

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra telekomunikační techniky**

**Šumové generátory**

**The Noise Generators (Noise Sources)**

**2014**

**David Mimlich**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání bakalářské práce

Student: **David Mimlich**  
Studijní program: **B2647 Informační a komunikační technologie**  
Studijní obor: **2612R059 Mobilní technologie**  
Téma: **Šumové generátory**  
**The Noise Generators (Noise Sources)**

Zásady pro vypracování:

Šumové generátory jsou nepostradatelné při hodnocení šumových parametrů zesilovačů, směšovačů a dalších částí telekomunikačního řetězce.

1. Proveďte literární rešerši na dané téma.
2. Popište druhy šumů včetně jejich matematické definice.
3. Proveďte rozbor šumů elektronických součástek.
4. Vysvětlete princip měření šumového čísla  $F$ , uveďte schéma.
5. Navrhněte a prakticky realizujte zdroj bílého šumu pro kmitočtový rozsah do 100 kHz.

Seznam doporučené odborné literatury:

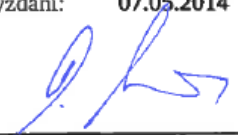
Žalud, V., Kulešov, V., N.: Polovodičové obvody s malým šumem  
Matyáš, V.: Měření, analýza a vytváření náhodných procesů  
Budějický, J., Klíma, F.: Šum elektronických obvodů  
Levin, B., R.: Teorie náhodných procesů a její aplikace v radiotechnice

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Karel Witas**

Datum zadání: **01.09.2013**

Datum odevzdání: **07.05.2014**

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry




  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 6. května 2014

  
.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Touto cestou bych velice rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Karlu Witasovi za pomoc a veškerý čas, který mi věnoval, odborné rady a vstřícný přístup během zpracování bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Tato práce pojednává o šumu a šumových generátorech. Cílem této práce je navrhnout a prakticky realizovat generátor bílého šumu do 100 kHz. Na tomto základě jsem se zaměřil na realizaci generátoru šumu s žárovkou, která zde plní úlohu zdroje šumu, konkrétně její rozžhavené vlákno. Práce je rozdělena na dvě části, teoretickou a praktickou. Teoretická část obsahuje pojmy, které se týkají charakteristiky šumu. Rozdělení šumu v závislosti na spektru a fyzikální podstatě. Jak jednotlivé šумы vznikají a kde se dají využít. Rovněž přehled nejpoužívanějších šumových součástí a jejich použití v šumových generátorech. Následně je vysvětleno šumové číslo, výpočet šumového čísla a možný způsob měření šumového čísla. Praktická část obsahuje návrh šumového generátoru, jeho zapojení a následné měření generovaného šumu se zaznamenanými výsledky do grafů.

## **Klíčová slova**

generátor šumu; měření; šum; šumové číslo; šumové součástky; žárovka

## **Abstract**

This thesis deals with the noise and the noise generators. The aim of this thesis is to design and practically implement white noise generator to 100 kHz. On this basis, I focused on the implementation of a noise generator with a light bulb, which plays a role of a noise source, specifically the hot filament. The thesis is divided into two parts, theoretical and practical. The theoretical part explains terms which are related to the characteristics of the noise. Distribution of noise depending on the spectrum and physical nature. How different noises originate and where they can be used. Also, an overview of the most common noise components and their use in noisy generators. Subsequently is explained noise figure, calculation of noise figure and a possible way of measuring noise figure. The practical part contains a design of noise generator, his involvement and subsequent measurement of noise generated by the results recorded in the charts.

## **Key words**

noise generator; measurement; noise; noise figure; noise components; bulb

# Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
B	Hz	Šumová šířka pásma
C	F	Elektrická kapacita
e	$1,6021710^{-19}\text{C}$	Náboj elektronu
F	-	Šumový činitel
f	Hz	Kmitočet
F <sub>db</sub>	dB	Šumové číslo
G	-	Zisk
I	A	Proud
k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ [J/K]}$	Boltzmannova konstanta
L	H	Indukčnost
P	W	Výkon
P <sub>N</sub>	W	Šumový výkon
R	$\Omega$	Odpor
T	K	Teplota
T <sub>e</sub>	K	Ekvivalentní šumová teplota
U	V	Napětí

# Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
AF	Exponent blikavého šumu
DUT	Device Under Test, Měřený dvojbran
ENR	Excess Noise Ratio, Poměr nadbytečného šumu
KF	Koeficient blikavého šumu
NFM	Noise Figure Meter, Měřič šumového čísla
NS	Noise Source, Zdroj šumu
SNR	Signal to Noise Ratio



# Obsah

Úvod.....	- 11 -
1    Šum .....	- 12 -
1.1    Charakteristika šumu ve frekvenční oblasti .....	- 13 -
1.2    Charakteristika šumu v časové oblasti .....	- 13 -
1.3    Míra šumu .....	- 13 -
1.4    Šumová teplota obvodu .....	- 14 -
1.5    Šumová šířka pásma.....	- 14 -
1.6    Rozdělení šumu .....	- 14 -
2    Druhy šumů .....	- 15 -
2.1    Tepelný šum (Thermal noise).....	- 15 -
2.2    Výstřelový šum (Shot noise) .....	- 15 -
2.3    Praskavý šum (Popcorn noise) .....	- 16 -
2.4    Blikavý šum (Flicker noise) .....	- 16 -
3    Šum podle závislosti na spektru .....	- 17 -
3.1    Bílý šum .....	- 17 -
3.2    Barevný šum.....	- 18 -
3.2.1    Fialový šum .....	- 18 -
3.2.2    Hnědý šum.....	- 18 -
3.2.3    Růžový šum .....	- 19 -
3.2.4    Oranžový šum.....	- 20 -
3.2.5    Červený šum.....	- 20 -
3.2.6    Zelený šum .....	- 20 -
3.2.7    Šedý šum .....	- 20 -
3.2.8    Černý šum.....	- 21 -
4    Šum elektronických součástek .....	- 22 -
4.1    Rezistory.....	- 22 -
4.2    Žárovka.....	- 23 -
4.3    Diody .....	- 23 -
4.4    Tranzistory .....	- 24 -

4.4.1	Unipolární.....	- 24 -
4.4.2	Bipolární.....	- 24 -
5	Šumového číslo .....	- 25 -
5.1	Výkonová definice .....	- 25 -
5.2	Ekvivalentní šumová teplota .....	- 26 -
5.3	Friisův vztah.....	- 26 -
5.4	Šumové číslo pro pasivní prvky .....	- 27 -
5.5	Měřič šumového čísla HP8970A.....	- 28 -
5.6	Zdroj šumu HP346B.....	- 28 -
6	Princip měření šumového čísla .....	- 30 -
6.1	Kalibrace a korekce.....	- 31 -
7	Návrh šumového generátoru .....	- 32 -
7.1	Vybavení k realizaci generátoru.....	- 33 -
7.2	Měření šumu žárovky.....	- 35 -
7.2.1	Výpočet výkonové spektrální hustoty .....	- 35 -
7.2.2	Výpočet ENR .....	- 35 -
7.2.3	Šumový výkon žárovky pro tlumivky .....	- 35 -
7.2.4	Grafické zobrazení pro tlumivku 36W ELT B2 .....	- 36 -
7.2.5	Grafické zobrazení pro dvě tlumivky .....	- 37 -
	Závěr .....	- 38 -
	Použité zdroje.....	- 39 -

## Úvod

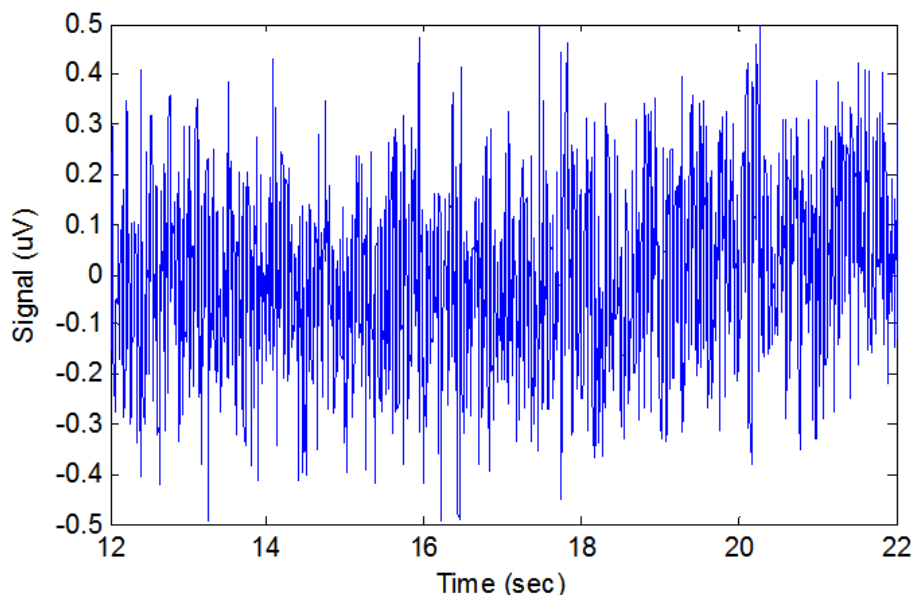
Generátory šumu jsou zařízení používané nejen v elektrotechnice, ale také v domácnostech pro běžné užití k podpoře spánku nebo jako možnost proti odposlechu. Rovněž se šumu využívá u vozidel se sirénou, jelikož šum umí ostatními zvuky proniknout a nezpůsobí ozvěnu. Díky téhle vlastnosti můžeme snadno identifikovat polohu vozidla.

