajišťování kvality výroby MLCC kondenzátorů
- EIA/IS-28 - Testování tantalových kondenzátorů
- EIA-IS-749 – Testování kondenzátorů na desce PCB

2.2.2.3 *Ideální versus reálný kondenzátor*

Ideální kondenzátor je definován pouze jednou veličinou, kterou je kapacita a která se měří ve faradech. Kapacita je přímo úměrná rozdílu nábojů mezi elektrodami a nepřímo úměrná napětí mezi těmito elektrodami [6]:

$$C = \frac{Q}{V} \quad 17.$$

Energie, která je obsažena v elektrostatickém poli po úplném nabití kondenzátoru je ekvivalentní práci, kterou je třeba vykonat k jeho úplnému nabití.

$$W = \int_{q=0}^Q V dq = \int_{q=0}^Q \frac{q}{C} dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} VQ \quad 18.$$

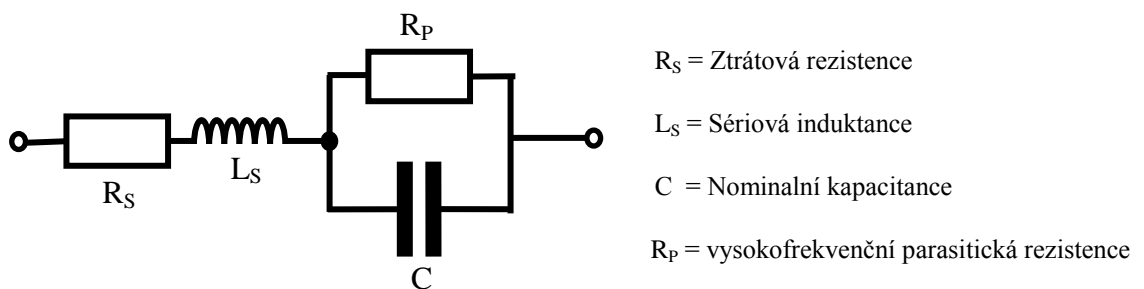
Neideální kondenzátor se odlišuje od toho ideálního v následujících parametrech.

1. Vykazuje disipaci energie, která je způsobená nedokonalostí vedoucímu ke vzniku rezistivní složky kondenzátoru. Toto se pak projevuje jako rezistor připojený sériově ke kondenzátoru.
2. Kapacita je závislá na přiloženém napětí, frekvenci a teplotě kondenzátoru
3. Rezistor vykazuje teplotní a výstřelový šum.
4. Při velmi vysokých frekvencích na něm dochází ke skin efektu.

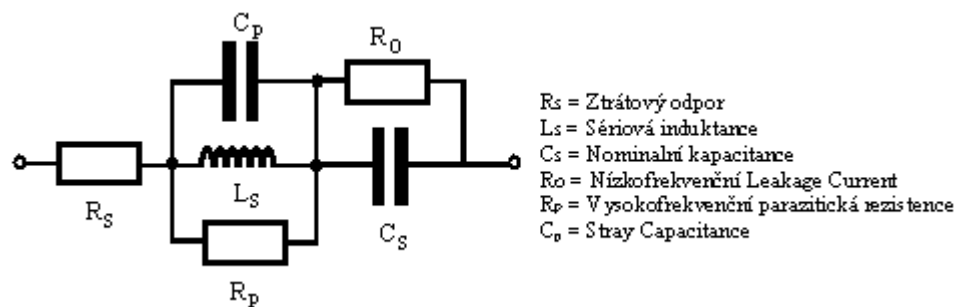
2.2.2.4 Náhradní schéma kondenzátoru

Model kondenzátoru je tvořen kombinací primární kapacity a parazitních komponent kondenzátoru – takto vzniká komplexní obvod, který je možné matematicky definovat.

V historii byl za dostačující náhradní model kondenzátoru považováno zapojení používající rezistor, induktor a kapacitor (RLC). Zapojení je schopné obstát v podmínkách nízkých frekvencí, ale nedostačuje pro vysoké frekvence a neposkytuje potřebnou odpověď na otázku strukturálních změn hodnot RLC parametrů. Zapojení je znázorněno následujícím obrázkem:



Náhradní schéma reprezentující vícevrstvý keramický kondenzátor bylo vyvinuto specificky za účelem vypořádání se s vysokofrekvenčním signálem.



Obrázek 8: Náhradní schéma kondenzátoru

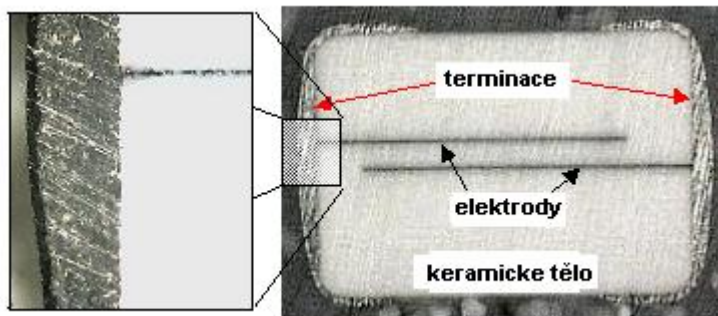
Distribučný model se snaží reprezentovat všechny části kapacitoru jako diskrétní elementy. Nevýhodou distribuovaného modelu je to, že počítá s celkovou plochou elektrod a není schopen zpracovat elektrody mající nesymetrický tvar elektrod. Distribuovaný model může být také použit k zobrazení jednotlivých elektrod při modelování chování kondenzátoru jako celku. Pro případ MLCC se používá termínu Distribuovaný žebříkový model ve kterém každý pár elektrod v kapacitoru tvoří jednu z příček pomyslného žebříku. Nevýhodou tohoto modelu je, že počet sekcí – příček se silně mění s počtem s vnitřním designem kapacitou [7].

2.2.2.5 Parametry kondenzátoru v závislosti na jeho mechanické konstrukci

Specifikace kondenzátoru jsou definovány jeho mechanickými vlastnostmi, tedy zejména rozměry a chemickým složením. Následující výčet představuje několik základních typů industriálních postupů pro vznik kondenzátorů [9]:

- **Vícevrstvé keramické kondenzátory MLCC** používají jako dielektrikum keramický materiál s příměsí baria a titanu. Vyskytují se jak ve formě through hole tak i ve formě SMD. Těleso MLCC kondenzátoru je složeno ze tří základních komponent. Jsou jimi keramické tělo, elektrody a terminace. Na původní keramickou destičku se nanese kovová elektroda ve formě gelu. Takto získaný polotovar se vypálí a po vypálení se opět nanese další vrstva keramiky následovaná kovovou elektrodou. Proces se opakuje do dosažení požadovaného počtu elektrod. MLCC kondenzátory dosahují kapacit od 0,1pF po 100μF při vysoké kapacitní hustotě až 12000 uF (měřeno u dielektrika II třídy X5R). Velkou výhodou MLCC

kondenzátorů jsou velmi nízké náklady na jejich výrobu což souvisí s jejich jednoduchou strukturou. Z tohoto důvodu se celosvětově ročně vyrobí cca 15 miliard jednotlivých MLCC kondenzátorů [4].



Obrázek 9: Vnitřní struktura MLCC kondenzátoru

Následující tabulka zobrazuje vliv teploty na kapacitní vlastnost MLCC kondenzátoru. Kombinací níže uvedených kódů může vzniknout například X7R, které nám říká, že kapacita kondenzátoru se na teplotním rozsahu -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ změní o $\pm 15\%$.

Procentní změna kapacity na rozsahu teplot u MLCC kondenzátoru

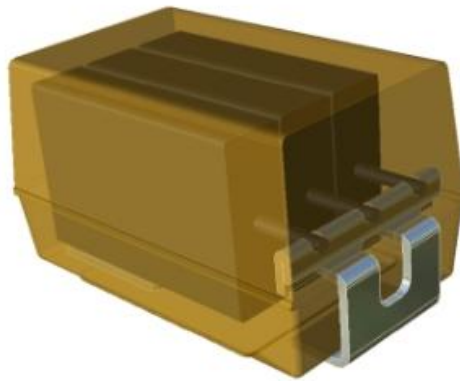
Kód	RS198 Rozsah teplot
X7	-55°C to $+125^{\circ}\text{C}$
X6	-55°C to $+105^{\circ}\text{C}$
X5	-55°C to $+85^{\circ}\text{C}$
Y5	-30°C to $+85^{\circ}\text{C}$
Z5	$+10^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$

Kód	Percent Capacity Change
D	$\pm 3.3\%$
E	$\pm 4.7\%$
F	$\pm 7.5\%$
P	$\pm 10\%$
R	$\pm 15\%$
S	$\pm 22\%$
T	$+22\%$, -33%
U	$+22\%$, -56%
V	$+22\%$, -82%

tabulka 1: typy dielektrik u MLCC kondenzátoru

- **Tantalové kondenzátory** – vysoce spolehlivé kondenzátory určené k povrchové montáži. Vznikají lisováním relativně čistého tantalového prášku na již existující tantalový drát. Drát obalený definovanou masou tantalového prášku je pak zapečen na teplotu 1200 až 1800°C . Po vytažení z pece získáme pevný blok materiálu s

vylouením nechtěných příměsí. Během zapékání se z tantalového prášku stane struktura podobná houbě na nádobí – tedy získá v poměru ke svým rozměrům velký vnitřní povrch, tak že se částice prášku přemění spojím v rozsáhlou mřížku. Tato struktura má předpověditelné parametry. Kapacita pak roste s velikostí vnitřního povrchu. Je určeno, že tantalový kondenzátor o kapacitě 220 μ F určený pro pracovní napětí 6V má vnitřní povrch roven 346cm² přesto že celkový objem tohoto kondenzátoru je 0.0016 cm³ [1].



Obrázek 10: Tantalový kondenzátor

- **Hliníkový elektrolytický kondenzátor** – je tvořen dvěma hliníkovými fóliemi, přičemž jedna z nich je potažena izolační vrstvou a papírovým dielektrikem ponořeným do elektrolytu. Fólie potažená izolační vrstvou vystupuje jako anoda a elektrolyt a druhá fólie tvoří katodu. Katoda i anoda jsou srolovány, vybaveny terminacemi a uloženy do hliníkového pouzdra. Tento typ kondenzátorů je vhodný pro použití v aplikacích o nízké frekvenci a kde je dosaženo vysokých proudů. Elektrolytické kondenzátory se vyrábějí ve formě through hole i SMD [16].



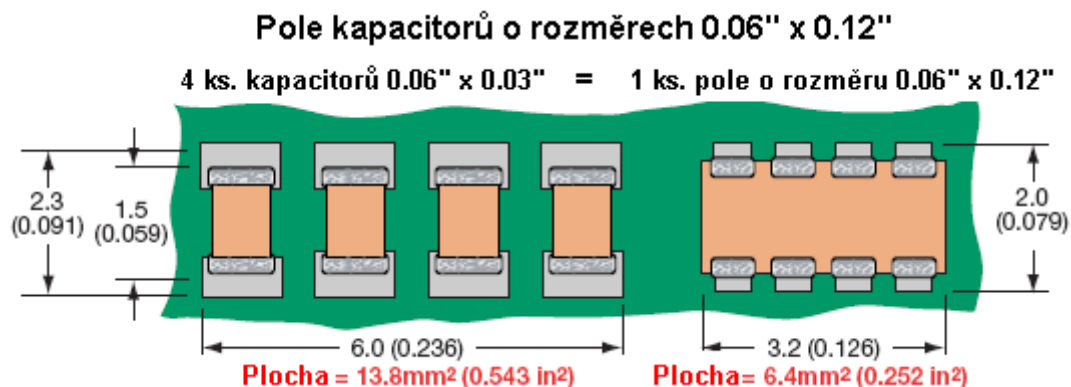
Obrázek 11: Elektrolytický kondenzátor

2.3 Rozdělení pasivních komponent dle dalších parametrů

Spektrum součástek patřících do rodiny součástek pasivních velmi široké a nové typy komponent se na trhu neustále objevují. Vzhledem k obrovskému spektru aplikací, mp3 přehrávači počínaje a vesmírnou technikou konče, existuje i mnoho typů pasivních komponent.

2.3.1 Single pack řešení versus array řešení

V poslední době jsme svědky miniaturizace a zejména trendu tzv. arrays, tedy polí, které integrují do komponenty o velikosti jednoho SMD těla několik diskretních součástek, důsledkem čehož je možné ušetřit tolik potřebné místo na desce plošných spojů. Do jednoho array těla je možné integrovat jak součástky stejné produktové řady, tedy například až čtyři rezistory, ale může dojít k integraci například rezistoru a kapacitoru. Následující obrázek uvádí vnitřní uspořádání pasivní komponenty CapArray (kondenzátorového pole) z produktové řady MLCC kondenzátorů firmy AVX Czech Republic, s.r.o. Obrázek také znázorňuje rozsah plochy na PCB, kterou je možné ušetřit pomocí moderní aplikace CapArray. Při zachování funkčnosti je plocha zabraná SMD součástkou méně než poloviční. Díky pokročilé výrobní technologii jsou pořizovací náklady na Array řešení nižší než náklady spojené s ekvivalentním single pack řešením.



Obrázek 12: Single pack vs. CapArray řešení

2.3.2 Rozdělení dle tvaru těla, respektive montáže

Elektronické komponenty se z hlediska montážní technologie dělí nejčastěji na součástky s nožičkami, tzv. through hole (neboli leaded) a na součástky bez nožiček, tedy součástky s povrchovou montáží SMD (surface mounted devices) [4].

- through hole součástky – klasické součástky, které mají k v elektrodám, které jsou ukryty uvnitř těla, připojeny drátové nebo páskové vodiče. Tyto vodiče jsou pak zasunuty do předvrtané díry na PCB. Výhodou leaded součástek je mimo jiné možnost zatížit tyto součástky energií o několik řádů větší než v případě SMD. Nevýhodou, která pak leaded součástky diskvalifikuje z použití ve velkém množství současných aplikací, je cena a mechanické rozměry.
- Surface mounted device – součástky, které nejsou vybaveny nožičkami, ale funkci elektrod připojených k desce PCB zastávají plošky kovových plátů, které jsou nanесeny přímo na samotnou funkční část součástky. Součástky jsou připevňovány lepením, drátkováním, nebo pájením přímo na desku PCB. Velkou výhodou technologie SMD jsou ceny komponent, které se pohybují o několik řádů níže než ceny through hole součástek. Mezi výhody také počítáme miniaturní rozměry, které jsou například u řady keramických kondenzátorů MLCC stlačeny až rozměry na 0,016“ x 0,008“ – na jeden čtvereční centimetr se jich vejde 1250 kusů.

3 TECHNICKÉ VYBAVENÍ PRO MĚŘENÍ ŠUMŮ

Měření šumů je třeba chápat jako detekci střídavých signálů o velmi nízkém napětí. Tyto signály dosahují hodnot napětí v řádech nanovoltů. Přesné měření šumových signálů může být provedeno i v případě, že je šum upozazděn signálem o výrazně větší amplitudě a to tak, že se šum zesílí pomocí předzesilovače [10].

3.1 Měřicí přístroj SR780

Frekvenční analyzéry používají techniku známou jako fázově citlivá detekce, při které dochází k vyfiltrování požadované signálové komponenty. Vyfiltrovaná komponenta má konkrétní referenční frekvenci a fázi.

Šumový signál o jiné frekvenci než je referenční frekvence je z měření vyloučen a neovlivní naměřené hodnoty; Lock-in tedy používá technických znalosti fázové detekce na výstupním signálu (PSD) a vyhodnocuje výstupní signál pomocí specifické referenční frekvence [2].

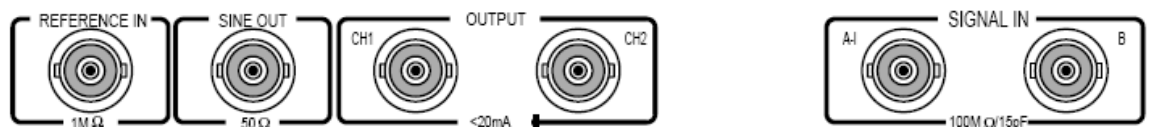
3.1.1 Čelní panel SR780

Čelní panel SR780 je tvořen několika skupinami ovládacích a zobrazovacích prvků stejně jako BNC konektory pro samotné měření a disketovou jednotkou.



Obrázek 13: Frekvenční analyzér SR780

- Funkční tlačítka – slouží k navigaci v podmenu přístroje. Pomocí těchto tlačítek se dá nastavit měřící rozsah, kalibrace, atp. Funkce každého tlačítka je závislá na menu, kterém se právě uživatel nachází a popisky k tlačítkům jsou zobrazovány operativně přístrojem.
- Klávesnice – sestává z pěti skupin tlačítek. Tlačítka ENTRY slouží k zadání numerických dat pro hodnoty zaznačené pomocí funkčních tlačítek. Tlačítka ve skupině MENU slouží k nastavení menu a přiřazení funkce funkčním tlačítkům. Každé z menu obsahuje skupinu podobných parametrů a funkcí. Set kláves ze skupiny CONTROL jsou použity ke spuštění a zastavení měření, k výběru kurzoru a k přepínání mezi aktivními displeji. Tyto klávesy jsou používány celkem často. Klávesy SYSTEM vytisknou obrazovku na tiskárně a zobrazí pomocné zprávy. Tlačítka AUTO provádějí funkce dostupné z každého menu.
- Otočné tlačítko – používá se k úpravě parametrů označených funkčními tlačítky. Používá se zejména u parametrů, které mají mnoho možností. Například citlivost. Navíc můžeme tento ovládací prvek použít při zoomování nebo skrolování .
- Disketová jednotka – používá se k uložení dat a uložení nastavení systému. Kapacita diskety je 720kB, jelikož je možné použít pouze DS/DD diskety. Disketa používá souborový systém kompatibilní s DOS a s Windows.
- BNC konektory – šest konektorů pro vstup a výstup signálu.