Cílem této práce je navrhnout a prakticky realizovat generátor bílého šumu do 100 kHz. Za těchto podmínek byl navržen generátor šumu se žárovkou, u kterého se jako zdroje šumu využívá rozžhaveného vlákna žárovky. Generátor byl navržen na základě jednoduchosti provedení, možnosti měření teploty vlákna žárovky a rovněž možnosti vypočtení její hodnoty šumu.

Kapitola 1 se zaměřuje na základní popis šumu, jeho vlastností a rozdělení. Následně přiblížení pojmů, jako šumová teplota obvodu, míra šumu a výpočet šumové šířky pásma. Kapitoly 2 a 3 obsahují rozdělení šumů podle barev a fyzikální podstaty. Zaměřují se podrobněji na vlastnosti a tvar šumu. Jak jednotlivé šумы vznikají a kde se dají využít. V kapitole 4 jsou přiblíženy nejčastější součástky používané jako zdroj šumu, jejich typické vlastnosti a následná ukázka použití v šumovém generátoru. V kapitolách 5 a 6 se seznámíme s šumovým číslem, jeho výpočtem a možností samotného měření. Poslední kapitola již obsahuje navržený generátor šumu, ukázkou zapojení a následné měření generovaného šumu.

# 1 Šum

Šum je náhodný signál, který narušuje zpracování a přenos užitečného signálu. Je signálem nahodilé okamžité amplitudy, která má časově neměnné statistické vlastnosti. Šum prakticky registrujeme u všech elektronických obvodů [9].



Obrázek 1.1: Šum - ukázka [13]

V senzorové technice šum představuje elektrický signál, který ruší původní, snímáný signál. Rozlišujeme aditivní šum, který vzniká superpozicí na signál snímače a konvoluční šum, vznikající modifikací signálu snímače nejčastěji při přenosu. Šum je však i sám o sobě signál, který nese určité informace od zdroje rušení. Zabývat se šumem je důležité zejména tehdy, když způsobené rušení může ovlivnit informaci obsaženou v šumu (originální signál) nebo pokud samotná informace je v šumu "utopená" a je třeba ji získat a rekonstruovat. Úspěšnost metody zpracování šumu závisí především na schopnosti charakterizovat šum, vytvoření vhodného modelu šumu a vhodného využití získaných charakteristik na rozlišení sledovaného signálu od šumu [2].

Šum může být dočasný nebo trvalý. Dočasný šum je způsoben vlivem jiného systému, zdroje rušení, na signál po krátkou dobu vzhledem k délce sledování signálu. Stálý šum je přítomen po celou dobu sledování signálu. Zdrojem takového šumu může být například 50 Hz rušení (a jeho harmonické násobky) od spotřebičů v elektrické síti [2].

Z hlediska zdroje rozlišujeme šum vnitřní a vnější. Vnitřní šum je způsoben samotným sledovaným systémem (například tepelný šum). Vnější šum má zdroj mimo sledovaného systému (přírodní zdroje, elektromagnetická interference od jiných systémů) [2].

### 1.1 Charakteristika šumu ve frekvenční oblasti

- Spektrální charakteristiky jsou v čase relativně stálé a dobře měřitelné. Lze z nich odvodit výkon šumu soustředěný v určitém kmitočtovém pásmu, efektivní hodnotu šumu a pravděpodobnou mezivrcholovou hodnotu šumu.
- Šumová analýza je analýza výkonu šumu, který porovnáváme s výkonem užitečného signálu.
- Počítáme s normovanými výkony do odporu  $1 \Omega$ . Normovaný výkon se počítá z druhé mocniny  $U$  nebo  $I$ . V obou případech vychází číselně stejně. Jeho jednotka je udávána buď v  $[A^2]$  nebo  $[V^2]$  [2].

### 1.2 Charakteristika šumu v časové oblasti

- Nejpravděpodobnější hodnota šumu je nula, což je současně průměrná - střední hodnota šumu. Hodnoty šumu „velmi vzdálené“ od nuly jsou málo pravděpodobné.
- Směrodatná odchylka  $\sigma$  je efektivní hodnota šumu.
- Disperze  $D$  je činný výkon šumu do jednotkového odporu.
- Rozložení této pravděpodobnosti je popsáno Gaussovou křivkou. Štíhlost křivky je řízena její parametrem  $\sigma$ , což je tzv. směrodatná odchylka šumu.
- Plocha pod celou křivkou je jednotková, čemuž odpovídá stoprocentní pravděpodobnost, že mezivrcholová hodnota šumu se bude nacházet někde v intervalu šumových napětí  $(-\infty, +\infty)$
- Pravděpodobnost, že šumový signál překročí hladiny  $\pm 2,5 \sigma$ , nebo že jeho mezivrcholová hodnota nebude větší než  $5 \sigma$ , je pouze asi 1,2 %. Pro  $6 \sigma$  je pravděpodobnost pouze 0,27 % a pro  $10 \sigma$  vychází 6,10<sup>-5</sup> %.
- Koeficient SNR (Signal to Noise Ratio) je definován jako poměr výkonu signálu (užitečný signál) k šumovému pozadí (nežádoucí signál). Používá se ke kvantifikaci míry poškození signálu šumem [2].

### 1.3 Míra šumu

Jedná se o veličinu, podle které jde určit příhodné pořadí dvojbranů v kaskádě, pokud mají dvojbrany v obvodu odlišná šumová čísla a rovněž odlišná výkonová zesílení. Dvojbrany řadíme v zapojení od dvojbranu s nejnižší mírou šumu na vstupu kaskády po dvojbran s nejvyšší mírou šumu na konec kaskády a to z důvodu co nejnižšího šumového čísla daného zapojení [9].

$$M_i = F_i - 1 / \left( 1 - \frac{1}{A_i} \right) \quad (1.1)$$

## 1.4 Šumová teplota obvodu

Veličina vhodná pro obvody, které mají velmi malé šumové číslo [9].

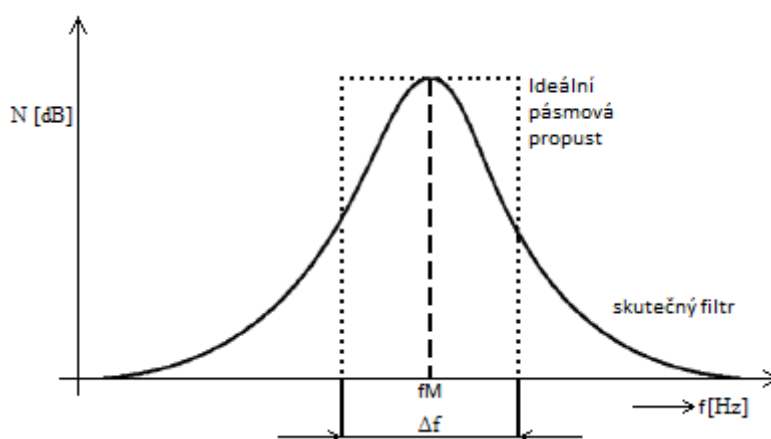
$$T = (F - 1) \cdot T_0 \quad (1.2)$$

$T_0$  ... teplota 290 K

## 1.5 Šumová šířka pásma

Je dána vztahem:

$$B_N = \frac{1}{p(f_0)} \int_0^\infty p(f) df \quad (1.3)$$



Obrázek 1.2: Šumová šířka pásma [9]

## 1.6 Rozdělení šumu

Tabulka 1.1: Rozdělení šumu

Podle závislosti na spektru	Podle fyzikální podstaty
Barevný šum	Tepelný šum (Johnsonův šum)
Bílý šum	Výstřelový šum
	Praskavý šum
	Blikavý šum

## 2 Druhy šumů

### 2.1 Tepelný šum (Thermal noise)

Taktéž známý jak Johnsonův nebo Nyquistův šum. Tepelný šum je přirozený šum vyplývající z termodynamiky látek a kvantové povahy elektrického náboje. Vzniká jako důsledek náhodného tepelného pohybu nábojů v elektrických vodičích a rezistorech. Teplota musí být větší než 0 Kelvinů. Tepelný šum vzniká bez ohledu na připojený vnější zdroj napětí nebo proudu. Není možné jej odstranit stíněním nebo uzemněním vodiče. Lze jej eliminovat chlazením. Teorie tepelného šumu je založena na teplotně - závislém pohybu volných nosičů náboje. Přestože průměrný pohyb částic, který vytváří náhodné proudy, se blíží k nule, protože se pohybují různými směry (pokud není připojeno napětí), jejich kmitání vytváří tepelný šum. Zahřívání vodiče vyvolané nárůstem teploty okolí způsobí nárůst rychlosti pohybu volných nosičů náboje - elektronů a tím i nárůst proudů. Se zvyšující teplotou tedy teplotní šum narůstá. Při předpokladu konstantního odporu a teploty je teplotní šum stacionární proces s Gaussovým rozdělením výkonového spektra. Jde tedy o bílý šum.

Spektrální výkonová úroveň je konstantní přibližně na kmitočet 100 THz [3][7][9].

$$p_T(f) = \frac{P_T}{B_N} = k \cdot Tz \quad (2.1)$$

### 2.2 Výstřelový šum (Shot noise)

Někdy užívaný pod názvem Schottkyho šum. Nachází se v součástkách, které obsahují PN přechod. Výstřelový šum v elektrickém obvodu spočívá z náhodných změn elektrického proudu ve vodiči. Způsobuje ho fakt, že proud je veden částicemi s diskretním elektrickým nábojem, které se mění. Tedy proud protékající vodičem není kontinuální. Šum je intenzivnější s narůstající hodnotou protékajícího proudu ve vodiči. Výstřelový šum je možné pozorovat například i při toku fotonů v laserovém paprsku, rekombinaci elektronů a děr v polovodičích. Výstřelový šum je odlišný od tepelného šumu. Tepelný šum vzniká ve vodiči bez připojeného vnějšího zdroje napětí a bez protékajícího proudu. Výstřelový šum je přítomen pouze při protékání proudu vodičem. Tento šum není možné eliminovat, protože je přirozenou součástí pohybu částic. Ve srovnání tepelný šum může být redukován snížením teploty zařízení. Koncept náhodného pohybu nabitých částic naznačuje, že výstřelový šum může být popsán Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti. Elektrický proud považujeme za tok diskretních elektricky nabitých částic, který není kontinuální a náhodně kolísá. Pokud elektrony postupují nezávisle na sobě, je efektivní hodnota proudu vyvolaná šumem dána [3][7]:

$$I_n = \sqrt{2eI\Delta f} \quad (2.2)$$

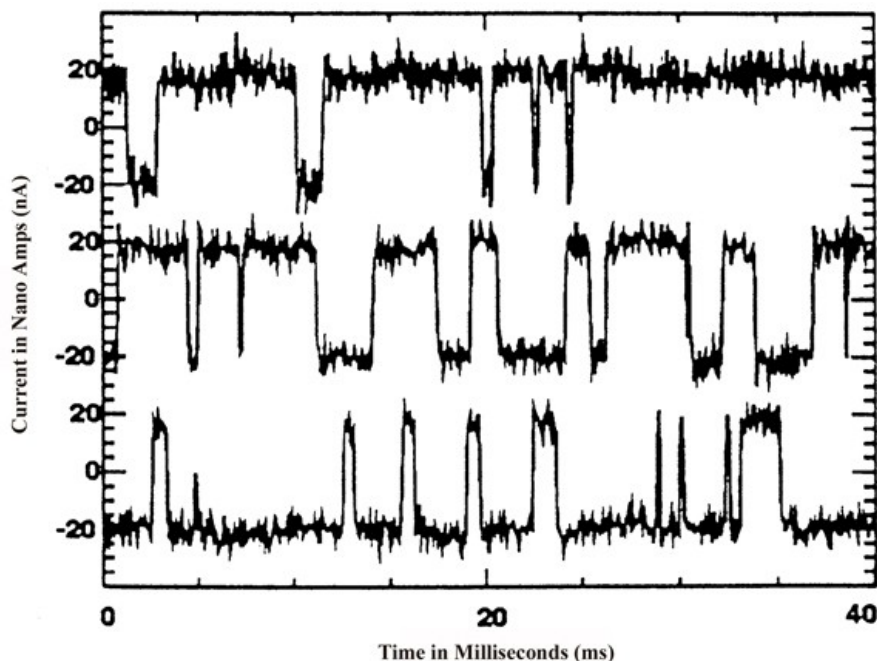
kde náboj elektronu  $e = 1,6021710^{-19} \text{C}$

Střední kvadrát výstřelového šumu [9]:

$$I_V^2 = 2 \cdot q \cdot I_{DC} B_N = 2 \cdot 1.602 \cdot 10^{-19} I_{DC} B_N \quad (2.3)$$

### 2.3 Praskavý šum (Popcorn noise)

Vznikne v přechodu mezi bází a emitorem díky znečištění ionty těžkých kovů. S rostoucí frekvencí se zároveň snižuje spektrální hustota výkonu. Jedná se znovu o  $1/f$  šum. Skáče napříč šumovými úrovněmi. Má krátkou dobu trvání v řádech pár mikrosekund až sekund [9].



Obrázek 1.3: Ukázka Praskavého šumu [12]

### 2.4 Blikavý šum (Flicker noise)

Bývá způsoben poruchou v krystalové mřížce a nečistotami v polovodičích. S rostoucím kmitočtem klesá spektrální hustota výkonu. Je označován jako šum  $1/f$ . Vzniká v oblasti PN přechodu. Dá se říci, že se objevuje v každém elektronickém obvodu. Je zaznamenán při stejnosměrném proudu a u nižších frekvencí [8][9].

Je nepřímo úměrný kmitočtu:

$$I = \sqrt{KF \cdot I^{AF}/f} \quad (2.4)$$

KF ... je koeficient blikavého šumu

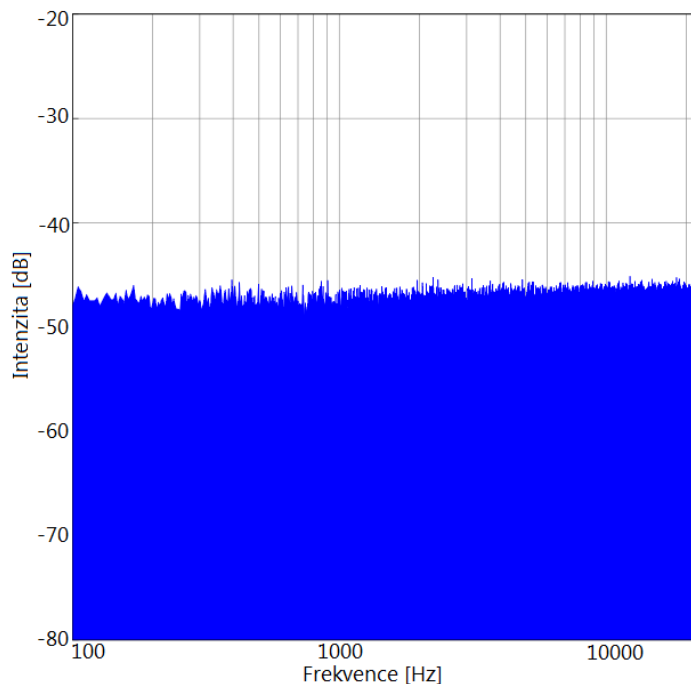
AF ... exponent pro blikavý šum



### 3 Šum podle závislosti na spektru

#### 3.1 Bílý šum

Je to náhodný šum, který obsahuje stejné množství energie ve všech frekvenčních pásmech. Spektrální výkonová hustota je konstantní. Frekvenční pásma, která jsou shodně široká, mají také stejnou energii. Když si například vezmeme frekvenční rozsah 30 Hz tak mezi 30 Hz a 60 Hz nabývá stejné energie jako frekvenční rozsah mezi 300 Hz a 330 Hz.