Obrázek 14: Vstupně / výstupní konektory na analyzáru

- Reference input – referenční signál může být buď sinusovka, TTL puls a/nebo obdélníkový signál (s náběžnou i sestupnou hranou). Vstupní impedance je $1\text{M}\Omega$ pro střídavý signál o frekvenci větší než 1Hz. Pokud je frekvence signálu menší než 1Hz, je třeba TTL vstup.

- Sinus out – vnitřní oscilátor má výstupní impedanci 50Ω a amplituda se pohybuje od 4mV RMS po 5V RMS. Pokud má zátěž nízkou impedanci, pak dochází k omezení amplitudy. Tento výstup je použit i v případě, že je použita referenční frekvence z externího generátoru – v tomto případě je signál na výstupu Sine Out fázově shodný ze signálem referenčním a můžeme pouze nastavovat jeho amplitudu. Výstup pro TTL synchronizační signál je k nalezení na zadním panelu SR780 a může být použit jako referenční signál při kalibraci osciloskopů a dalšího vybavení.
- Ch1 a Ch2 výstupy – napětí signálu na těchto výstupech je v rozmezí $-10V$ až $+10V$ v závislosti na X, Y, R nebo ϕ . Maximální proud dotovaný těmito výstupy je 10mA.
- Signal inputs – signál může vstupovat do SR780 pouze z jednoho zdroje, tedy vstupem A, nebo může mít dva zdroje signálu a potom se zpracovává rozdíl signálů A-B. Vstupy A i B jsou napěťové vstupy jejichž vstupní impedance je $10M\Omega/25pF$. Maximální napětí přiváděného signálu je 50V.

3.1.2 Příklad funkce SR780

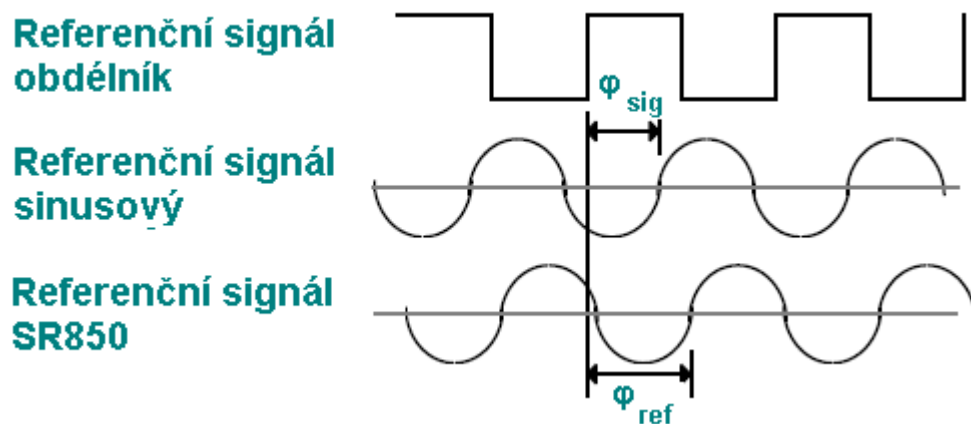
Řekněme, že existuje signál, který je reprezentován sinusovou křivkou o $f_s=10kHz$ a amplitudou $V_s=10nV$. Je zřejmé, že budeme potřebovat takovýto signál zesílit. Kvalitní low-noise zesilovač bude mít úroveň vstupního šumu $5nV/\sqrt{Hz}$. Pokud je šířka pracovního pásma zesilovače 100kHz a jeho zisk je $g=1000$, pak můžeme očekávat, že na výstupu naměříme úroveň signálu rovnou $V_s=10\mu V$ ($1000nV \times 1000$) a úroveň šumu pak bude nabývat hodnoty 1,6mV ($5nV/\sqrt{Hz} \times \sqrt{100kHz} \times 1000$). V takovémto případě nebude schopni změřit úroveň výstupního signálu, pokud nevyfiltrujeme signál o žádané frekvenci.

Pásmová propust mající činitel jakosti roven $Q=100$ (což je relativně kvalitní pásmová propust) a u které má propuštěné pásmo střed na $f_p=10kHz$ bude vykazovat šířku propuštěného pásma 100Hz ($10kHz/Q$). Šum pásmové propusti bude $50\mu V$ ($5nV/\sqrt{Hz} \times \sqrt{100Hz} \times 1000$) přičemž úroveň signálu stále bude $V_s=10\mu V$. Výstupní šum je stále výrazně větší, než úroveň signálu a není možné provést přesné měření.

Pokud použijeme zesilovač využívající fázově citlivou detekci (PSD), zjistíme, že pomocí PSD jsme schopni detekovat signál o $f_s=10\text{kHz}$ při šířce pásma $f_p=0,01\text{Hz}$. V takovémto případě bude úroveň signálu v detekovaném pásmu $0,5\mu\text{V}$ ($5\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \times \sqrt{0,01\text{ Hz} \times 1000}$) a úroveň signálu bude $V_s=10\mu\text{V}$. Poměr signálu k šumu je nyní 20 a to nám umožní provést vhodné měření [16].

3.1.3 Fázově citlivá detekce - PSD

Měření pomocí lock-in měřícího přístroje vyžaduje aplikaci referenční frekvence. Na vstup měřeného experimentu je přiveden signál o konstantní frekvenci (z oscilátoru nebo generátoru). Lock-in zaznamená odezvu od experimentu. Na obrázku je obdélníkový signál o frekvenci ω_r což může být například hodinový signál. Můžeme ale také použít sinusový signál. Pokud to mu tak je, signál který je změřen je zobrazen na obrázku. Jedná se opět o sinusový signál který je ale signifikantně posunut o φ_{ref} . SR780 generuje svůj vlastní sinusový signál [2].



Obrázek 15: Grafické znázornění PSD

SR780 zesílí signál V_{sig} a pak ho použitím fázově citlivého detektoru nebo násobiče vynásobí se signálem V_L :

$$\begin{aligned} V_{\text{psd}} &= V_{\text{sig}} V_L \sin(\omega_r t + \theta_{\text{sig}}) \sin(\omega_L t + \theta_{\text{ref}}) \\ &= 1/2 V_{\text{sig}} V_L \cos([\omega_r - \omega_L]t + \theta_{\text{sig}} - \theta_{\text{ref}}) - \\ &\quad 1/2 V_{\text{sig}} V_L \cos([\omega_r + \omega_L]t + \theta_{\text{sig}} + \theta_{\text{ref}}) \end{aligned}$$

Výstupem z PSD je pak součin dvou AC signálů. Jeden má rozdílovou frekvenci ($\omega_r - \omega_L$) a druhý je roven součtové frekvenci ($\omega_r + \omega_L$).

Pokud výstup z PSD podrobíme průchodu dolní propustí, tak odstraníme střídavou složku signálu. V běžném případě bychom takto potlačily všechny složky signálu. Pokud je ale $\omega_r = \omega_L$, tak složka o rozdílové frekvenci $(\omega_r - \omega_L)$ je stejnosměrným signálem. signál:

3.1.4 Měření šumu pomocí SR780

SR780 měří signály v okolí referenční frekvence f_{ref} . Vstupní šum o frekvenci v blízkém okolí f_{ref} projde měřícím obvodem a objeví se na výstupu.

SR780 je schopen přesně měřit tento šum zaznamenáním intenzity signálu a posléze aplikací funkce Trace-math. Šum, měřený ve V/\sqrt{Hz} , se dá spočítat jako standardní odchylka vydělená druhou odmocninou šířky pásma. U Gaussova šumu je ekvivalentní šířka pásma rovna šířce pásma dokonalého filtru, kterým projde stejné množství šumu jako u reálného filtru [2].

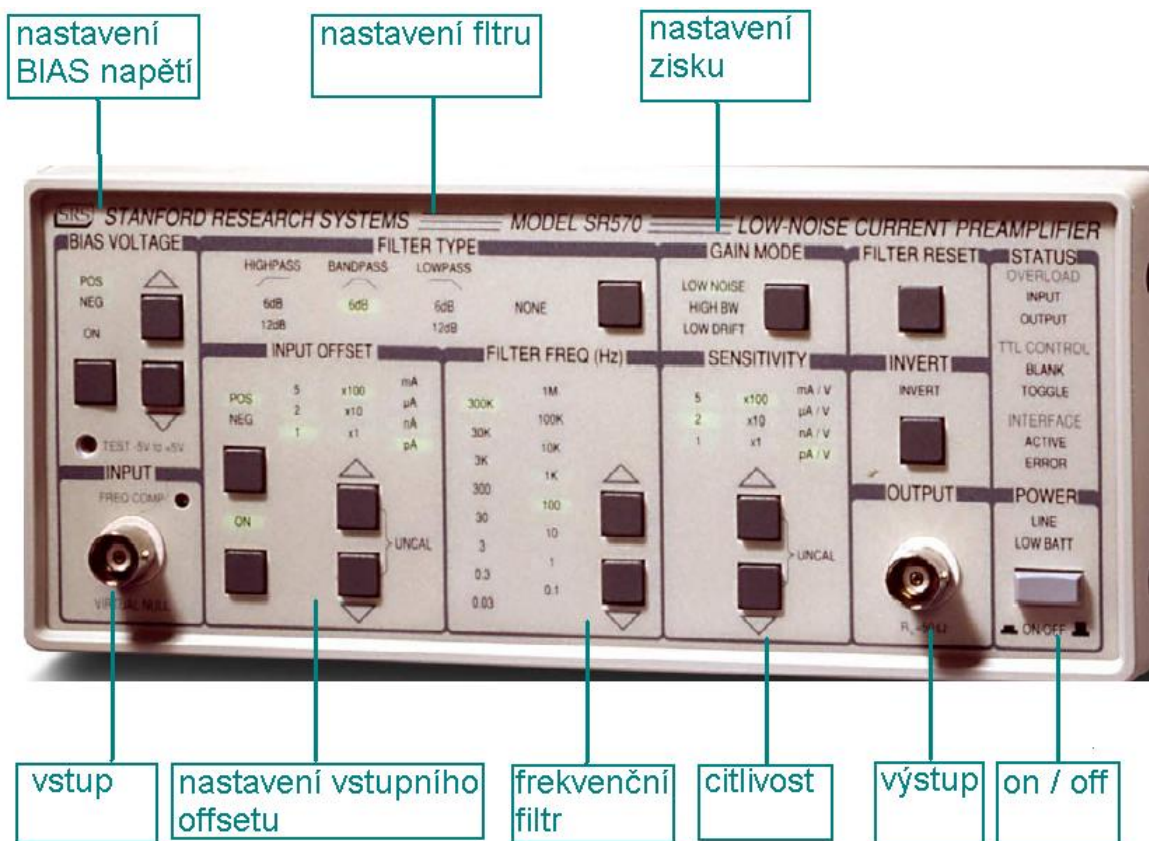
3.2 Předzesilovač SR570

Pro měření šumových parametrů pasivních komponent byl dále použit předzesilovač Rhode-Schwartz SR570. Tento zesilovač disponuje ziskem v rozmezí 1 až 50 000. Dva nastavitelné RC filtry poskytují selektivitu v rozmezí 0 Hz až 1MHz.

Tento přístroj byl zvolen, protože vykazuje nízký vlastní šum a disponuje proměnou úrovní země. Uzemnění samotného přístroje je izolováno od šasi přístroje. Přístroj je dále vybaven připojením na sběrnici RS-232. Digitální šum SR570 je eliminován tak, že oscilátor mikroprocesoru je vypnut až na okamžiky nutné ke změně konfigurace přístroje. Změna konfigurace může probíhat přes čelní panel nebo přes RS-232.

3.2.1 Čelní panel SR570

Čelní panel SR570 je navržen tak, aby poskytoval co nejjednodušší a intuitivní ovládání. Podobně jako u SR580, ovládací prvky jsou sjednoceny do skupin tak, že tlačítka v každé skupině disponují podobnou funkcionalitou. Každé zmáčknutí klávesy je pak zobrazeno na LED diodě, která je poblíž tlačítka. Zadní panel disponuje přípojkou na RS-232 a veškerá nastavení, která jsou provedena přes čelní panel můžou být také provedena přes sběrnici RS-232 [18].



Obrázek 16: Předzesilovač SR570

- Tlačítko pro zapnutí, vypnutí - SR570 se zapíná pomocí tlačítka on / off. Pokud dojde k odpojení SR570 od zdroje napětí, je tento schopen operovat po dobu 15 hodin na vnitřní baterie. Baterie jsou schopny dotovat přístroj až 200mA proudu.
- Vstup – signál je do předzesilovače SR570 přiváděn přes izolovaný BNC konektor. Je nutné věnovat zvýšenou pozornost volbě kabelu, přes který je přívod signálu realizován, protože kapacitní charakter kabelu a kvalita dielektrika mohou ovlivnit charakter měření. Nad vstupním BNC konektorem je umístěn potenciometr pro frekvenční kompenzaci kapacitního charakteru přívodního kabelu.
- Nastavení BIAS napětí – při defaultním nastavení vykazuje vstupní BNC napětí rovné virtuální nule. Naopak při aplikaci bias napětí můžeme vstupní napětí regulovat v rozmezí od -5V do +5V, s krokem po 1.22mV (12 bitový převodník). Úroveň bias napětí může být sledováno ve zdířce Test Point, která je umístěna přímo na vstupním BNC.

- Nastavení vstupního offsetu – SR570 disponuje funkcionalitou, která je schopna potlačit nechtěné proudy na vstupu. Offset může být nastaven v rozmezí 1pA až 5mA (v pozitivním i negativním směru).
- Invert – tlačítko invert dovolí invertovat vstupní signál, takovým způsobem, že kladný proud bude na výstupu záporný a naopak. Nastavení této vlastnosti je zobrazováno tlačítkem diodou.
- Nastavení filtru – SR570 obsahuje dva identické RC filtry, které mohou být nastaveny jako dolní propust', horní propust' a pásmová propust'. Díky těmto filtrů systém SR570 umožní potlačit signál se strmostí filtrů 6dB/oktáva, 12dB/oktáva a 0dB/oktáva
- Nastavení zisku – pomocí tohoto nastavení je uživatel schopen nastavit poměr mezi šířkou pásma a šumem v obvodu zesilovače. Při měření šumů bude použito nastavení LOW NOISE, které je schopno po vstupu signálu do SR570 tento signál okamžitě zesílit nad úroveň šumu samotného SR570.
- Citlivost – pomocí tlačítek v této sekci můžeme nastavit citlivost SR570. Citlivost může být nastavena v rozmezí 1 pA/V až 1mA/V, kde krokem je součin čísel 1, 2 nebo 5 a násobiče x1, x10, x100.
- Výstup – výstup signálu z SR570 je realizován pomocí BNC konektoru s impedancí 50 Ω . V našem měření je SR570 použit jako zdroj pro zařízení s vysokou vstupní impedancí., čímž je lock-in SR780.

4 METODIKA MĚŘENÍ ŠUMŮ

Při návrhu metodiky měření šumů bylo vycházeno z fyzikální podstaty šumu a zejména z toho, že šum dosahuje velmi malých energetických úrovní. Dalším kritériem uvažovaným při konstrukci metody měření a její aplikaci bylo, že šum jako takový je náhodný jev a je vhodné hledat statistické zákonitosti, nikoliv absolutní hodnotu dané veličiny (zpravidla napětí). K získání dostatečného množství informací o zkoumaném jevu bychom museli zkoumat n-totožných soustav, které jsou zdroji šumu anebo bychom museli nechat proběhnout daný proces n-krát za nezměněných podmínek. Pro naše podmínky je reálnější druhá možnost, a proto bude každé měření probíhat n-krát a výsledné hodnoty budou zprůměrovány.

4.1 Nastavení měřícího systému

Měřící systém bude vždy před samotným měřením ponechán zapnut alespoň 20 minut v klidu z důvodu zajištění stability a potlačení rušivých vlivů. Jak již bylo řečeno, měřící systém sestává z následujících prvků:

- Měřená komponenta
- Předzesilovač
- Frekvenční analyzátor
- PC vybavené systémem HP Vee

4.1.1 Nastavení měřené komponenty

Komponenta bude připojena na desku plošných spojů pájením. Komponenta bude měřena primárně za pokojové teploty, tedy v limitech 19C až 23C. Nicméně bude provedeno i měření tepelného šumu v závislosti na teplotě komponenty.

4.1.2 Nastavení předzesilovače

Předzesilovač je nastaven na frekvenční rozsah 1Hz až 30kHz. Bude usilováno o to, aby bylo možné použít maximální možné zesílení, které činí poměr 50 tisíc-krát. Nicméně je třeba počítat s možností, kdy bude třeba zesílení ponížít.