Obrázek 2.1: *Spektrum Bílého šumu. Ploché výkonové spektrum [17]*

V teorii se u bílého šumu uvádí vlnový rozsah signálu jako nekonečný, ale z praktického hlediska jej lze označovat za bílý šum za podmínky, že jeho ploché spektrum je v definovaném frekvenčním rozsahu.

Používá se například v elektronické hudbě, a to buď přímo jako zvukový efekt nebo jako základ pro vytvoření syntetizovaných zvuků. Bílý šum se také používá pro maskování jiných zvuků. Tento proces využívá výhody toho, jak funguje lidský mozek - mozek je schopen vyčlenit jednoduché frekvenční rozsahy, ale má potíže, když slyší příliš mnoho frekvencí najednou. Je-li přítomen bílý šum, ostatní zvuky se zmenší. Komerčně je k dispozici na CD a je na trhu uváděn jako redukce šumu nebo pomoc při spaní. V audio systémech se šířkou pásma 10 kHz jakékoliv ploché spektrum, které má rovnou nebo větší šířku jak 10 kHz vypadá jako bílý šum [17][18][19].

Autokorelační funkce šumového procesu se spojitým průběhem rovněž nulovou střední hodnotou a disperzí  $\sigma^2$  je delta funkce a je dána vztahem:

$$r_{NN}(T) = E[N(t)N(t + T)] = \sigma^2 \cdot \delta(T) \quad (3.1)$$

Pokud použijeme Fourierovu transformaci na předchozí vztah, dostaneme rovnici pro výkonové spektrum bílého šumu:

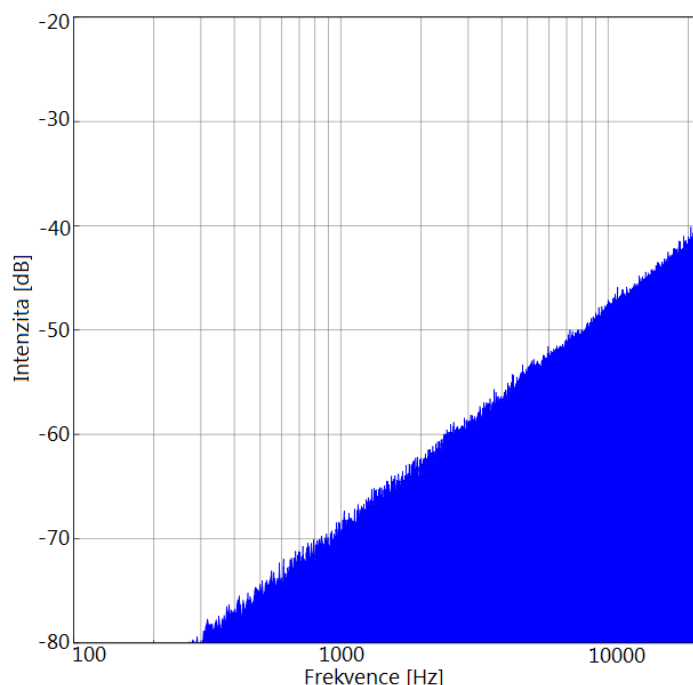
$$P_{NN}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} r_{NN}(t)e^{-j2\pi ft}dt = \sigma^2 \quad (3.2)$$

## 3.2 Barevný šum

V měření signálu se vyskytují mnohé další rušení, které jsou označovány jako barevný šum. Pojmem barevný šum vyjadřuje jakýkoliv šum, který neodpovídá bílému šumu. I bílý šum přecházející informačním kanálem je „zabarvený“ tvarem frekvenční odezvy kanálu. Nejznámější barevné šumy jsou růžový šum a hnědý šum [3].

### 3.2.1 Fialový šum

Je také zván purpurovým šumem.



Obrázek 2.2: *Spektrum fialového šumu (+6 dB/octave) [17]*

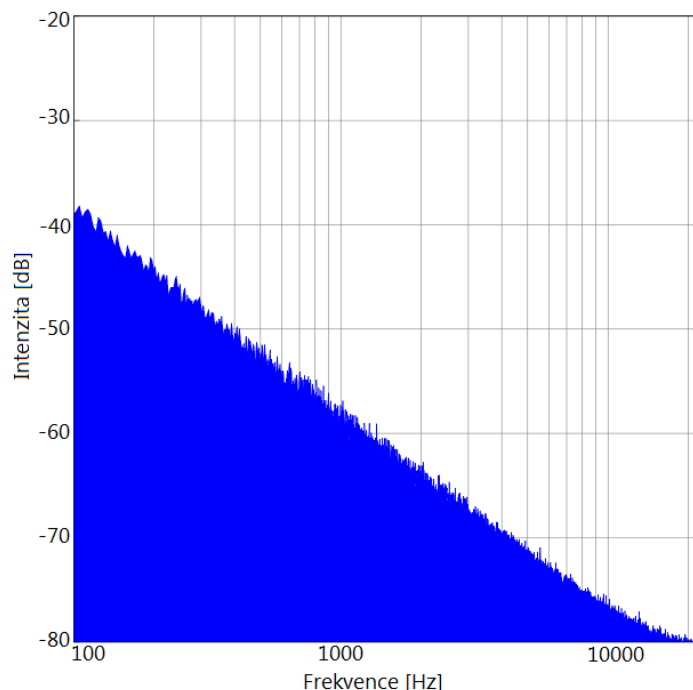
Je podobný hnědému šumu s výjimkou, že u fialového šumu se výkonová frekvenční hustota zvyšuje o 6dB na oktávu. Frekvence se zvyšuje až do konce frekvenčního rozsahu. Z technického hlediska je hustota přímo úměrná  $f^2$  [20].

### 3.2.2 Hnědý šum

Má určitou podobnost s růžovým šumem s rozdílem, že se výkonová frekvenční hustota snižuje o 6 dB na oktávu. Frekvence se zvyšuje na frekvenční rozsah bez stejnosměrného proudu. Hustota je úměrná  $1/f^2$ .

Je to náhodný šum, který je generován algoritmem simulujícím Brownův pohyb. Podle Brownova pohybu je taky inspirován název Hnědý (Brown) šum. Není pojmenován podle spektra hnědé barvy, což by se na první pohled zdálo. Uvádí se také pod názvy „random walk noise“ nebo „drunkard's walk noise“.

Lidskému uchu je podobný bílému šumu ale na nižší frekvenci. Jako příklady v přírodě si můžeme uvést vlny na pláži nebo šum větru [17][18][21].



Obrázek 2.3: *Spektrum hnědého šumu ( $-6$  dB/octave) [17]*

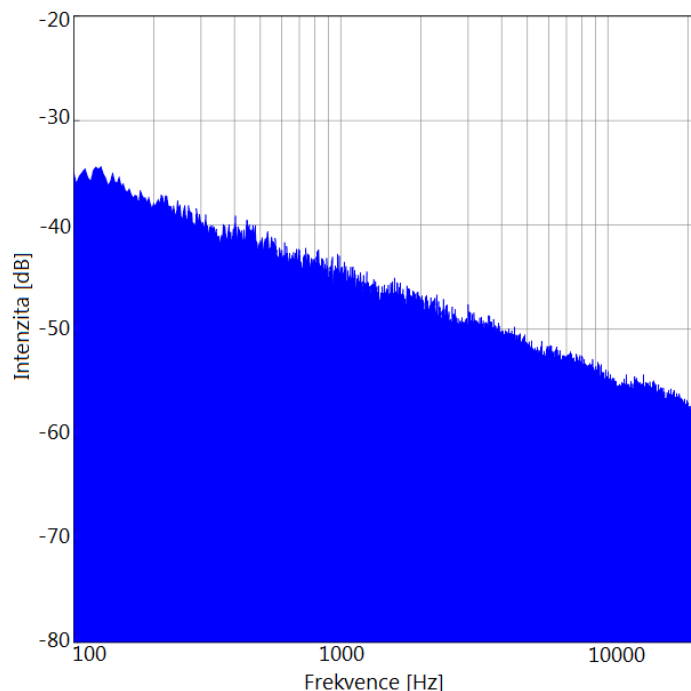
### 3.2.3 Růžový šum

Je rovněž nazýván jako „ $1/f$  šum“. Podle svých vlastností se nachází mezi bílým a červeným šumem. Lidé lehce po zvuku poznají rozdíl mezi bílým a růžovým šumem.

Růžový šum může být vytvořen přidáním bílého šumu skrz růžový filtr, který odstraní více energie při zvyšování frekvence. (přibližně 3 dB na oktávu). Výkonová frekvenční hustota růžového šumu je přímo úměrná převrácené frekvenční hodnotě. To znamená, že když frekvenci zdvojnásobíme, energie klesne o 3 dB.

Vyskytuje se v mnoha fyzikálních, biologických a ekonomických systémech. Někteří výzkumníci jej popisují jako všudypřítomný.

Zvukoví inženýři používají růžový šum k testu, zda má systém plochou frekvenční odezvu. Rovněž například k testu zesilovačů, předzesilovačů a reproduktorových systémů. Je užitečný zdroj širokopásmového signálu, jenž pokrývá celé akustické pásmo [6][17][18][22].



Obrázek 2.4: *Spektrum růžového šumu [17]*

### 3.2.4 Oranžový šum

Je to skoro-stálý šum, který je ukončený výkonovým spektrem s určitým počtem menších skupinek nulové energie rovnoměrně rozprostřeném po spojeném spektru. Tyhle malé skupinky nulové energie se nachází kolem frekvencí hudebních not ve všech stupnicích. Z důvodu eliminace sladěných hudebních not se zdá, že se zbylé spektrum skládá z trpkých a pomerančových not [18][23].

### 3.2.5 Červený šum

Červený šum je další název pro hnědý šum a růžový šum.

Většinou se pod názvem červený šum uvádí šum od vzdálených zdrojů a to díky absorbování větších kmitočtů oceánem [18][24].

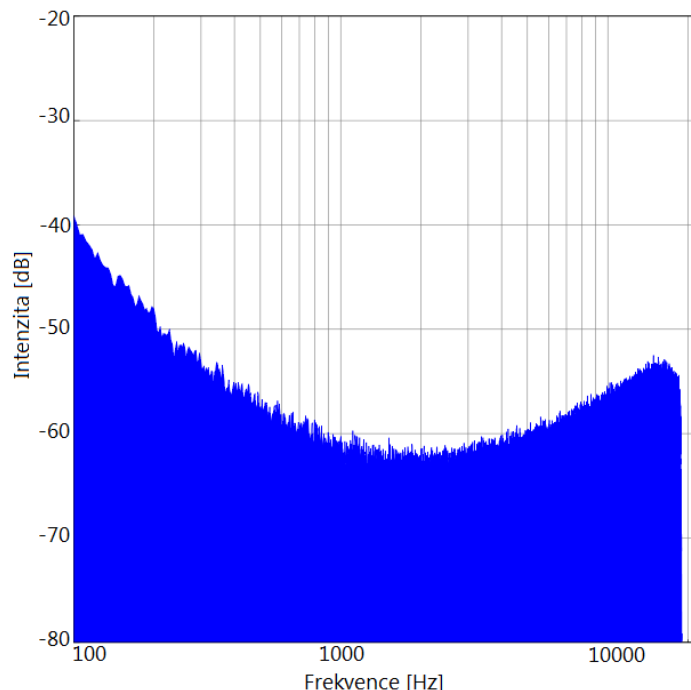
### 3.2.6 Zelený šum

Střední frekvence složky bílého šumu. Omezený hnědý šum. Používá se pro testování zvukových obvodů. Podle J. S. Wisniewskiho je pravděpodobně "hudební kulisa" Země. Je to šum, který simuluje spektrum nastavení přírody. Dalo by se říci, že je podobný růžovému šumu, ale má více energie v oblasti 500 Hz [17][25].

### 3.2.7 Šedý šum

Je náhodný šum, který zní pro lidské ucho na všech frekvencích stejně. Není ale stejný jako bílý šum, který má stejnou energii na všech frekvencích. Používá se v psychoakustice pro

měření křivky hlasitosti. Je to křivka znázorňující vliv určité frekvence k hlasitosti signálu, u kterého poslouchající osoba zaznamená konstantní hluk [18][26].



Obrázek 2.5: *Spektrum šedého šumu [17]*

### 3.2.8 Černý šum

Je také známý jako tichý šum.

Se spektrem  $1/f^x$ , přičemž  $x > 2$ . Používá se pro modelování všech možných procesů, které se vyskytují v životním prostředí. Věří se, že by to mohla být charakteristika jak přírodních tak i nepřírodních katastrof zahrnující sucho, povodně nebo stagnaci. Dokonce i poruchy jako výpadek elektrického proudu. Díky černému spektru se často stává, že katastrof přijde více najednou. Černý šum má frekvenční spektrum převážně nulového výkonu. Výjimkou je několik úzkých pásem nebo špiček. Jako příklad pro černý šum u faxového přenosu je spektrum, které vznikne během skenování černého papíru. Na výsledném skenu se objeví náhodně umístěné bílé body. Z toho plyne, že při skenu papíru se v časové oblasti objeví pár náhodných pulsů. Na základě dokumentace ultrazvukových odpuzovačů hmyzu se jedná o šum, který má výkonovou hustotu. Ta je pro rozsah nad 20 kHz konstantní. Z toho plyne, že se jedná o ultrazvukový bílý šum. Je podobný černému světlu, které má příliš vysoké frekvence pro zaznamenání. Zato je schopný ovlivnit své okolí [17][18][27].

## 4 Šum elektronických součástek

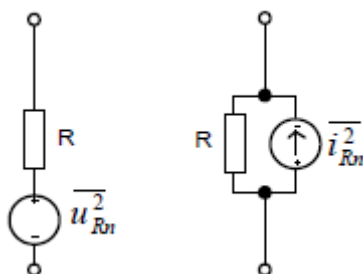
### 4.1 Rezistory

Vytváří tepelný (Johnsonův) šum. Rezistor produkuje bílý šum, tudíž spektrální výkonová hustota je konstantní [8].

Za příčinou vzniku šumu u rezistorů je šumové napětí. To vzniká vně materiálu součástky zapříčiněním nepravidelného pohybu elektronů. Projeví se drobnými, časově nerovnoměrnými změnami potenciálu. Šumové napětí se skládá ze dvou složek a to Tepelného šumového napětí a Povrchového šumového napětí. Tepelné je závislé na teplotě a šířce frekvenčního pásma. Povrchové závisí na velikosti stejnosměrného napětí na rezistoru [15][16].

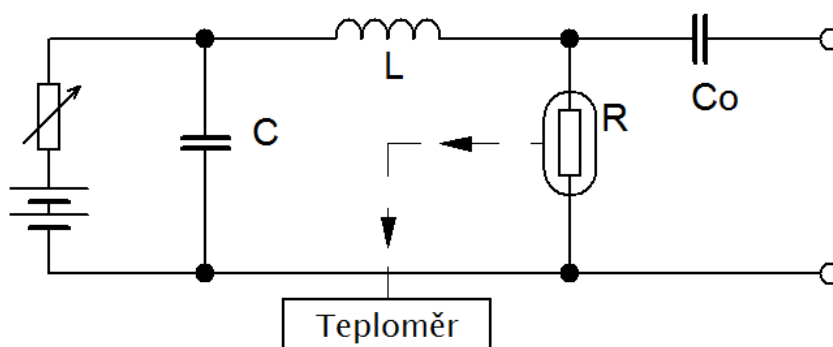
Vztah pro šumové napětí rezistoru je:

$$u_T^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot B \quad (4.1)$$



Obrázek 4.1: Příklad rezistoru jako šumového zdroje [8]

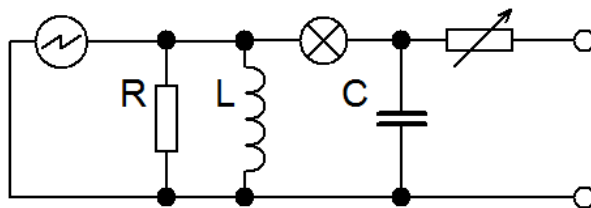
V tepelných generátorech šumu se jako zdroj šumu využívá rezistor, který je zahříván teplem protékajícího stejnosměrného proudu. Odpor je zde žhavené kovové vlákno v baňce, ze které byl vyčerpán vzduch. Vlákno je vyhříváno stejnosměrným proudem, který prochází LC filtrem. Změnou topného proudu můžeme upravit teplotu měřeného vlákna a rovněž výsledný šum [5].