4.1.3 Nastavení frekvenčního analyzáru

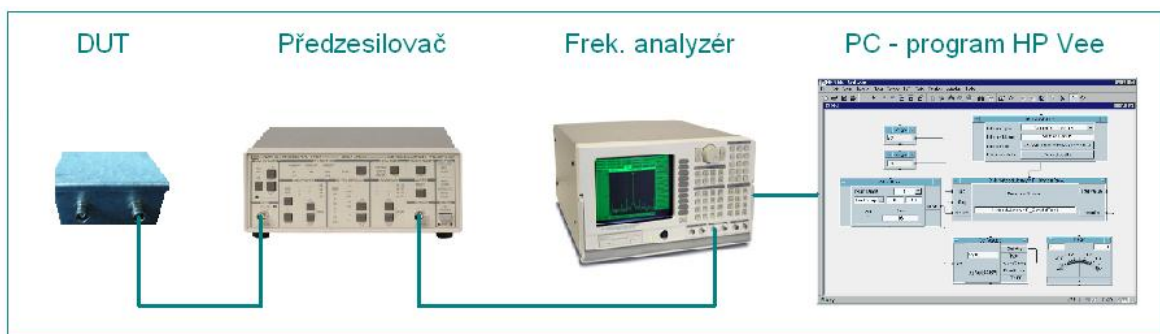
Analyzáru bude nastaven pro měření na obou kanálech. Oba dva kanály budou měřit v režimu FFT, tedy k vyhodnocení hodnot analyzáru použije Fourierovu transformaci. Naměřené hodnoty budou zobrazovány v jednotkách $\mu\text{V}_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz}}$. Displej bude zobrazovat logaritmické měřítko.

4.1.4 Nastavení HP Vee

V programu HP Vee bude nastavena horní limitní frekvence pro měření šumového spektra. Dále bude nastaven počet opakování jednoho měření (average) na 500. Budou nastaveny jednotky měření $\mu\text{V}_{\text{rms}}/\sqrt{\text{Hz}}$.

4.2 Měření tepelného šumu

Tepelným šumem chápeme šum, který je dán fluktuacemi a tepelným pohybem nosičů náboje. Tento šum je přítomen v každém materiálu a není závislý na externím zdroji energie, tedy v případě elektrotechnických součástek není třeba zdroje napětí. Následující obrázek ukazuje blokové schéma zapojení pro případ měření tepelného šumu.



Obrázek 17: Schéma zapojení pro měření tepelného šumu

Měřená komponenta bude umístěna na desku plošných spojů a tato bude umístěna do stínící krabičky (DUT). Krabička je vybavena BNC konektory. V měřícím obvodu dále figurují předzesilovač a frekvenční analyzáru, který je připojen přes rozhraní GPIB ke stolnímu počítači. Naměřená data jsou digitalizována za pomoci programu napsaném v prostředí HP Vee.

4.2.1 Podmínky měření tepelných šumů

Existuje předpoklad, že energie tepelného šumu bude vzrůstat společně s teplotou měřené komponenty. Pro dokázání tohoto předpokladu budou součástky měřeny za pokojové teploty, tedy 19C až 23C a potom za teplot 40C, 60C a 80C. Výsledné hodnoty budou konfrontovány s teoretickými výsledky, které lze odvodit ze vzorce.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

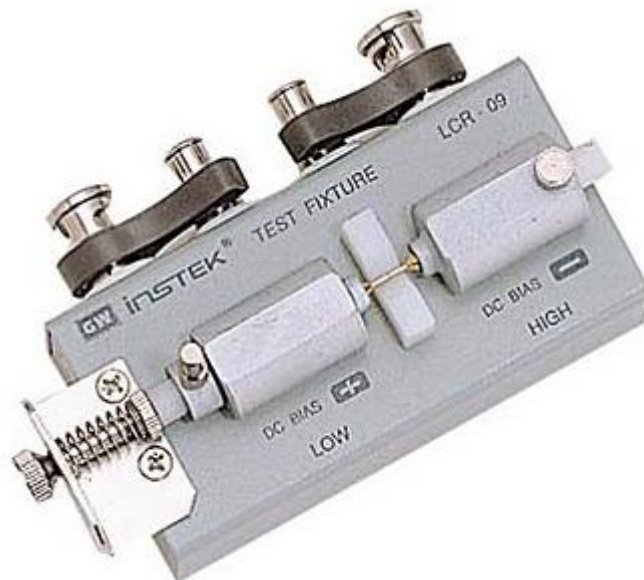
5 SESTAVENÍ LABORATORNÍHO PRACOVIŠTĚ, PROVEDENÍ NAVRHNUTÝCH MĚŘENÍ A ANALÝZA NAMĚŘENÝCH HODNOT

Laboratorní pracoviště bylo navrženo s ohledem na to, že šumy dosahují velmi nízkých energetických hodnot, a tedy bylo třeba měřenou komponentu podrobit zkoumání na citlivých přístrojích. Komponenta také byla uzavřena do měřicí cely vyrobené z ocelového plechu, aby bylo zabráněno rušení měření z externích zdrojů.

Měřicí pracoviště sestávalo z tří částí, které byly navzájem propojeny koaxiálními kabelem s koncovkou BNC. Těmito třemi částmi byly:

- Měřicí cely obsahující měřenou komponentu
- Předzesilovač
- Spektrální analyzátor

Některé pasivní komponenty dosahují miniaturních rozměrů, což se ukázalo být pro naše měření do jisté míry problematické. Bylo třeba zajistit propojení měřené komponenty s měřicí soustavou, což je v našem případě realizovatelné pouze pomocí umístění měřené komponenty na desku plošných spojů PCB, jelikož měřicí přístroj SR780 nedisponuje možností použití takzvané fixtury. Fixtura je zařízení schopné připojit libovolnou SMD komponentu pomocí speciální kleštinové instalace do měřicí soustavy. Viz následující obrázek.



Obrázek 18: Fixtura pro měření SMD komponent

Z tohoto důvodu byl použita měřící cela sestávající z dvou základních částí. Primární součástí měřící cely je deska plošných spojů nesoucí měřenou komponentu, filtrovací obvod a konektory pro propojení s zbytkem měřící soustavy. Druhou částí je šasi zformované z ocelového plechu, na kterém nanесeno olovo. Na vnitřní straně šasi jsou umístěny distanční sloupky pro zajištění galvanického oddělení PCB a samotného šasi. Čelní strana šasi je vybavena konektory (které jsou opět vybaveny průchodkami pro galvanické oddělení). Elektromechanické sestavení a BOM (bill of material) měřící cely jsou podrobně rozebrány v následujících kapitolách.

5.1 Tvorba a vlastnosti pouzdra (šasi) měřeného obvodu

Při definování mechanických parametrů pouzdra měřeného obvodu jsem vyšel z následujících úvah:

- Mechanické rozměry pouzdra budou co nejvíce miniaturizovány.
- Materiál pouzdra musí mít dostatečné vlastnosti z hlediska elektromagnetického stínění.
- Zpracování krabičky musí být dostatečně robustní, aby bylo možné manipulovat s jejím obsahem tedy s PCB.

Primární funkcí šasi v našem případě tedy je:

- Potlačit vliv nežádoucího magnetického pole

- Zabránit v maximální možné míře externímu signálu, aby ovlivnil průběh měření

5.1.1 Výrobní proces a mechanické vlastnosti pouzdra

Šasí bylo zformováno z ocelového plechu o tloušťce 1,0mm. Pouzdro sestává z dvou částí – hlavní část a víko pouzdra. Každá z částí je z jednoho kusu plechu.

Na prvotní plát plechu byla narýsována plocha krabičky (respektive jejího víka). Po vyříznutí plošného průmětu krabičky byly do takto získaného polotovaru navrtány otvory pro distanční sloupky a konektory. Šasí pak bylo naohýbáno do požadovaného tvaru. Celkové vnější rozměry šasí jsou 103 mm x 72 mm x 51 mm (délka x šířka x hloubka). Cena takto získaného pouzdra je řádově nižší, než cena komerčně vyráběného pouzdra.

5.1.2 Stínění měřicí cely

Stínění je aktivita mající za úkol odrušit elektromagnetické rušení působící na chráněný obvod a to buď pomocí pohlcení energie rušení nebo odražením energie rušivého signálu. Účinnost stínění závisí na následujících vlastnostech stínícího zařízení:

- Chemické složení materiálu použitého ke stínění – ke stínění se typicky používají kovy, metalické pěny a plasma.
- Tloušťka stínícího materiálu – s rostoucí tloušťkou materiálu roste i účinnost stínění. Každý otvor ve stínícím materiálu nesmí být větší, než je čtvrtina vlnové délky rušivého signálu
- Frekvence rušivého signálu - s rostoucí frekvencí rušivého signálu dochází i k větší penetraci rušení stínícím zařízením a je nutné volit materiál s vyšší hustotou.
- Velikost, tvar a orientace stíněného obvodu ve vztahu ke zdroji rušení.

5.1.3 Zdroje rušivých signálů

Rušivé signály vznikají všude tam, kde dochází ke změnám napětí a proudu; tedy tam, kde se vyskytuje střídavý signál. U měření šumů je vhodné uvažovat a eliminovat signály z následujících zdrojů:

- Rozvody elektrické energie a jednotlivé prvky rozvodů – generátory, vypínače, odpojovače, transformátory, vedení VN a VVN, uvolněné kontakty a mnoho

dalších. Následující kapitoly prokáží, že rušení generované rozvody elektrické energie je velmi těžké potlačit.

- Elektrické výboje ve vzduchu – blesky a statická elektřina v atmosféře. Lze odrušit vhodným uzemněním.
- Prudké změny magnetického pole země – například polární záře
- Záření pronikající z kosmu – sluneční erupce, záření spojené s inflací kosmu atp.
- Telekomunikační zařízení – rádio, televize, GSM, Wi-Fi.

Rušivý signál vstupuje do zájmového obvodu a může vytvořit galvanickou, kapacitní, induktivní nebo elektromagnetickou vazbu. V případě měření signálu je nejpodstatnější odstínění elektromagnetického rušení.

5.1.4 Zemnění měřící soustavy

Vhodně realizované zemnění je podstatným problémem, pokud chceme dosáhnout dobře fungující měřící soustavy. Důvodem je, že všechna měření jsou realizována jako měření rozdílu potenciálů, tedy napětí. Pokud ovšem nepoužijeme vhodné uzemnění se stejným potenciálem, dostane se k nevhodným výsledkům – každá ze zemí bude mít rozdílný potenciál. I když je ve schématech zemnění vynecháváno a díky oborové konvenci se předpokládá, že si ho každý čtenář domyslí, zejména při elektronickém měření je třeba zemnění pečlivě zaznamenat a dbát jeho dodržování.

5.2 Měření vzorky

Pro měření šumových vlastností pasivních komponent bylo použito šesti různých součástek. Jednalo se o tři rezistory a tři kondenzátory. Každá s komponent byla vyrobena jiným výrobním procesem:

- MLCC keramický kondenzátor – 1nF, 25V, $\pm 5\%$, NPO, SMD 1206
- Fóliový (film) kondenzátor – 1nF, 100V, $\pm 10\%$, leaded
- Elektrolytický kondenzátor – 1.0 μ F, 25V, $\pm 10\%$, leaded
- Uhlíkový rezistor – 10k Ω , 1W, $\pm 10\%$, leaded
- Drátový rezistor - 10k Ω , 5W, $\pm 5\%$, leaded

- Fóliový rezistor - $10\text{k}\Omega$, $0,5\text{W}$, $\pm 5\%$, leaded

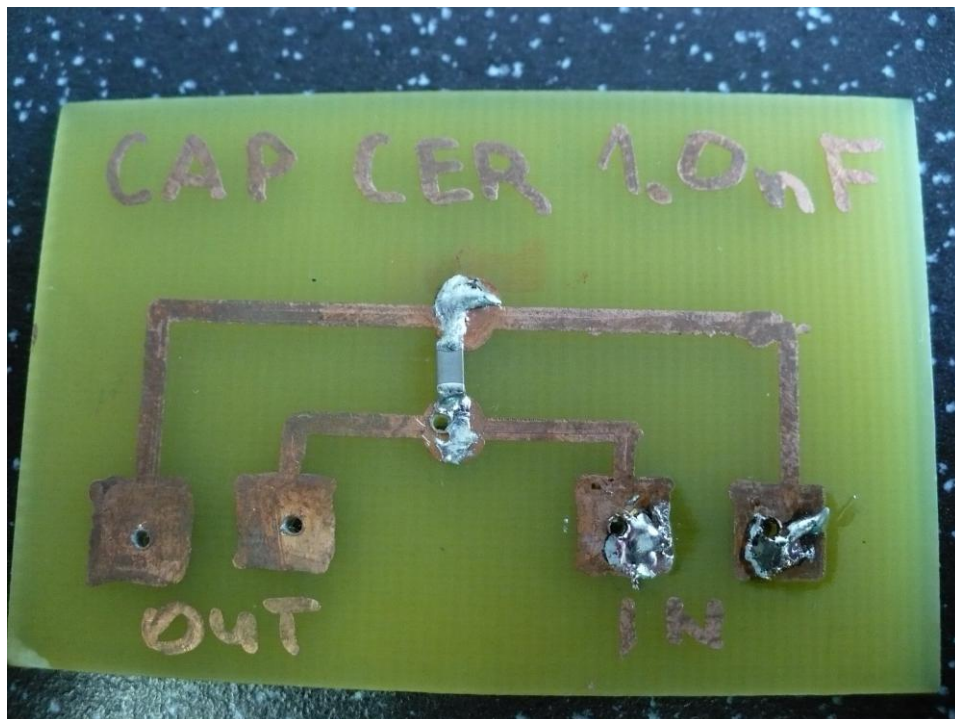
Velká rozmanitost měřených komponent byla zvolena z důvodů širšího spektra naměřených hodnot a tedy větší relevance měření.

5.3 MLCC keramický kondenzátor

MLCC keramické kondenzátory nacházejí použití téměř všude. Zástupce této třídy kondenzátorů najdeme v širokém spektru aplikací - aerospace aplikacemi počínaje, mobilními telefony konče.

Pro naše měření bylo použito kondenzátoru z keramiky typu NPO. Tento typ keramiky vykazuje solidní stabilitu kapacity v závislosti na teplotě, přesněji řečeno se vykazuje teplotní drift $\pm 3\%$ na teplotním rozsahu -85°C až 15°C .

Obrázek 20 níže zobrazuje komponentu umístěnou na desku plošného spoje. Deska pak byla připojena vodiči k měřicí cele. Cela byla připojena pomocí koaxiálního kabelu k měřicímu obvodu.



Obrázek 19: DPS nesoucí MLCC NPO 1.0nF

Jak je vidět, komponenta SMD keramického kondenzátoru byla na desku umístěna poněkud nestandardně klasickým pájením páječkou 75W , zatímco standardní způsob uchycení SMD komponent na desku je tzv. reflow vlna, případně lepení vodivým lepidlem.

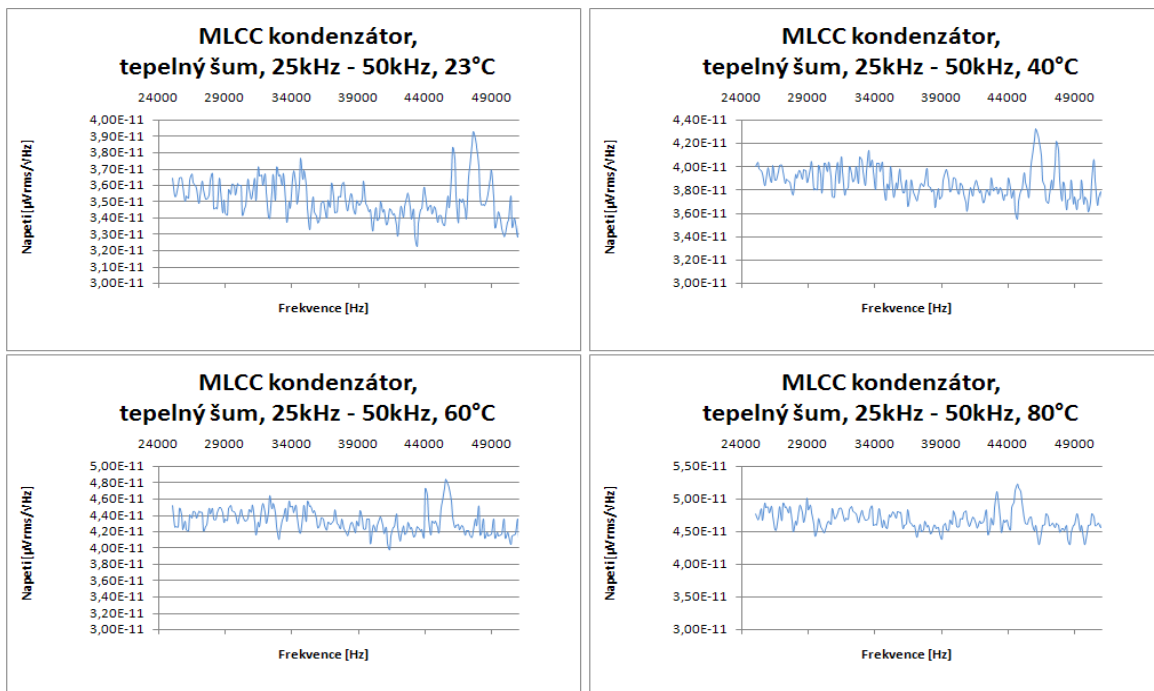
Výrobci SMD komponent jsou schopni zaručit zajištění kvalitativních vlastností pouze při ručním pájení, při kterém nedojde k překročení teploty pájení 260°C. Tento požadavek nelze bohužel při pájení ruční pájkou 75W zajistit a proto byla komponenta po uchycení na desku podrobena testu ESR. Při testu ESR dochází k měření kapacitní reaktance v závislosti na frekvenci. ESR klesá s rostoucí frekvencí až k bodu, ve kterém je kapacitní a induktivní složka reaktance v protifázi a dochází k odečtení těchto složek. Význam pak má pouze stejnosměrná složka impedance, tedy odpor. Od tohoto bodu nabývá významu induktivní charakter impedance. Spektrum naměřené v našem případě vykazuje standardní podobu a lze tedy usuzovat, že mechanické vlastnosti a vnitřní struktura měřené komponenty nebyly pájením poškozeny.