Obrázek 4.2: Zapojení tepelného šumového generátoru [5]

## 4.2 Žárovka

Jako konkrétní zdroj šumu se u žárovky využívá jejího rozžhaveného vlákna. V konkrétním zapojení na obr. 4.3 musí mít použitý rezistor co nejnížší indukčnost a musí být stálý. Nevýhodou obvodu může být větší příkon proudu ze zdroje. Teplotu vlákna je možno měřit pyrometrem [1].

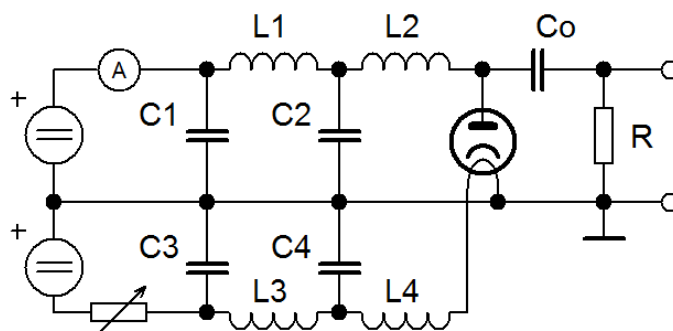


Obrázek 4.3: Generátor se žárovkou [1]

## 4.3 Diody

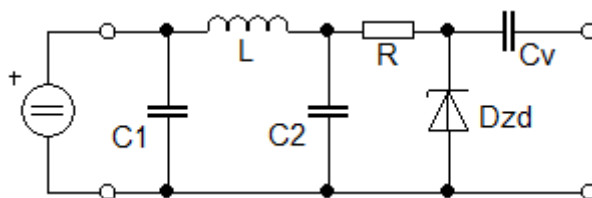
Diody odpovídají výstřelovému šumu. Použít se dá dioda s planární kruhovou strukturou pro zajištění homogenního pole nebo vakuová dioda [5].

Na obr. 4.4 je znázorněn generátor šumu, využívající jako šumový zdroj vakuovou diodu se žhavenou wolframovou katodou. Velikost anodového proudu je dán rozměrem a teplotou katody. Zdroj pro napájení katody a anody je k vakuové diodě připojen skrze LC filtry, které zabrání ztrátě šumu z napájecích zdrojů [5].



Obrázek 4.4: Generátor s vakuovou diodou [5]

Generátor na obr. 4.5 pracuje díky výstřelovému šumu Zenerovy diody a to využitím jejího závěrně polarizovaného přechodu [14].



Obrázek 4.5: Generátor se Zenerovou diodou [14]

## 4.4 Tranzistory

### 4.4.1 Unipolární

Jsou řízeny napětím na řídicí elektrodě. Zahrnujeme FET (JFET, MESFET, MOSFET) tranzistory, které mají přednosti jako velký vstupní odpor, malé nelineární zkreslení, slušné frekvenční vlastnosti a malý vlastní šum. JFET tranzistory charakterizuje PN přechod, MOSFET tranzistory izolované hradlo a MESFET tranzistory Schottkyho hradlo. Rovněž výstřelový šum hradla u JFET a MESFET. Základní šumová složka JFET tranzistoru je tepelný šum, který vzniká na činné složce impedance kanálu. Výsledný šum má bílé spektrum, díky čemu se uplatní v úplném užitečném frekvenčním pásmu daného tranzistoru [4].

Mívají lepší šumové vlastnosti oproti bipolárním tranzistorům. Tepelný šum zde můžeme vyjádřit vztahem [9]:

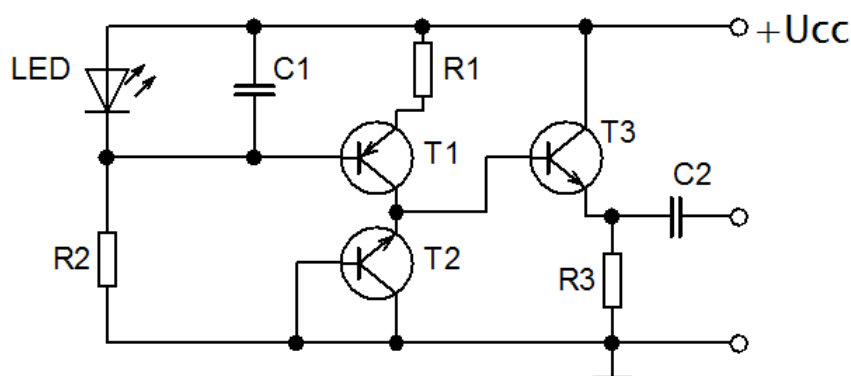
$$I_T^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot B_N g_m \delta \quad (4.2)$$

kde ...  $0,5 \leq \delta(U_{GS}, U_{DS}, I_D) \leq 0,7$

### 4.4.2 Bipolární

Tepelný šum rezistoru  $R_b$  představuje zdroj napětí. Zdroj proudu modeluje výstřelový šum přechodu kolektor-emitor a báze-emitor. Pokud chceme co nejmenší hodnotu výsledného šumu, musíme zajistit co nejnižší hodnotu rezistoru  $R_b$ . Nevýhodou je, že závisí na bázeovém proudu. Se snižováním bázeového proudu klesá zesílení stupně a odtud klesá proud šumu [9].

U generátoru šumu na obr. 4.6 má tranzistor obdobné vlastnosti jako Zenerova dioda. Závěrně polarizovaný přechod značí, že se jedná výstřelový šum. Generátor má větší rozsah frekvencí a to díky malé parazitní kapacitě přechodu Báze-Emitor [14].



Obrázek 4.6: Generátor šumu se závěrně polarizovaným emitorovým přechodem bipolárního tranzistoru [14]



## 5 Šumového číslo

Označujeme jej  $F$ . Šumové číslo udává, kolikrát se změní poměr šumu vůči signálu na výstupu určitého obvodu oproti hodnotě na vstupu téhož obvodu. Pokud daný obvod nemá žádný šumový zdroj, platí  $F=1$  [9].

$$F = \frac{S_1}{N_1} / \frac{S_2}{N_2} \quad (5.1)$$

$S_1$  ... výkon vstupního signálu dvojbranu

$N_1$  ... šumový výkon vstupního dvojbranu, který odpovídá šumovému výkonu BK:

$$N_1 = k \cdot T_0 \cdot B \quad (5.2)$$

$S_2$  ... výkon výstupního signálu dvojbranu

$N_2$  ... celkový šumový výstupní výkon signálu dvojbranu

$k$  ... Boltzmanova konstanta. Je rovna  $1,38 \cdot 10^{-23}$  [J/K]

$T_0$  ... fyzická teplota, určená teplota je  $T_0 = 290K$

$B$  ... šumová šířka pásma [Hz]

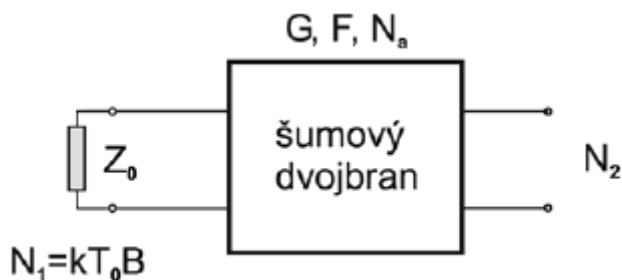
### 5.1 Výkonová definice

$$F = \frac{N_2}{GN_1} = \frac{GN_1 + N_a}{GN_1} = 1 + \frac{N_a}{GN_1} = 1 + \frac{N_a}{kT_0BG} \quad (5.3)$$

$GN_1$  ... zesílený šum BK, který je zapojen na vstupu

$G$  ... dosažitelný zisk, kterého můžeme dosáhnout v měřeném obvodu

$N_a$  ... šumový výkon, přidán dvojbranem



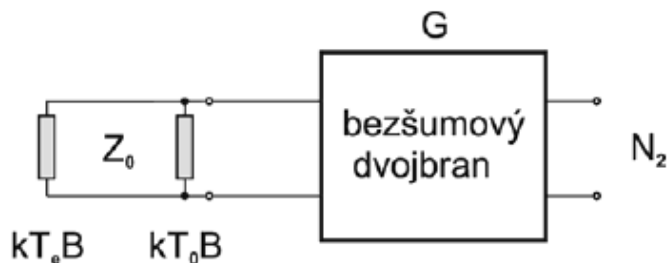
Obrázek 5.1: Šumové číslo - výkonová definice [10]

Výslednou hodnotu pro šumové číslo vyjadřujeme v decibelech:

$$F_{dB} = 10 \cdot \log F \quad (5.4)$$

## 5.2 Ekvivalentní šumová teplota

Značíme  $T_e$ . Nachází se na vstupu bezšumového dvojbranu. Tento dvojbran vytváří šumový výkon  $N_a$ .



Obrázek 5.2: Ekvivalentní šumová teplota [10]

Ekvivalentní šumová teplota je rovna součtu teploty zdroje  $T_0$  a teploty  $T_e$  za podmínky ideálního bezšumového dvojbranu. Poté je možno šumový výkon vypočítat:

$$N = k(T_0 + T_e)B \quad (5.5)$$

Výpočet se zdrojem šumu s výkonem  $kT_0 B$ :

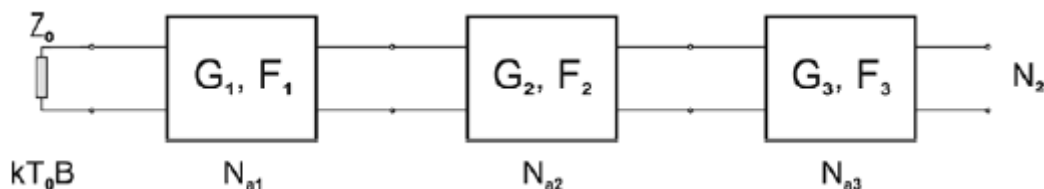
$$N_a = kT_e B G \quad (5.6)$$

$$N_a = (F - 1)kT_0 B G \quad (5.7)$$

$$T_e = (F - 1)T_0 \quad (5.8)$$

## 5.3 Friisův vztah

Na vstupu prvního dvojbranu je šumový výkon  $kT_0 B$ . Dvojbrany jsou zapojeny do kaskády.



Obrázek 5.3: Zapojení dvojbranů do kaskády [10]

Nejprve spočteme šumové výkony jednotlivých dvojbranů:

$$N_{a1} = (F_1 - 1)kT_0 B \quad (5.9)$$

$$N_{a2} = (F_2 - 1)kT_0 B \quad (5.10)$$

$$N_{a3} = (F_3 - 1)kT_0 B \quad (5.11)$$

Následně pak výstupní výkon:

$$N_2 = kT_0 B G_1 G_2 G_3 + N_{a1} G_1 G_2 G_3 + N_{a2} G_2 G_3 + N_{a3} G_3 = kT_0 [G_1 G_2 G_3 + (F_1 - 1)G_1 G_2 G_3 + (F_2 - 1)G_2 G_3 + (F_3 - 1)G_3] \quad (5.12)$$

Friisův vztah potom dostaneme:

$$F = \frac{N_2}{kT_0BG_1G_2G_3} = F_1 + \frac{F_2-1}{G_1} + \frac{F_3-1}{G_1G_2} \quad (5.13)$$

Šum můžeme nejčastěji v přijímačích minimalizovat zvýšením zisku  $G_1$  a snížením šumového čísla  $F_1$  [9].

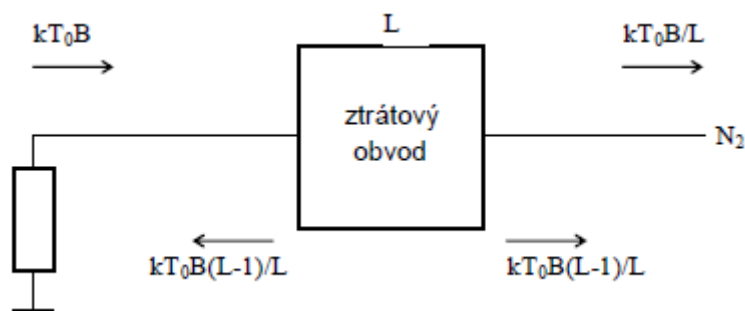
## 5.4 Šumové číslo pro pasivní prvky

Pokud se podíváme ze strany  $N_2$ , ztrátový dvojbran, který je impedančně přizpůsoben se bude chovat jako BK [10]:

$$F = \frac{N_2}{GN_1} = \frac{kT_0B}{\frac{kT_0B}{L}} = L \quad (5.14)$$

Z vzorce můžeme vyčíst, že šumové číslo je shodné s průchozím útlumem.

Z fyzikálního pohledu:



Obrázek 5.4: Impedančně přizpůsobený ztrátový obvod [10]

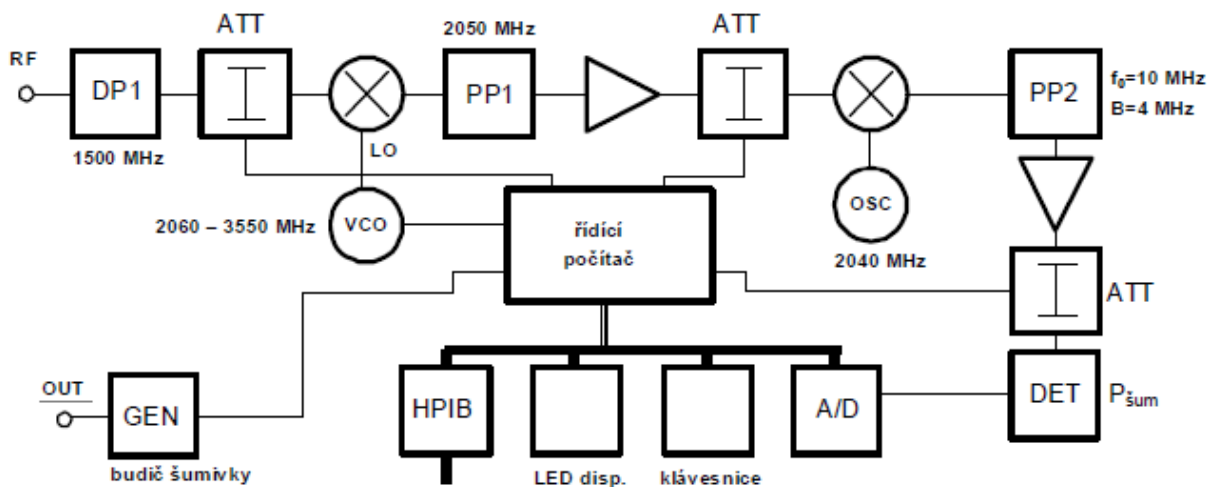
Z obrázku vyčteme přívod šumového výkonu do ztrátového obvodu s útlumem  $L$ . Jakmile šumový výkon projde ztrátovým obvodem, šumový výkon se zmenší a zbylou energii pojme ztrátová obvod.

Šumové číslo ztrátového obvodu je:

$$N_{aZO} = kT_0B - \frac{kT_0B}{L} = kT_0B \frac{L-1}{L} \quad (5.15)$$

$$F = 1 + \frac{N_{aZO}}{kT_0BG} = 1 + \frac{kT_0B \frac{L-1}{L}}{\frac{kT_0B}{L}} = L \quad (5.16)$$

## 5.5 Měřič šumového čísla HP8970A



Obrázek 5.5: Blokové schéma HP8970A [10]

Přístroj pro měření šumového čísla, který pracuje ve frekvenčním rozsahu 10 MHz - 1500 MHz pro šířku pásma 4 MHz. Rozsah pro měření šumového čísla je 0 - 30 dB při  $ENR \approx 15$  dB. Měří šumové parametry  $F$ ,  $F_{dB}$ ,  $T_e$ ,  $Y$  a  $Y_{dB}$ . Vytváří napájení pro zdroj šumu, který vyžaduje 28 V [10].

Tabulka 1.2: Parametry HP8970A

Parametry	
Maximální vstupní výkon	-10 dBm
Maximální vnější zisk	65 dB
Šumové číslo na vstupu	$< 7 \text{ dB} - 100 + 0,003 \text{ dB/MHz}$
Rozlišitelnost šumového čísla	$\pm 0,01 \text{ dB}$ pro $G_a \geq -10 \text{ dB}$
Citlivost	-100 dBm
Nejistota měření šumového čísla	0,1 dB
Nejistota měření zisku	0,2 dB

## 5.6 Zdroj šumu HP346B

Je důležité vybrat si pro měření vhodný zdroj šumu, jelikož nám může naměřené hodnoty ovlivnit. K tomu nám pomůže dvojbran, který budeme měřit a podle jehož parametru zdroj šumu vybereme.