5.3.1 Naměřené hodnoty tepelného šumu na MLCC kondenzátoru

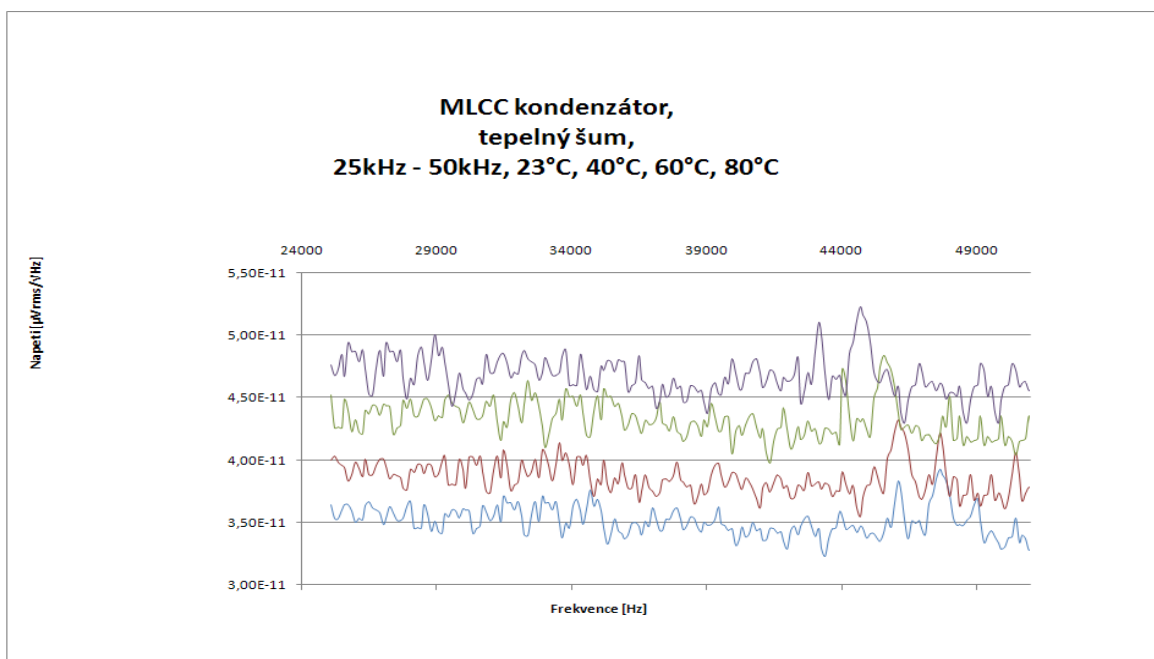
Prvním měřením uskutečněným na kondenzátoru MLCC bylo měření teplotního šumu. Tepelný šum reprezentují náhodné fluktuace vnitřní struktury materiálu, ze kterého je kondenzátor vyroben a které se projevují existencí proměnného signálu o nízkém napětí v řádech nanovoltů.

Bylo předpokládáno, že tepelný šum generovaný MLCC kondenzátorem poroste v závislosti s rostoucí teplotou, a to na základě formule 18.

Měření byla uskutečněna pro teploty 23°C (pokojová teplota), 40°C, 60°C a 80°C. Tepelný šum generovaný MLCC kondenzátorem vykazoval velmi nízké úrovně napětí a proto lze MLCC doporučit do aplikací citlivých na výskyt a úroveň šumů.



Obrázek 20: Tepelný šum na MLCC kondenzátoru

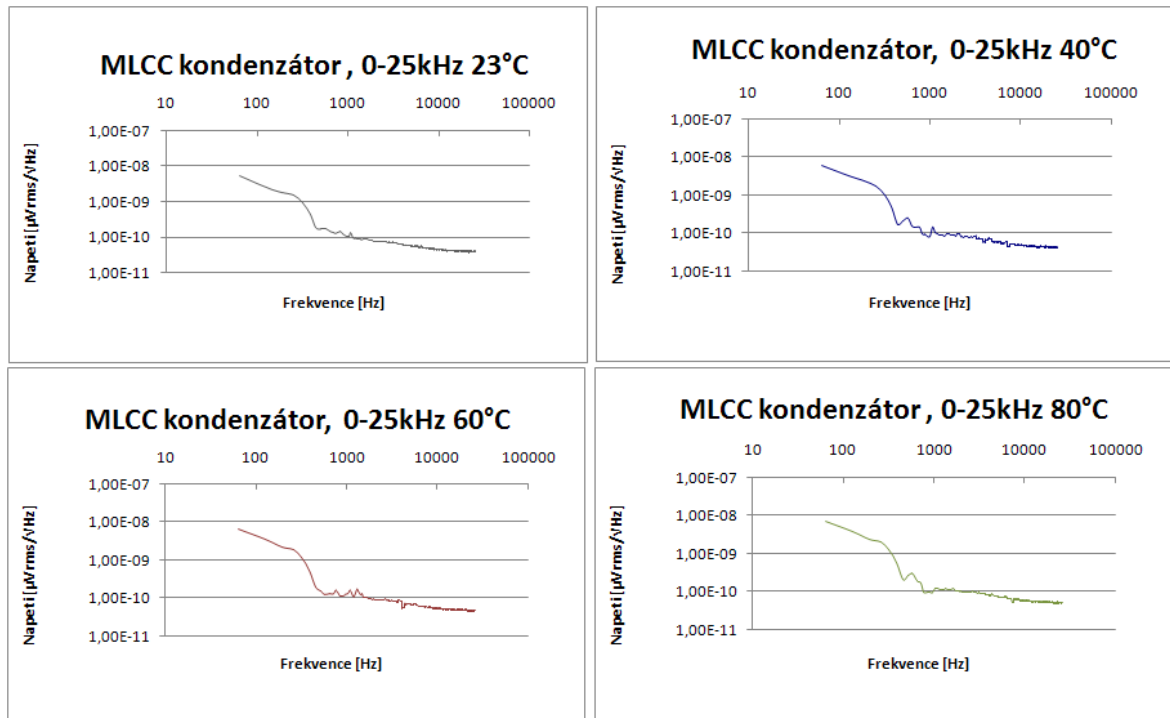


Obrázek 21: Tepelný šum na MLCC konektoru – souhrnný pohled

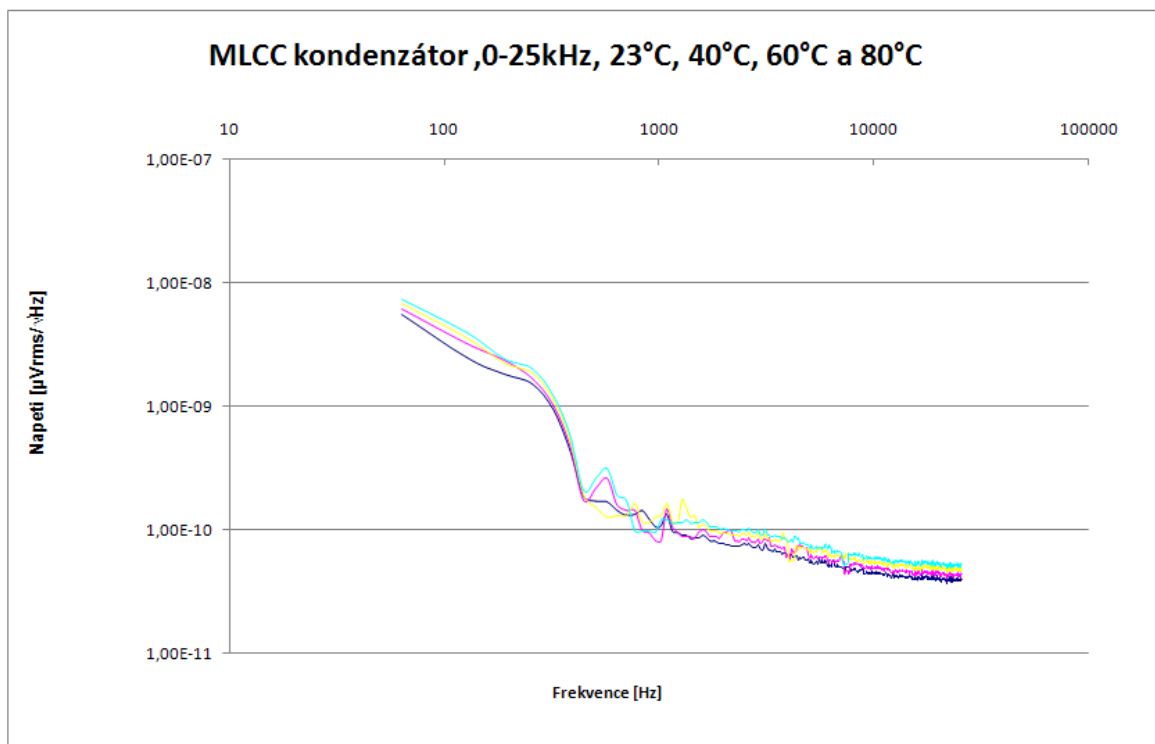
Tepelný šum generovaný MLCC kondenzátorem vykazuje nízkou energetickou úroveň, která roste spolu s teplotou. V oblasti 45kHz byla pozorována špička, která se s rostoucí teplotou posouval směrem k nižším frekvencím.

5.3.2 Naměřené hodnoty 1/f šumu na MLCC kondenzátoru

1/f šum na MLCC kondenzátoru dosahoval nízkých úrovní v řádech desetin nanovoltů. Můžeme pozorovat poměrně intenzivní pokles v oblasti 60-1000Hz. Od 1000Hz pokles není tak dramatický a 1/f šum postupně přechází v šum tepelný.



Obrázek 22: 1/f šum na MLCC kondenzátoru



Obrázek 23: 1/f šum na MLCC kondenzátoru

5.4 Elektrolytický kondenzátor

Elektrolytický kondenzátor byl podroben měření 1/f a tepelného šumu. Obě měření byly realizovány pro teplotní rozsah 23°C (pokojová teplota), 40°C, 60°C a 80°C. Následující obrázek ukazuje DPS nesoucí komponentu elektrolytického kondenzátoru a která byla použita pro obě měření (jak tepelného šumu tak 1/f šumu).



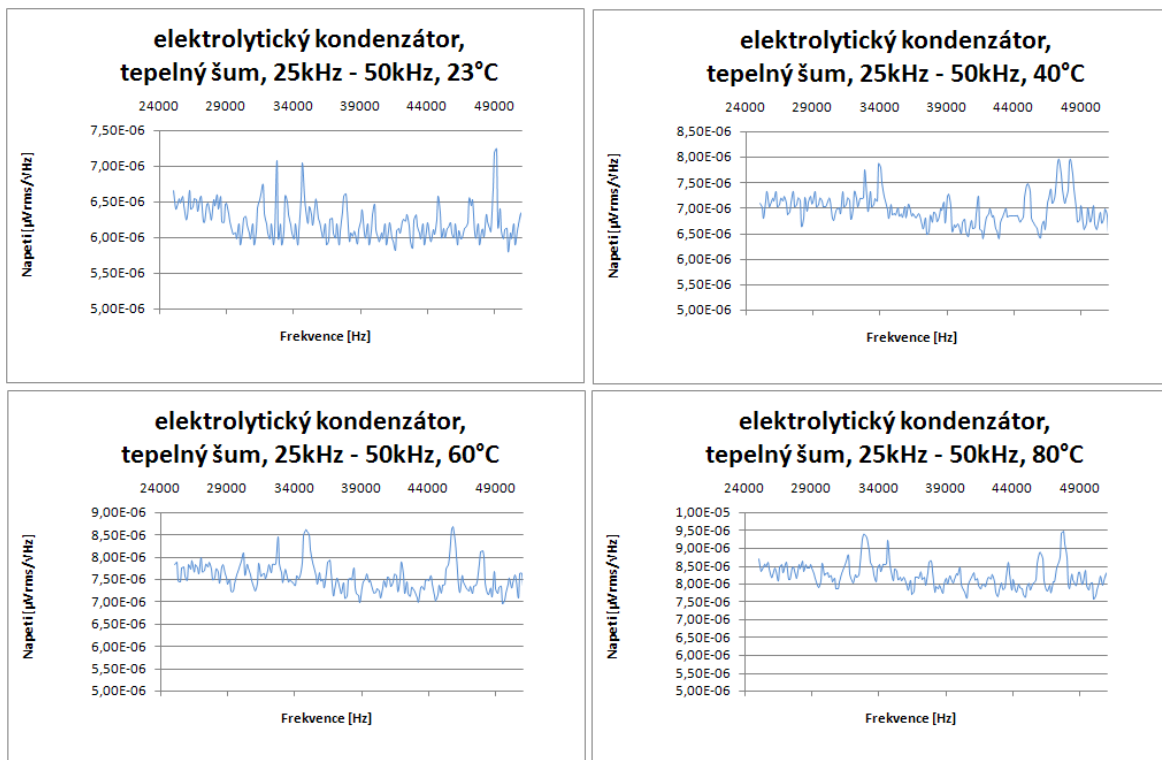
Obrázek 24: DPN nesoucí elektrolytický kondenzátor 1.0 μ F

5.4.1 Naměřené hodnoty tepelného šumu na elektrolytickém kondenzátoru

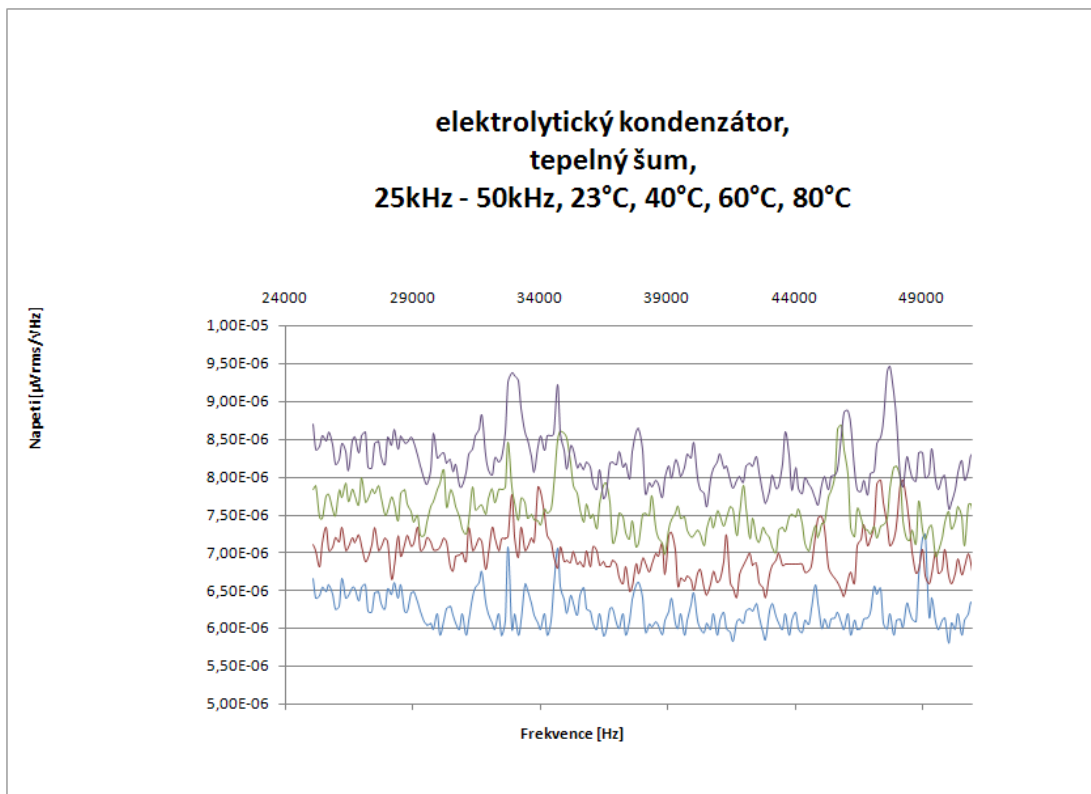
Měřením tepelného šumu na elektrolytickém kondenzátoru bylo zjištěno, že s rostoucí teplotou měřené komponenty roste i napětí generovaného šumu. Následující tabulka zobrazuje střední úroveň signálu, která byla odečtena z frekvenčního analyzátoru.

teplota [°C]	střední hodnota napětí [μ Vrms/vHz]
23	6,15
40	6,95
60	7,62
80	8,22

Tabulka 2: střední hodnoty tepelného šumu, který generuje elektrolytický kondenzátor



Obrázek 25: Tepelný šum naměřený na elektrolytickém kondenzátoru

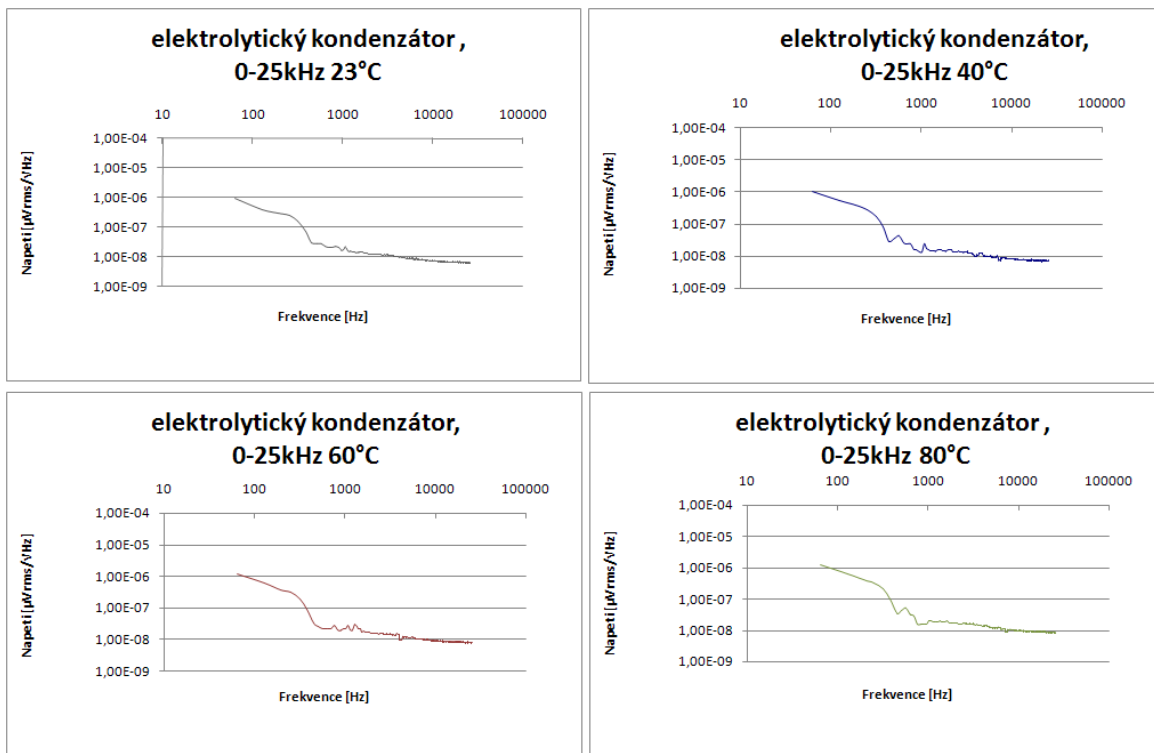


Obrázek 26: 1/f šum naměřený na elektrolytickém kondenzátoru – souhrnný pohled

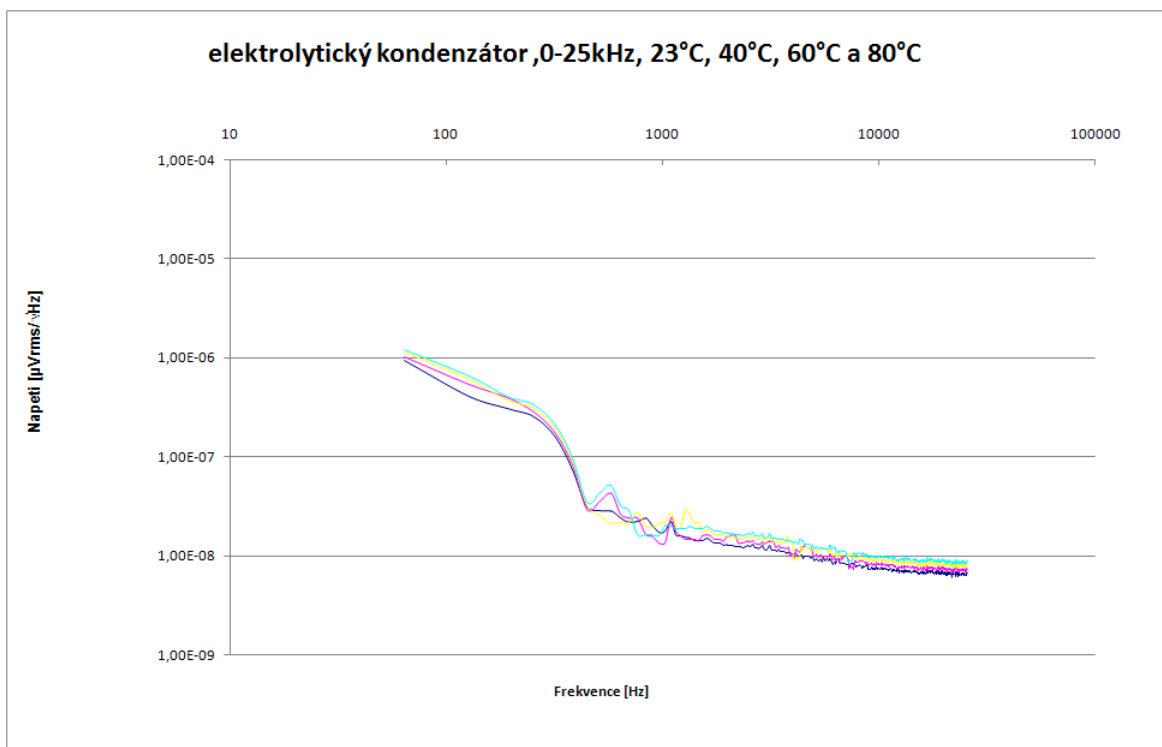
Z obrázků lze vypořadovat, že šum v pásmu 25kHz až 30kHz vykazoval zhruba podobnou úroveň. Od 32kHz do 50kHz lze pozorovat mírný pokles střední úrovně šumového signálu. Předpokládám, že tento pokles je způsobem chemickým složením dielektrika. Dále bylo potvrzeno, že energie šumu poroste se zvyšující se teplotou měřené komponenty. V oblasti 30kHz je pozorována výrazná napěťová špička, kterou nebylo lze potlačit, jelikož se nepodařilo zjistit její zdroj. Podobná napěťová špička je pozorována v oblasti 49kHz, která se ovšem se vrůstající teplotou pohybuje směrem k nižším frekvencím. Z tohoto lze usuzovat, že je ona napěťová špička frekvenčně závislá. Ani tuto špičku se nepodařilo potlačit. Považoval jsem nicméně za vhodné, vzhledem k relevanci naměřených dat, tyto špičky v rámci naměřených průběhů zobrazit.

5.4.2 Naměřené hodnoty 1/f šumu na elektrolytickém kondenzátoru

Měření 1/f šumu na elektrolytickém kondenzátoru bylo, stejně jako měření tepelného šumu, provedeno pro teploty 23°C (pokojová teplota), 40°C, 60°C a 80°C.



Obrázek 27: 1/f šum na elektrolytickém kondenzátoru



Obrázek 28: 1/f šum na elektrolytickém kondenzátoru – souhrnný pohled

Měření bylo realizováno od frekvence 60Hz, jelikož se na nižších frekvencích výrazně projevoval vnitřní šum zesilovače. Data z pásma pod 60Hz nabývala natolik absurdních hodnot, že jsem nepovažoval za vhodné je ve svojí diplomové práci zmiňovat.

Zajímavým závěrem vzešlým z tohoto měření bylo zjištění, že i 1/f šum generovaný elektrolytickým kondenzátorem je závislý na teplotě.

Průběh naznačuje, že s rostoucí frekvencí strmě klesá napětí šumu. Nejstrmější je pak šumové spektrum v oblasti 60Hz až 1kHz. V oblasti 1kHz lze pozorovat napěťovou špičku kterou se nepodařilo odstranit – usuzuji, že špička byla způsobena externím zdrojem energie. V oblasti od 1kHz do 25kHz se křivka narovná a postupně se mění v tepelný šum.

5.5 Filmový (fóliový) kondenzátor

5.5.1 Naměřené hodnoty tepelného šumu na filmovém (fóliovém) kondenzátoru

Tepelný šum naměřený na fóliovém kondenzátoru vykazuje poměrně nízkou úroveň napětí. Původně jsem tuto hodnotu považoval za scestnou, nicméně i po opakovaném měření byly zjištěny podobné hodnoty. I v tomto měření bylo zjištěno, že tepelný šum roste v závislosti na teplotě komponenty.

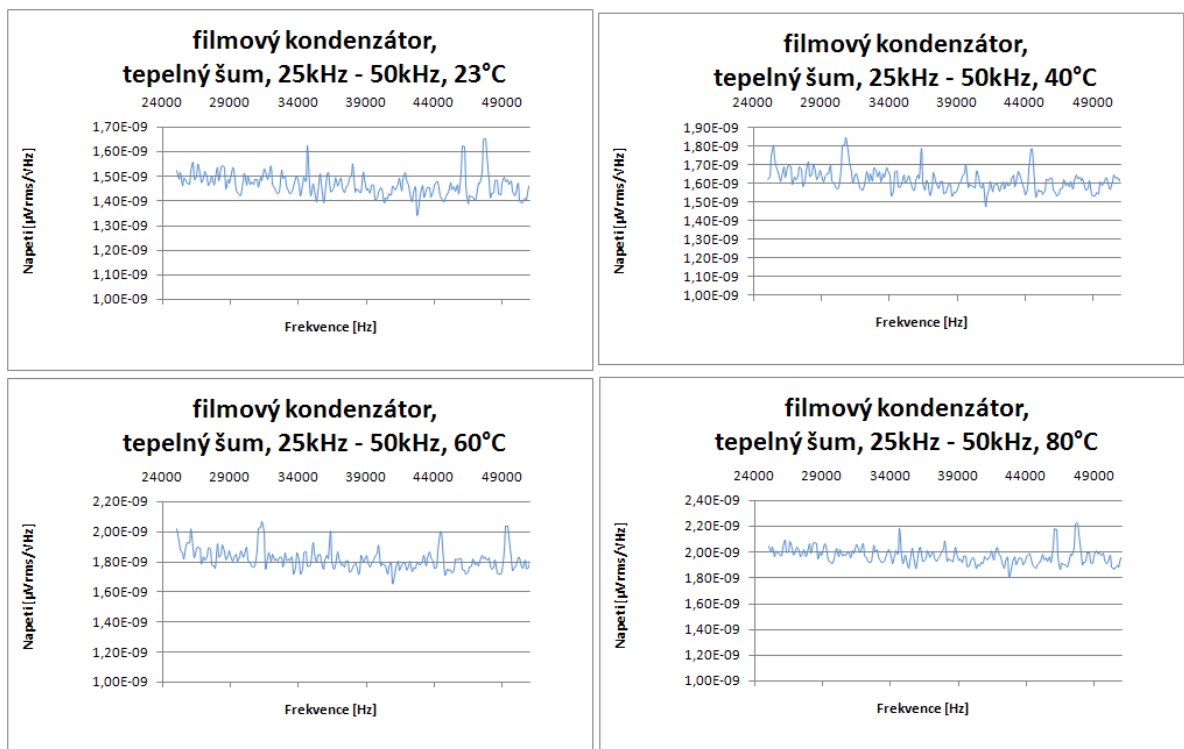


Obrázek 29: DPS nesoucí filmový kondenzátor

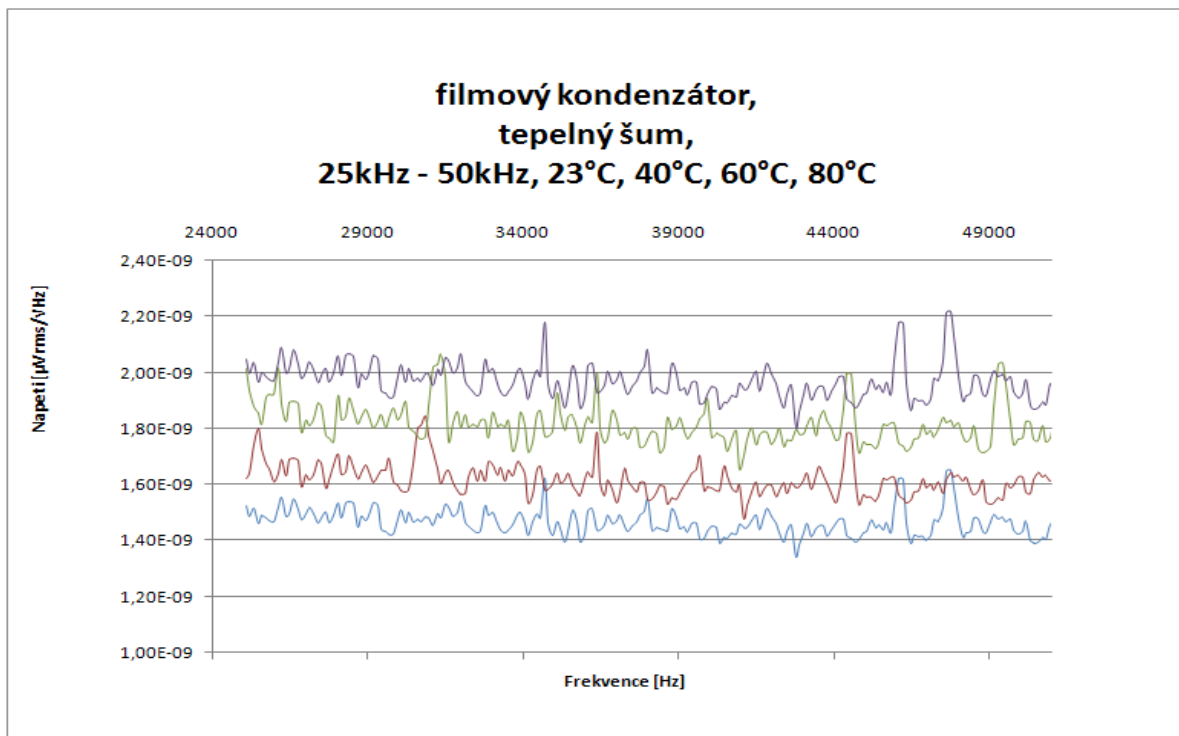
Následující tabulka ukazuje střední hodnoty napětí, které byly odečteny z frekvenčního analyzátoru:

teplota [°C]	střední hodnota napětí [nVrms/VHz]
23	1,43
40	1,59
60	1,81
80	1,92

Tabulka 3: střední hodnoty tepelného šumu, který generuje filmový kondenzátor



Obrázek 30: tepelný šum na filmovém kondenzátoru



Obrázek 31: tepelný šum na filmovém kondenzátoru – souhrnný pohled

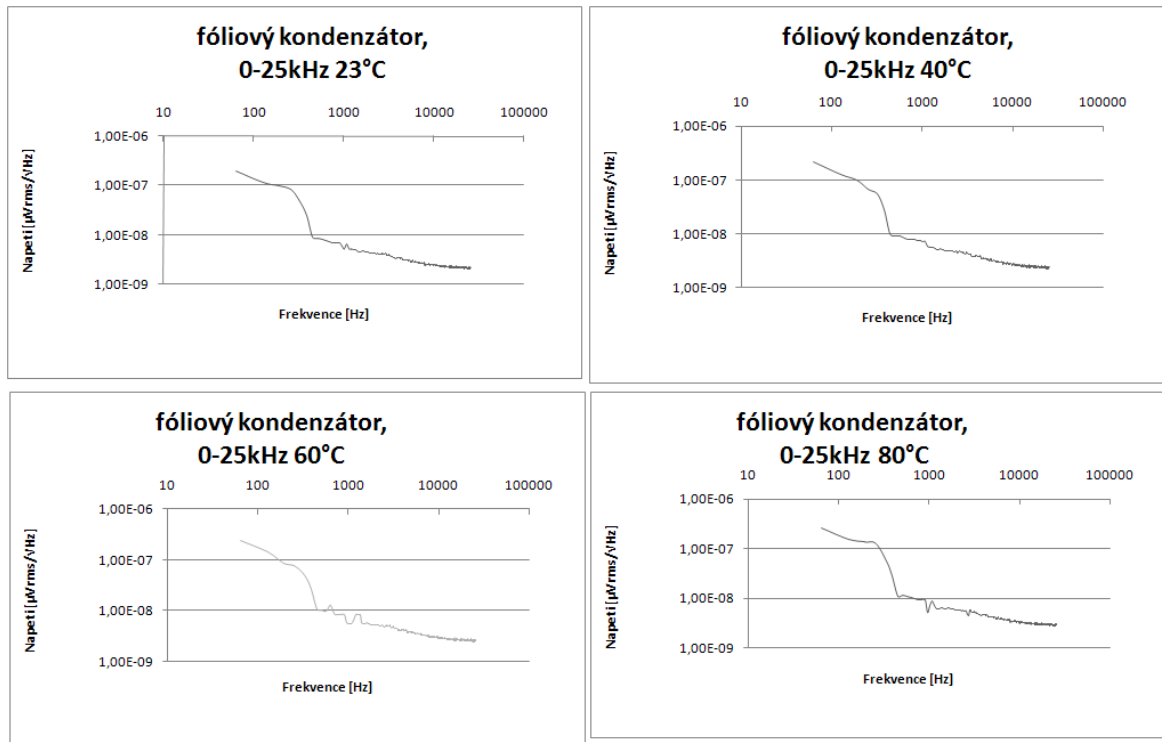
V teplotním rozsahu 23°C (pokojová teplota), 40°C, 60°C a 80°C byly provedeny čtyři měření a bylo potvrzeno, že dochází k nárůstu napětí tepelného šumu v závislosti na teplotě komponenty.

Moje měření prokázalo, že napětí tepelného šumu vykazuje mírný pokles se vzrůstající frekvencí. Nízké úrovně tepelného šumu, které byly zjištěny v tomto měření předurčují fóliový kondenzátor k použití v aplikacích, které jsou náročné na šumové vlastnosti použité komponenty. V tomto měření se objevují špičky v oblasti 34kHz a 47kHz, které jsem nebyl schopen potlačit.

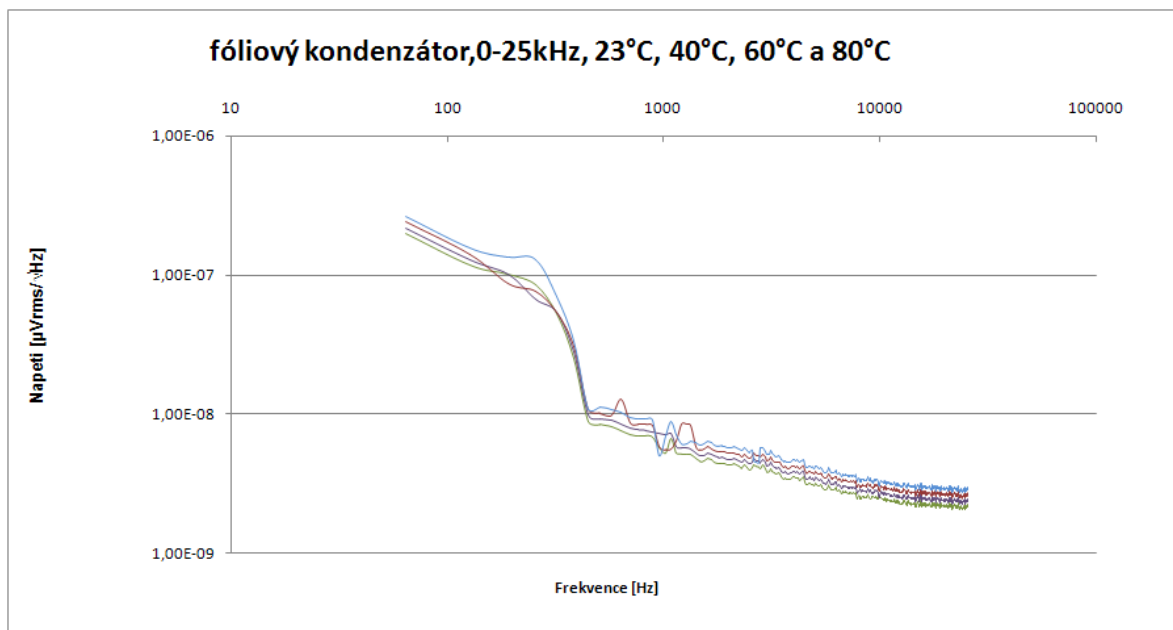
5.5.2 Naměřené hodnoty 1/f šumu na filmovém (fóliovém) kondenzátoru

Šum typu 1/f byl je v následujících grafech zobrazován v pásmu 60Hz až 25kHz. V pásmu pod 60Hz jsou naměřená data výrazně ovlivněna vnitřním šumem zesilovače, proto není možné považovat tuto oblast za relevantní pro moje měření. Intenzita napětí šumu vykazuje strmý pokles v oblasti 60Hz až 1kHz. Měřením pak bylo zjištěno, že v oblasti 12kHz až 25kHz 1/f šum vykazuje podobné vlastnosti pro všechny měřené úrovně teplot.

Z toho lze usuzovat, že z hlediska šumů fóliový kondenzátor vykazuje stabilní vlastnosti a můžeme ho doporučit pro aplikace, kde dochází ke změnám teplot.



Obrázek 32: 1/f šum na fóliovém kondenzátoru



Obrázek 33: 1/f šum na fóliovém kondenzátoru – souhrnný pohled

5.6 Uhlíkový rezistor

5.6.1 Naměřené hodnoty tepelného šumu na uhlíkovém rezistoru

Měření tepelného šumu probíhalo za teplot 23°C (pokojová teplota), 40°C, 60°C a 80°C. Uhlíkový rezistor obecně vykazuje vysokou úroveň šumů a tento předpoklad byl mým měřením potvrzen.

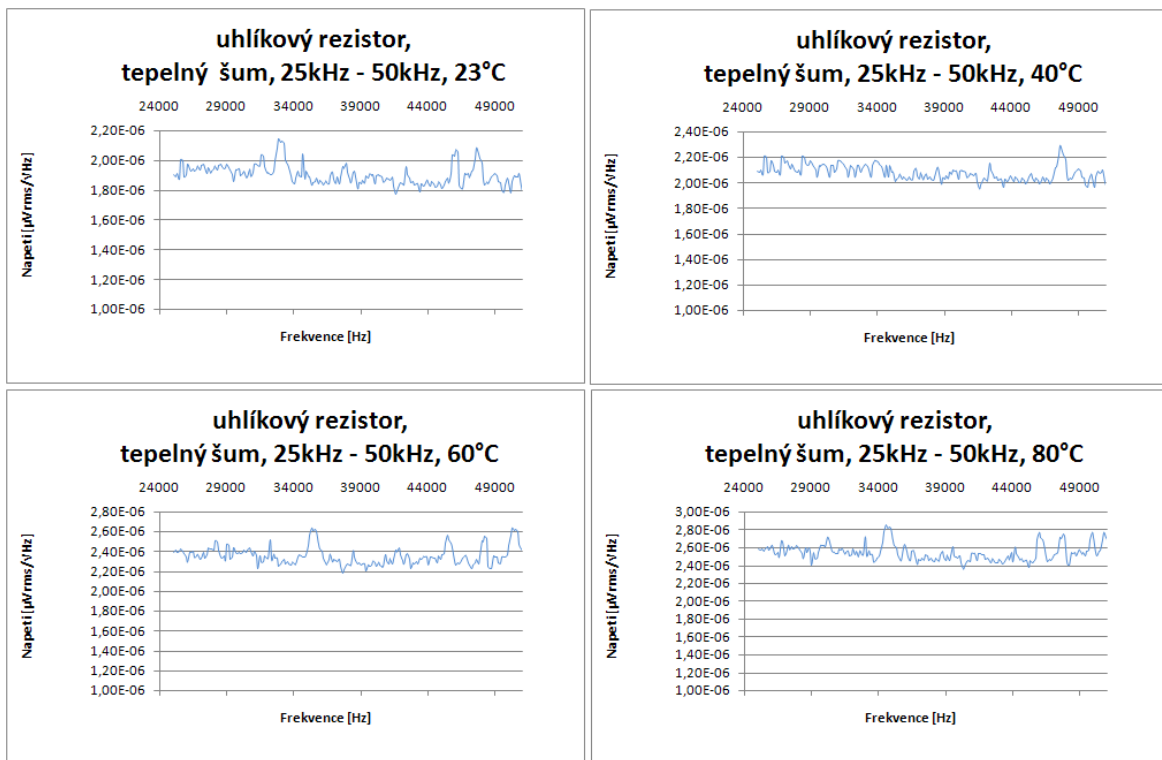


Obrázek 34: DPS nesoucí uhlíkový rezistor

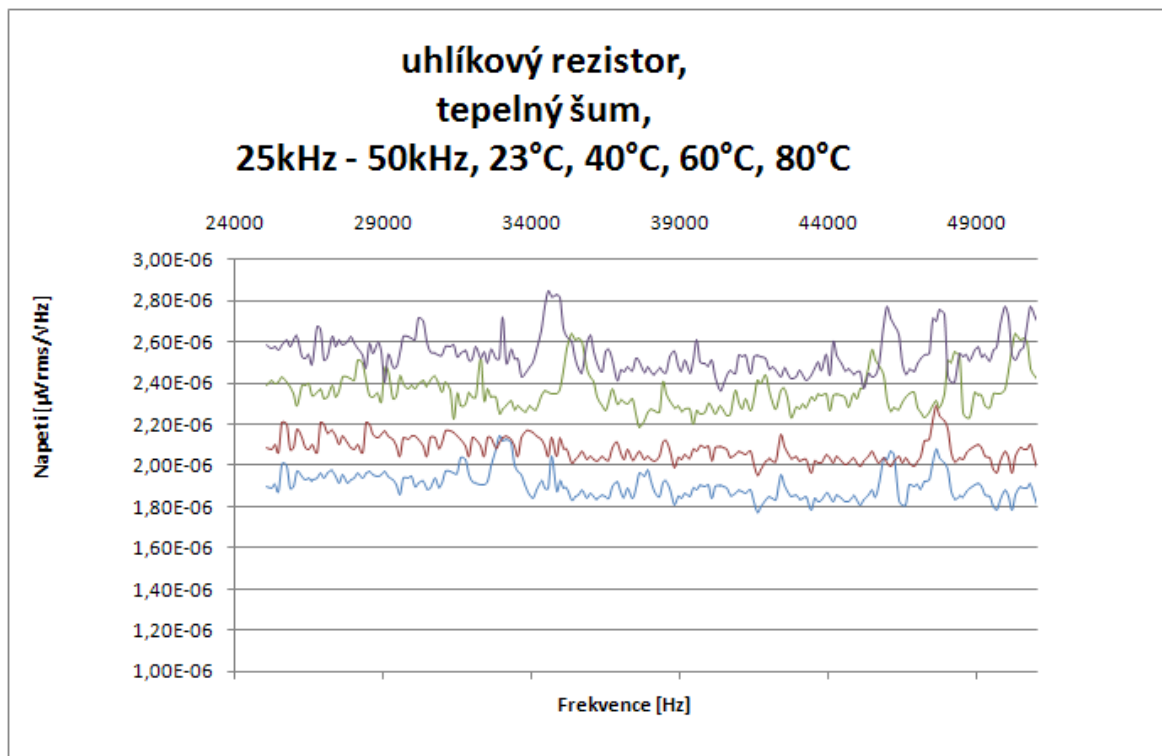
Tepelný šum zjištěný v mém měření dosahuje hodnot jednotek μV , což je v aplikacích citlivých na úroveň šumů nepraktické a uhlíkový rezistor je tedy vyřazen z použití v takovýchto aplikacích. Následující tabulka zobrazuje úroveň tepelného šumu pro jednotlivé teploty.

teplota [°C]	střední hodnota napětí [nVrms/√Hz]
23	1 920
40	2 120
60	2 380
80	2 450

Tabulka 4: střední hodnoty tepelného šumu, který generuje uhlíkový rezistor



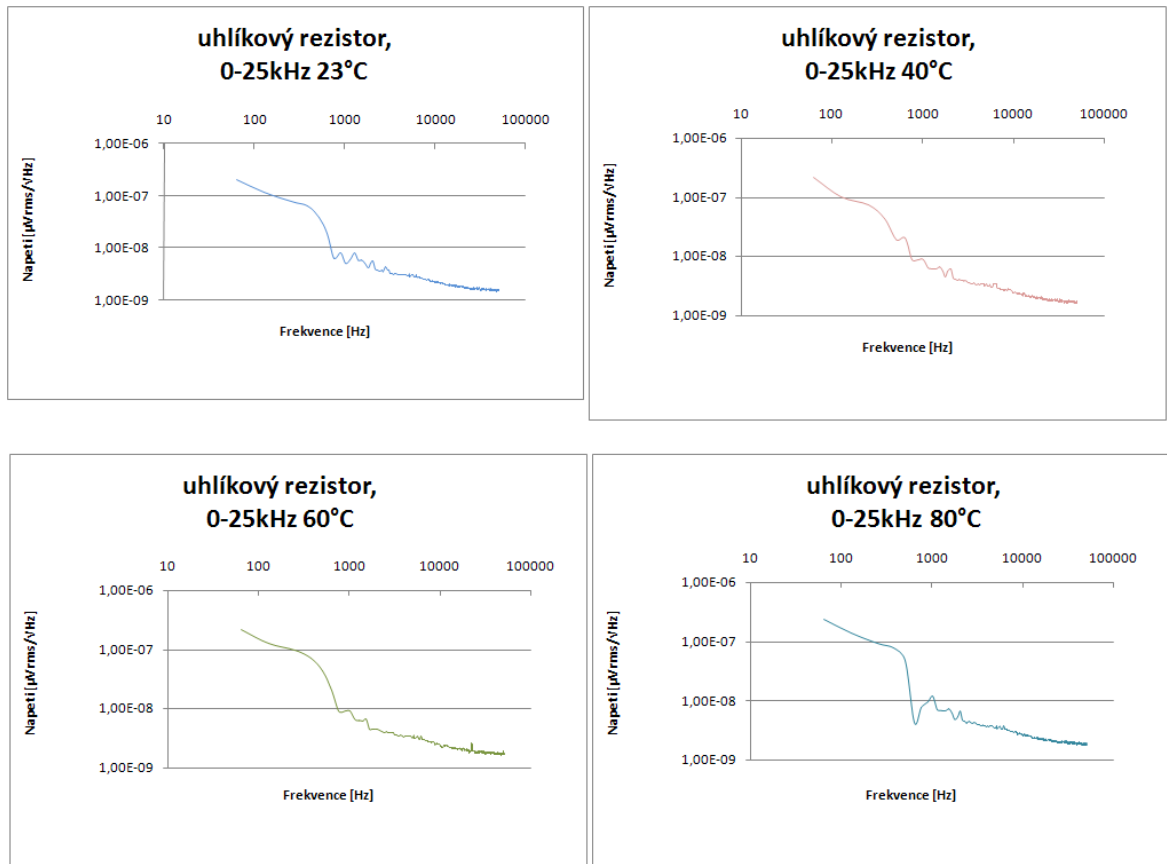
Obrázek 35: Tepelný šum na uhlíkovém rezistoru



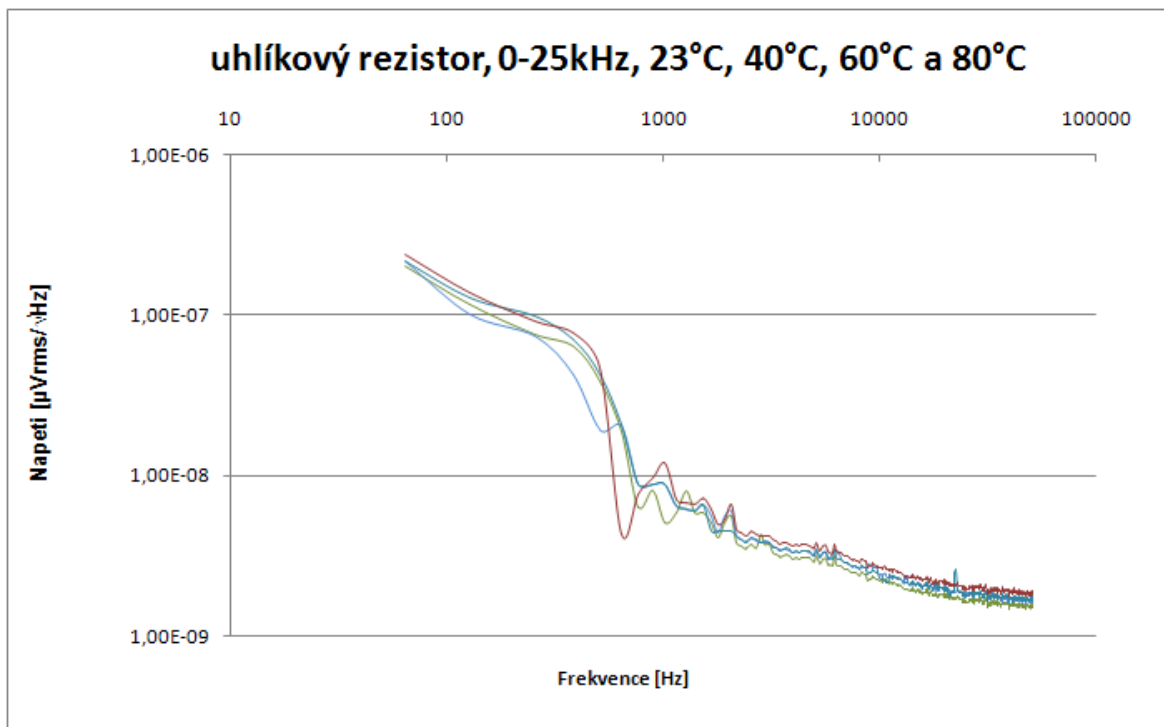
Obrázek 36: Tepelný šum na uhlíkovém rezistoru – souhrnný pohled

5.6.2 Naměřené hodnoty 1/f šumu na uhlíkovém rezistoru

Hodnoty 1/f šumů, které byly zjištěny při měření uhlíkového rezistoru, jsou výrazně pod hladinou tepelného šumu – úroveň 1/f šumu vykazuje hodnoty v řádech nV, zatímco hodnoty tepelného šumu jsou oblasti μV . Tento fenomén můžeme vysvětlit rozdílnou šířkou frekvenčního pásma, ve kterém bylo měření provedeno (viz vzorec (1.))



Obrázek 37: 1/f šum na uhlíkovém rezistoru

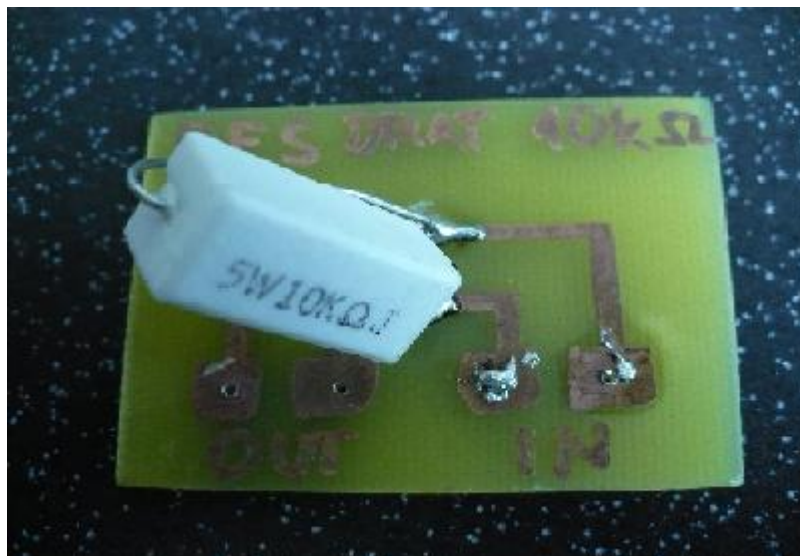


Obrázek 38: 1/f šum na uhlíkovém rezistoru – souhrnný pohled

5.7 Drátový rezistor

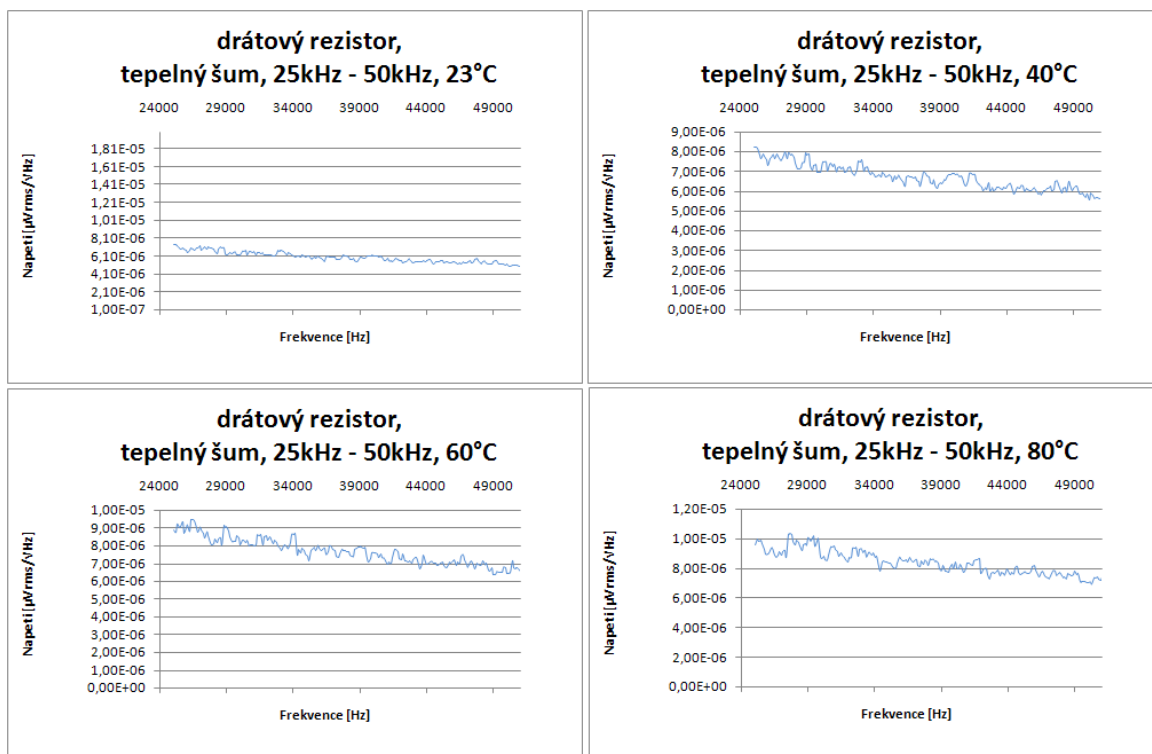
5.7.1 Naměřené hodnoty tepelného šumu na drátovém rezistoru

Zjištěný tepelný šum generovaný drátovým rezistorem zcela neodpovídá hodnotám očekávaným. Drátový rezistor je známý velmi nízkou úrovní šumů – bylo předpokládáno, že bude zjištěn šum v jednotkách nV.

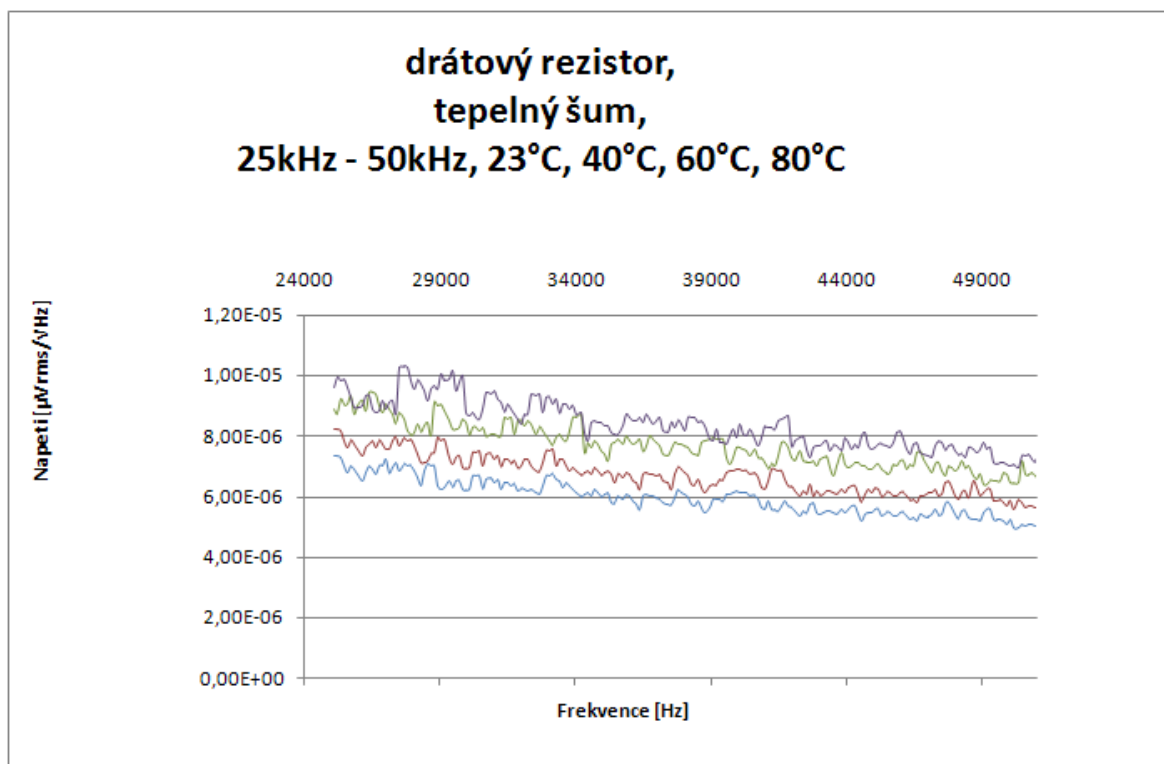


Obrázek 39: DPS nesoucí drátový rezistor

Naměřené hodnoty napětí však disponovaly úrovní až 1000x větší, proto lze toto měření považovat za mylné a zjištěné hodnoty za nereálné. Nebudu proto výsledky tohoto měření zahrnovat do závěru.



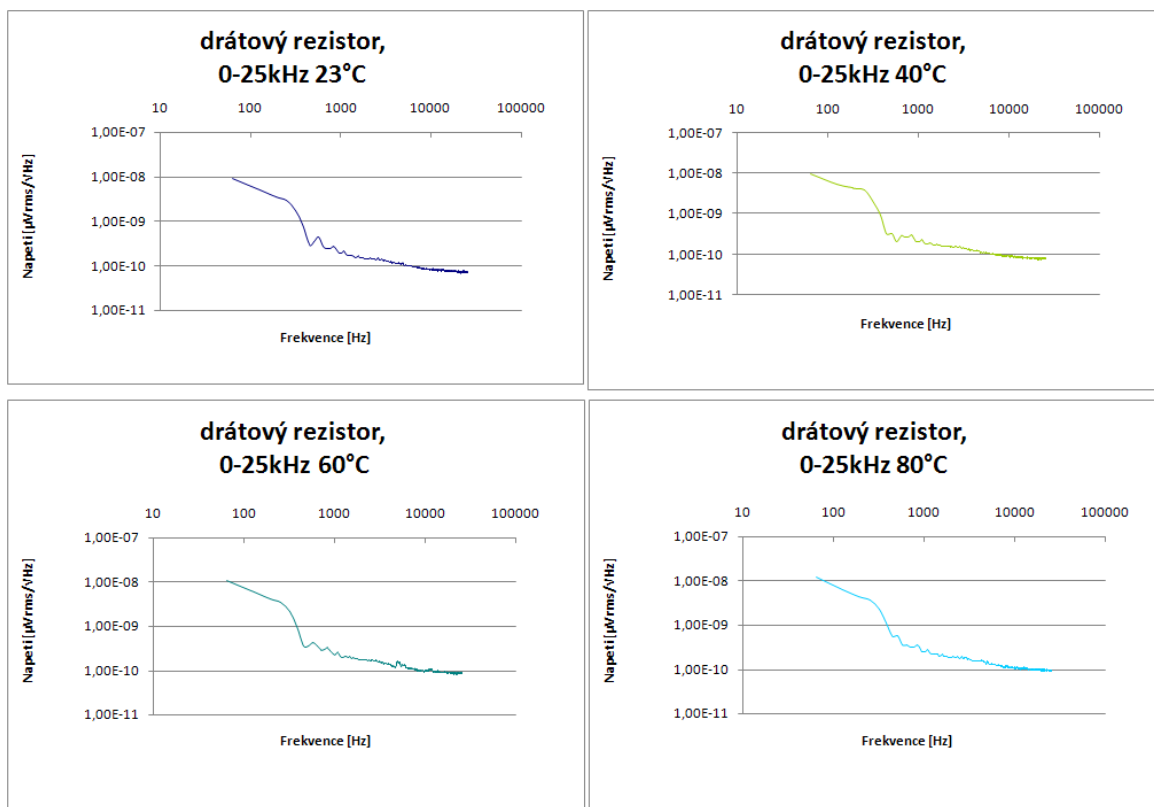
Obrázek 40: Tepelný šum na drátovém rezistoru



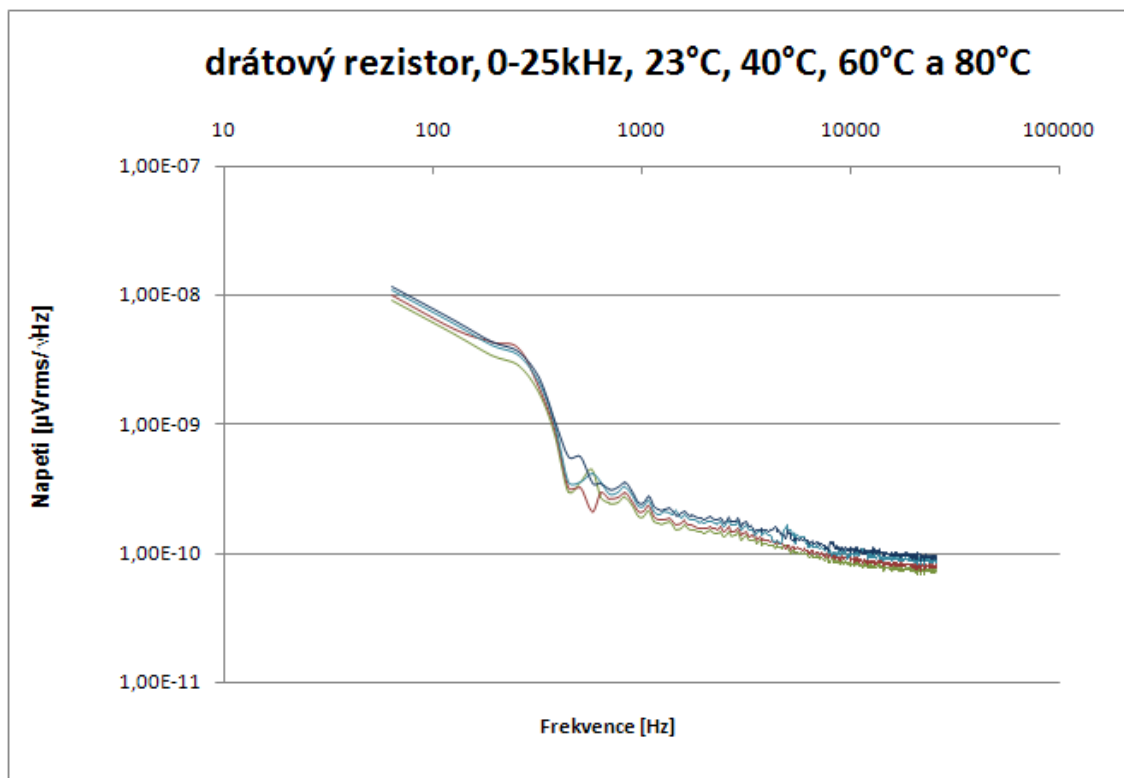
Obrázek 41: Tepelný šum na drátovém rezistoru – souhrnný pohled

5.7.2 Naměřené hodnoty 1/f šumu na drátovém rezistoru

Naopak, 1/f šum měřený na drátovém rezistoru vykazuje solidní charakteristiky a dle očekávání velmi nízké úrovně napětí z čehož můžeme pokládat měření za relevantní a reálné. I zde šum vykazuje závislost na teplotě a to takovou, že s rostoucí teplotou zjišťujeme rostoucí úroveň 1/f šumu. Z měření je zřejmé, že drátový rezistor vykazuje solidní stabilitu v závislosti na teplotě a že průběhy jsou podobné.



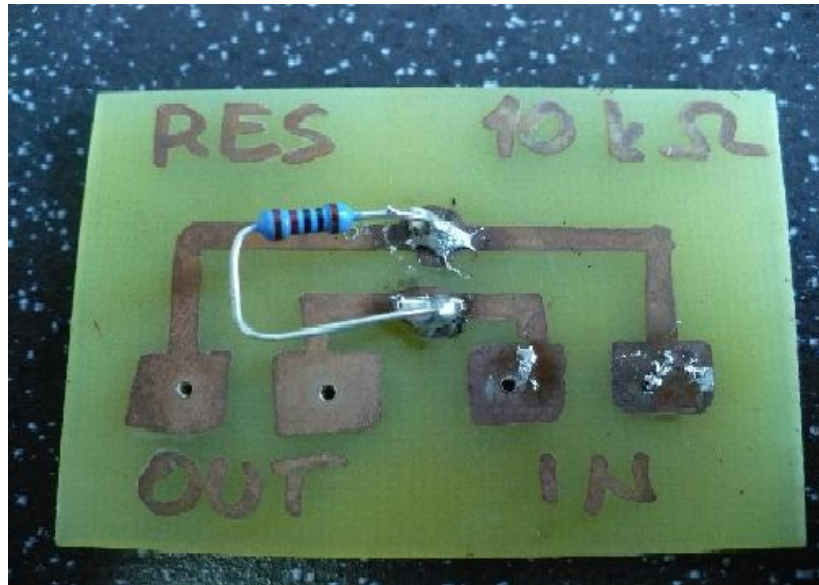
Obrázek 42: 1/f šum na drátovém rezistoru



Obrázek 43: 1/f šum na drátovém rezistoru – souhrnný pohled

5.8 Filmový (fóliový) rezistor

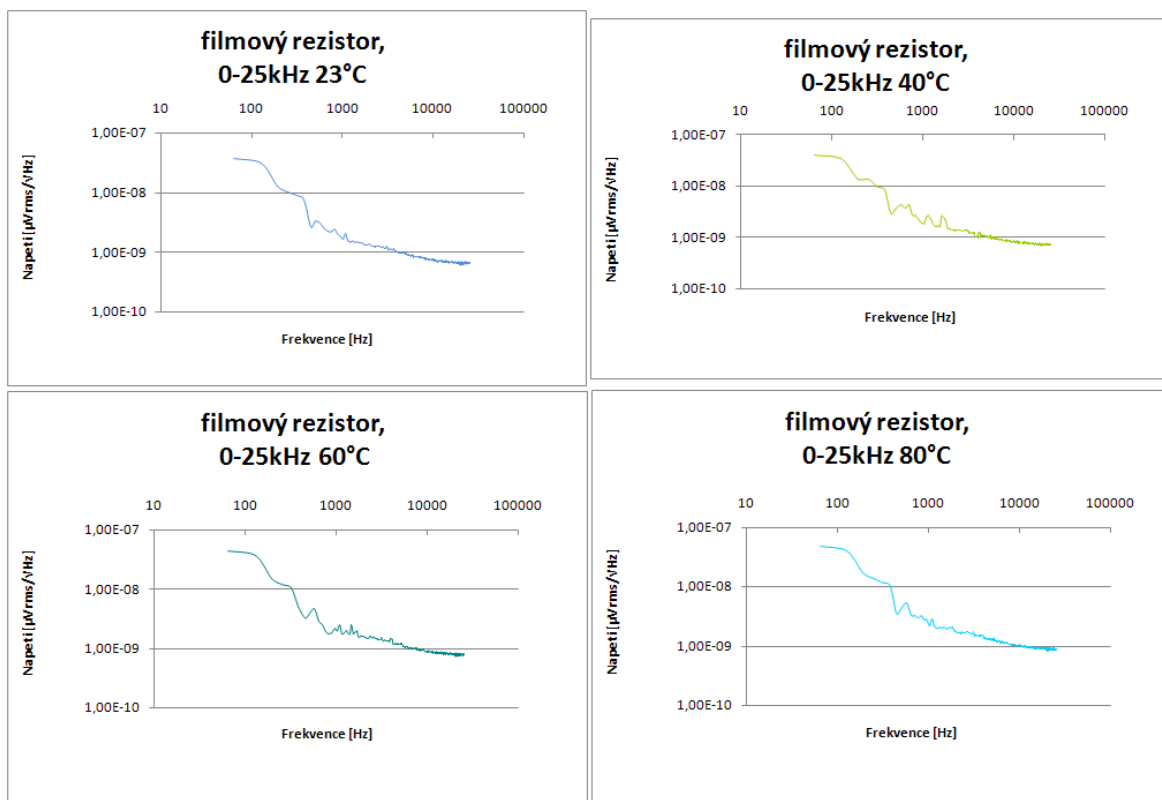
U tohoto typu rezistoru byl měřen pouze $1/f$ šum, jelikož úrovně tepelného šumu vykazovaly tak nízké úrovně, že je bylo možné zaměnit s šumem jednotlivých komponent měřicího obvodu. Proto tepelný šum měřený pro fóliový rezistor není zahrnut do méj diplomové práce.



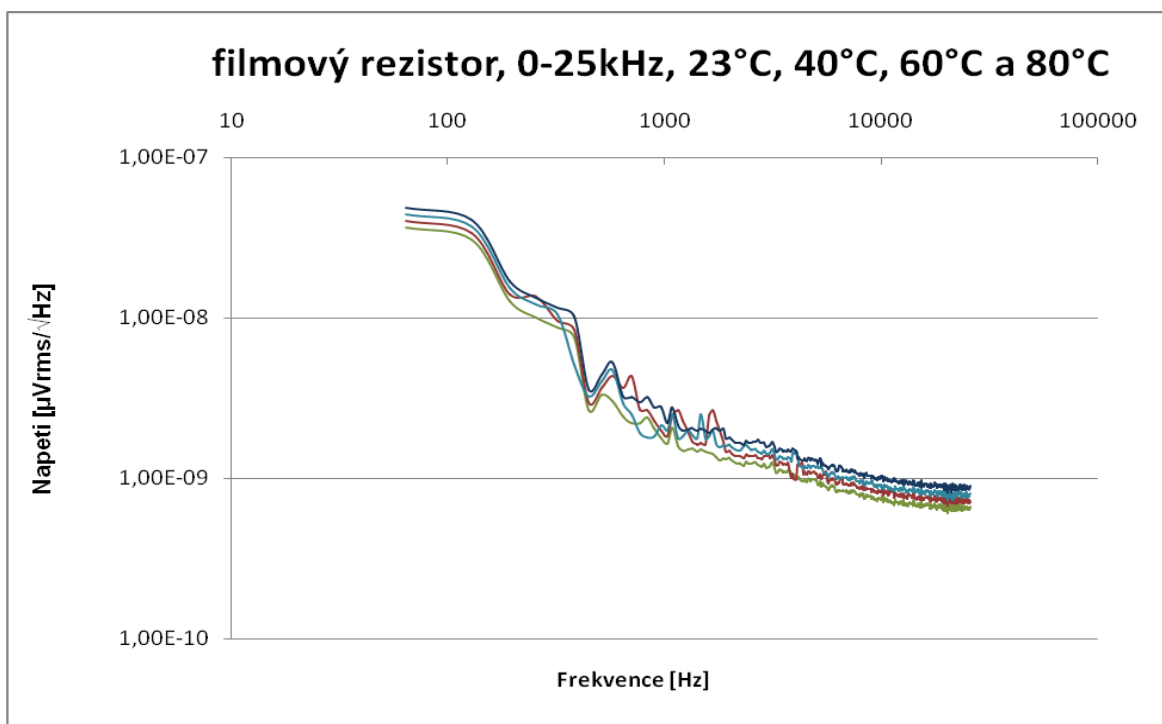
Obrázek 44: DPS nesoucí filmový rezistor

5.8.1 Naměřené hodnoty $1/f$ šumu na filmovém (fóliovém) rezistoru

Hodnoty $1/f$ šumu zjištěné při měření fóliového rezistoru vykazují prudký pokles téměř v celé šíři pásma, a to od 60Hz do 12kHz. Lze vyzorovat jisté paralely ve frekvenčních průbězích z čehož lze usuzovat o tepelné stabilitě fóliového rezistoru z hlediska šumů.



Obrázek 45: 1/f šum na filmovém rezistoru



Obrázek 46: 1/f šum na filmovém rezistoru – souhrnný pohled

6 APLIKACE ZJIŠTĚNÝCH HODNOT V PRŮMYSLU VÝROBY ELEKTROTECHNICKÝCH KOMPONENT

Při výrobě elektrotechnické komponenty je sledováno množství charakteristik - mechanickými rozměry počínaje a elektrotechnickými parametry konče. Jedním z průmyslových požadavků je měření šumových charakteristik vyráběných komponent. Tento požadavek vychází z většího rozšíření aplikací pracujících v oblasti mikrovln a digitálních zařízení.

6.1 Význam měření šumů pro průmysl výroby pasivních komponent

Možnost měření šumů je pro výrobce komponent zásadní z důvodů:

- Výzkumu a vývoje nových produktů, které odpovídají požadavkům trhu
- Kompatibility
- Samotné technologie výroby
- Vstupu na trh – komponenta disponuje vlastnostmi, které jsou v souladu s průmyslovými standardy
- V případě výroby speciálních komponent šumová analýza usnadňuje výrobcům jednodušeji dosáhnout požadavkům klienta.
- After-sale podpora

Nedostatek v jedné nebo více ze zmíněných oblastí způsobuje výkyvy a nepříjemnosti s nedostatečnou spolehlivostí, kvalitou. V konečném výsledku pak toto může mít za následek nutnost zvýšení tržní ceny produktu a tedy sníženou konkurenceschopnost na trhu. Současný trh je zaplaven desítkami majoritních a spíše tisíci minoritních výrobců pasivních komponent. Z těch hlavních je možné jmenovat firmy TDK, Kemet, AVX nebo Samsung. Všechny jmenované firmy se měření šumů věnují programově a to zejména v etapě přípravy výroby komponenty a při jejím uvedení na trh.

6.2 Faktory a východiska výrobců při měření šumů

Měření šumů je vysoce kvalifikovanou činností a pro výrobce je mandatorní zejména z titulu konkurenceschopnosti na poli high-tech aplikací (zejména komunikačních technologií a aerospace technologií). Aby firma mohla podniknout měření šumů a toto

v praxi používat jako jeden z nástrojů k vytváření zisku, musí nicméně disponovat následujícím souhrnem aktiv:

- Přístup ke zdrojům – kapitál, vhodně proškolení zaměstnanci, vybavení a technologie
- Vhodná ochrana zdrojů a know-how - patenty, obchodní značky, strategie péče o zaměstnance
- Vhodná komunikace s klientem a dobře zvládnutá strategie prodeje.

Jenom někteří z výrobců ovšem disponují souhrnem všech aktiv a pro všechny ostatní je pak jen nespelnitelným cílem. Příkladem budiž to, že asijsí výrobci s největší pravděpodobností nikdy nebudou dodavateli pro americké vojenské aplikace z důvodů existence restrikce ITAR.

Měření šumu, respektive měření obecně, hraje speciální roli v ekonomice volného trhu. Ekonomika volného trhu totiž závisí na schopnosti trhu učinit rozhodnutí, která maximalizují ekonomickou efektivitu výroby. V oblastech technologicky náročné výroby (kam výroba pasivních komponent bezesporu patří) jsou informace získané z šumové analýzy použity jako vstup pro posouzení výkonnosti, kvality a tedy jako jedna z informací, na základě nichž se trh rozhoduje. Rozhodnutí a trendy trhu v tomto duchu tedy nemohou být nikdy kvalitnější, než je úroveň například měření šumů.

Z toho tedy vyplývá, že **úroveň a kvalita měření šumů**, respektive měření veličin obecně, **má přímý vliv na tržní podmínky a úspěch nebo neúspěch výrobce.**

6.3 Counterfeit produkty

Trh je také zaplaven obrovským množstvím counterfeit produktů, tedy produktů, které se tváří jako produkty atestované z hlediska šumových charakteristik a z mnoha dalších charakteristik a které se tváří jako výrobky majoritních, rozuměj důvěryhodných, výrobců. Counterfeit výrobky ale pochází téměř bezvýhradně z dílen čínských manufaktur a občas nejsou podrobeny ani vizuální kontrole (pozn. například při výrobě MLCC kondenzátorů je výrobek podroben 100% vizuální kontrole), natož pak testování jak jako PDA (physical destroy analysis). Situace se dá přirovnat k penetraci falešných značek oblečení na českém trhu s oblečením.

Následující obrázek zobrazuje poněkud extrémní případ counterfeit výrobku. Ve dvojici elektrolytických kondenzátorů je levý originálním výrobkem vyrobeným a prodávaným firmou Master. Tento elektrolytický kondenzátor disponuje mimo jiné nominální hodnotou kapacity 6800 μ F. Napravo je naopak čínský counterfeit, vyrobený tak, že do obalu, který se používá pro 6800 μ F kapacitor je umístěn kapacitor o kapacitě 2200 μ F čímž prodávají docílí podvodného snížení nákladů a tedy většího zisku.



Výše uvedený příklad je ale extrémním příkladem. Odlišnosti v counterfeit a originálním výrobku zpravidla bývají výrazně menší. U MLCC kondenzátorů bývá rozdíl zpravidla pouze v chemickém složení dielektrika. Běžně se vyskytuje NPO dielektrikum vydáváno za U dielektrikum. Rozdíl mezi těmito dvěma dielektriky se projeví ve zvýšeném šumu NPO dielektrika. Dalším rozdílem je pak nižší ESR hodnota pro U dielektrikum.

Klient si tedy koupí výrobek, o kterém si myslí, že pochází například od AVX, tento základně otestuje a v krajním případě skutečně použije do své aplikace. Komponenta selže, klient reklamuje nefunkčnost u výrobce a tento musí prokázat, že je výrobek falešný (tedy že ačkoliv nese logo např. AVX, nepochází od tohoto výrobce). Ideální způsob jak toto prokázat je podrobit counterfeit výrobek analýze šumových parametrů a zjištěné hodnoty porovnat s hodnotami referenčními.

ZÁVĚR

Při psaní své práce jsem se zaměřil především na experimentální studium náhodných procesů probíhajících v pasivních elektrotechnických komponentách s cílem najít vztahy a souvislosti mezi materiálem, z něhož je komponenta vyrobena a šumovou charakteristikou této komponenty.

V rámci řešení této problematiky bylo sestaveno polo-automatizované pracoviště, které umožňovalo zamýšlené jevy studovat.

I přes počáteční potíže, které doprovázely měření šumů na elektrotechnických pasivních komponentách, se nakonec podařilo měření realizovat a splnit všechny cíle diplomové práce. Nejvíce problematické se ukázalo být nastavení měřících systémů tak, aby byl měřen skutečný šum komponent a nikoliv šumy generované měřícími přístroji. Problémy při ožívování měřící soustavy plynuly i z omezené funkčnosti komunikačního kanálu mezi PC a frekvenčním analyzátozem SR780. Po výměně kabelu pak problémy odezněly.

Výsledkem práce je série tabulek a grafů zobrazujících průběh tepelného šumu a šumu typu $1/f$ v závislosti na definovaném frekvenčním rozsahu. Tyto parametry byly zjištěny pro tři typy kondenzátorů: jmenovitě se jedná o MLCC kondenzátor, elektrolytický kondenzátor a fóliový kondenzátor. Měření byla dále provedena pro drátový rezistor, uhlíkový rezistor a fóliový rezistor. Hodnocení každého z měření je pak realizováno pod příslušným grafem. Dalším výstupem z této diplomové práce je funkční a použitelná metodika pro měření šumových charakteristik elektrotechnických pasivních komponent. Na FAI doposud probíhalo pouze měření šumů aktivních komponent, tedy diod, FET tranzistorů apod. Existence této diplomové práce je pak důkazem, že lze na FAI měřit i pasivní komponenty.

Měření a získané výsledky byly prezentovány před mými kolegy v AVX Uherské Hradiště. Měření realizovaná v této práci nejsou pro průmyslovou aplikaci dostatečně obsáhlá, nicméně už začínají přípravy v pobočce AVX v Severním Irsku, kterážto disponuje dostatečným přístrojovým zázemím pro měření šumů. Metodika použitá v mojí práci bude tedy používána průmyslově pro měření $1/f$ šumů na MLCC X7R kondenzátorech s flexibilní terminací a pro měření $1/f$ šumů na MLCC X8L kondenzátorech s PdAg terminací.

Jako nejzásadnější výsledek mojí práce vidím to, že poměrně jednoduchý způsob měření šumů přiměl mého zaměstnavatele přehodnotit přístup k dané problematice a má metodika dojde praktického použití.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

My aim when I was writing this diploma work was to experimentally study random processes that occur within passive electronic components. I was also going to find a relation between material which is component made with and noise characteristics which is being generated by this component.

When solving these questions, a semi-automated working place has been constructed that allows study of intended phenomena.

Even if some problems occurred at the beginning, after all I was able to perform measurements and to fulfill all the objectives of the diploma work. It has been found that the most problematic was to set the measurement systems up to measure actual noise as at the beginning I was getting incorrect data – I was measuring a noise that has been generated by measurement equipment and not by the component itself. When setting a measurement system to work, I also had troubles with communication channel between a SR870 and personal computer. These problems were suppressed when a new cable was used.

The outcome from this diploma work is a series of tables and graphs showing a progression of thermal noise and $1/f$ noise within a defined range of frequencies. These types of noises were measured for three types of capacitors – to be specific, these were: MLCC capacitor, electrolytic capacitor and a film capacitor. Then, three types of resistors were measured – a wire resistor, a carbon resistor and a film resistor were tested. Every measurement was evaluated under each graph accordingly. Another outcome from my diploma work is a functional and usable method has been found to measure noise characteristics of passive electro-technic components. Within FAI, only active components measurement has been performed. This diploma work proves also noises on passive components could be measured with FAI's equipment.

Measured data were presented before my colleagues at AVX Uherske Hradiste and I was advised measurements performed within this diploma work should be more extensive. However, preliminary actions are taking place in AVX Northern Ireland to perform similar measurements. My method will be used to measure $1/f$ noise generated by MLCC X7R capacitor terminated with flexible termination and MLCC X8L capacitor fitted with PdAg termination. I consider this the most imperative result of my diploma work.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Tantalum capacitor [online], dostupný z http://en.wikipedia.org/wiki/Tantalum_capacitor >
- [2] Operating Manual and Programming reference for ASR780 [online], dostupný z <http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Manuals/SR780m.pdf>
- [3] Noise in analog circuits [online], dostupný z http://hamers.chem.wisc.edu/chem628_fall2005/noise/analog_circuit_noise.pdf >
- [4] C.A. Harper, Passive Electronic Components Handbook, McGraw-Hill, 2nd Edition, 1997, 142 s.
- [5] C.A. Lee and G.C. Dalman, Microwave Devices, Circuits and their Interaction, Wiley-Interscience Publication, New York, 1994, 33 s.
- [6] N. Coda and J. Selvaggi, Design Considerations for High Frequency Chip Capacitors, IEEE Trans. On Parts, Hybrids and Packaging, Vol.PHP-12, No.3, , 1976, s. 206-212
- [7] A.J. Baden Fuller, Microwaves, Pergamon Press, 2nd Edition, UK, 1988. 311 s.
- [8] Agilent High-Frequency Structure Simulator 5.6 – User’s Guide, Agilent Technologies - 85180-90194, September 2000. s. A1-A3
- [9] 25 th Anniversary Edition: Scientific and Engineering Instruments. U.S.A.: Stanford Research Systems, Inc., 2005.212 s.
- [10] G. Vasilescu, Electronic noise and interfering signals, Dunod Edior’s, 2005, 709 s.
- [11] D.C Smith, High Frequency Measurements and Noise in Electronic Circuits, Kluwer Academic Publishers, 1993, 662 s.
- [12] B. Owen, Electronics: A First Course, 3rd Edition, Newnes, 2010, 367 s.
- [13] S. Laszlo, W. Donald, Electrical Properties of Materials, 8th Edition, Oxford University Press, 2010, 498 s.
- [14] A. Helmy, M. Ismail, Substrate Noise Coupling in RFICs, Springer, 2008, 501 s.

- [15] M. von Haartman, M. Östling, Low-Frequency Noise in Advanced MOS Devices, Springer 200
- [16] R.M. Howard, Principles of Random Signal Analysis and Low Noise Design: The Power Spectral Density and its Applications, Wiley-IEEE Press, 2002, 781 s.
- [17] A. Van der Ziel, Noise in Solid State Devices and Circuits, Wiley-Interscience 1986.
- [18] MODEL SR570, Low-Noise Current Preamplifier [online], dostupný z < <http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Manuals/SR570m.pdf> >

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Rezistor jako zdroj šumu.....	14
Obrázek 2: Změna šumového proudu v závislosti na teplotě	17
Obrázek 3: Výstřelový šum.....	18
Obrázek 4: Gaussova křivka	19
Obrázek 5: Šumová spektrální hustota rezistoru	20
Obrázek 6: Schéma reálného rezistoru	26
Obrázek 7: Ukázka různých typů rezistorů.....	28
Obrázek 8: Náhradní schéma kondenzátoru	31
Obrázek 9: Vnitřní struktura MLCC kondenzátoru	32
Obrázek 10: Tantalový kondenzátor	33
Obrázek 11: Elektrolytický kondenzátor	34
Obrázek 12: Single pack vs. CapArray řešení	35
Obrázek 13: Frekvenční analyzátor SR870.....	36
Obrázek 14: Čelní panel analyzátoru SR870	Chyba! Záložka není definována.
Obrázek 15: Vstupně / výstupní konektory na analyzátoru	37
Obrázek 16: Grafické znázornění PSD	39
Obrázek 17: Předzesilovač SR570.....	41
Obrázek 18: Schéma zapojení pro měření tepelného šumu	44
Obrázek 19: Fixtura pro měření SMD komponent	48
Obrázek 20: DPS nesoucí MLCC NPO 1.0nF	51

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: typy dielektrik u MLCC kondenzátoru	32
Tabulka 2: střední hodnoty tepelného šumu, který generuje elektrolytický kondenzátor	56
Tabulka 3: střední hodnoty tepelného šumu, který generuje filmový kondenzátor	61
Tabulka 4: střední hodnoty tepelného šumu, který generuje uhlíkový rezistor	64