Obrázek 5.6: Zdroj šumu HP346B [11]

Zdroj šumu HP346B pracuje ve frekvenčním rozsahu 10 MHz - 18 GHz. Vyžaduje vstupní napětí  $28 \pm 1$  V [11].

Tabulka 5.1: Parametry HP346B

Parametry	
Šumový rozsah	14 dB - 16 dB
Neurčitost ENR	0,1 dB
Teplotní změna ENR	<0,01dB/°C
Odrazy na výstupu	
10 MHz - 30 MHz	<1,3
30 MHz - 5 000 MHz	<1,15
5 GHz - 18 GHz	<1,25

## 6 Princip měření šumového čísla

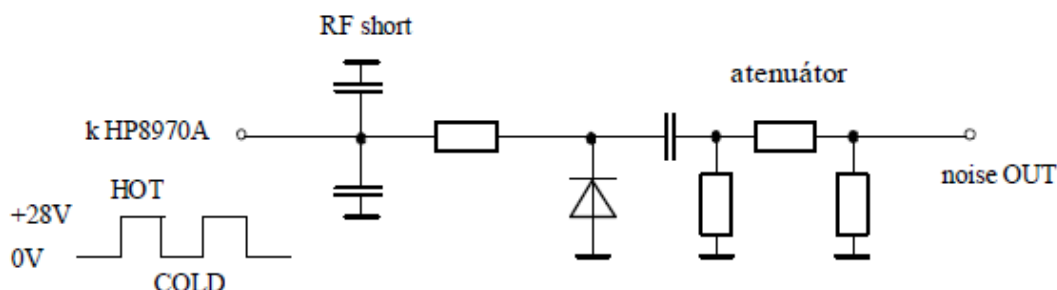
Měřit šumové číslo lze podle metody Y, která používá šumový zdroj, na němž je umožněno přepnout dva stavy šumového výkonu. Ony stavy jsou HOT a COLD, někdy se uvádí ON a OFF.

Je zapotřebí znát zisk dvojbranu G:

$$F = \frac{N_2}{kT_0BG} \quad (6.1)$$

$$F_{mc} = L_1 + (F_{DUT} - 1)L_1 + \frac{(L_2 - 1)L_1}{G_{DUT}} + \frac{(F_{NFM} - 1)L_1L_2}{G_{DUT}} \quad (6.2)$$

Abychom určili 2 neznámé, je zapotřebí udělat shodný počet měření, které jsou lineárně nezávislé [10].



Obrázek 6.1: Vnitřní zapojení zdroje šumu HP346B [10]

Na výstupu DUT, máme stavy HOT a COLD. Šumový výkon  $N_2$  pro tyto stavy zjistíme podle následujících vztahů [10]:

$$N_{2COLD} = kT_0BG + (F - 1)kT_0BG \quad (6.3)$$

$$N_{2HOT} = kT_0BG + (T_{HOT} - T_0)kBG + (F - 1)kT_0BG \quad (6.4)$$

Měřicí přístroj nám vyhodnotí poměr šumového výkonu HOT a COLD:

$$Y = \frac{N_{2HOT}}{N_{2COLD}} = \frac{FT_0 + (T_{HOT} - T_0)}{FT_0} \quad (6.5)$$

Následně po zjištění hodnoty Y jsme schopni určit F:

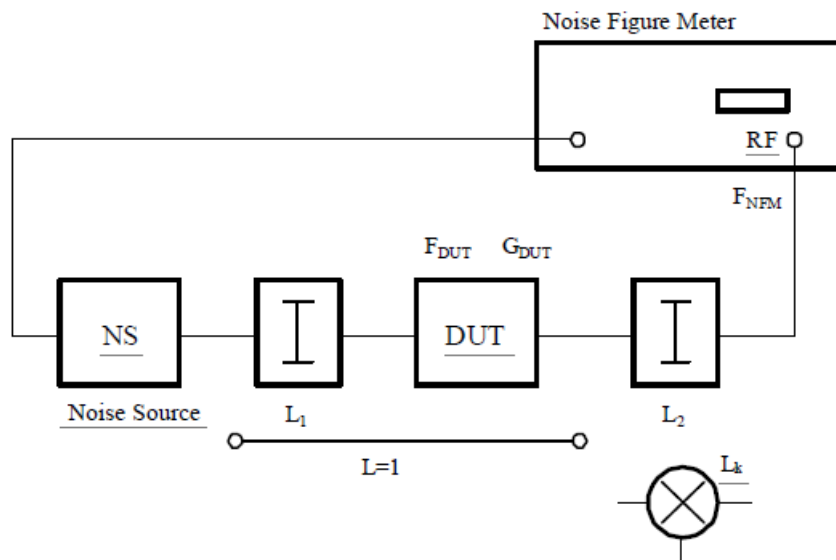
$$F = \frac{T_{HOT} - T_0}{T_0} \cdot \frac{1}{Y - 1} \quad (6.6)$$

$$F_{dB} = 10 \log \left( \frac{T_{HOT} - T_0}{T_0} \right) - 10 \log(Y - 1) = ENR - 10 \log(Y - 1) \quad (6.7)$$

ENR (Excess Noise Ratio) je poměr nadbytečného šumu. Jeho nejtypičtější hodnoty jsou přibližně od 6 dB do 20 dB. Je definován vztahem [10]:

$$ENR = \frac{T_{HOT} - T_{COLD}}{T_0} \quad (6.8)$$

## 6.1 Kalibrace a korekce



Obrázek 6.2: Obvod pro měření šumového čísla - impedančně přizpůsobený [10]

Na celkové šumové číslo  $F_{mc}$ , které měříme, mají vliv jednotlivé komponenty v obvodu:

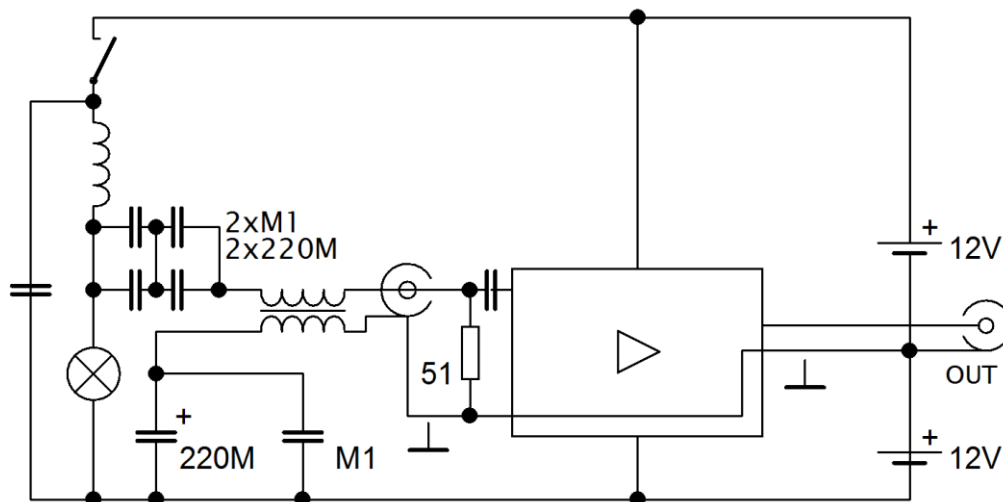
$$F_{mc} = L_1 + (F_{DUT} - 1)L_1 + \frac{(L_2 - 1)L_1}{G_{DUT}} + \frac{(F_{NFM} - 1)L_1 L_2}{G_{DUT}} \quad (6.9)$$

Při základní kalibraci a korekci je měřený dvojbran (DUT) vyměněn a na jeho místo vložíme propojku, která má útlum  $L = 1$ . Následně:

- Měřicí přístroj (NFM) naměří své šumové číslo  $F_{NFM}$  pro více odlišných nastavení vnitřních ztrátových obvodů.
- Měřicí přístroj začlení do celkového šumového čísla  $F_{mc}$  také sumu útlumů  $L_2$ , která je za měřeným dvojbranem.
- Je důležité předem změřit útlum  $L_1$  a zadat jej externě až kvůli korekci. Pokud je přítomen již u kalibrace, je začleněn do  $L_2$  [10].

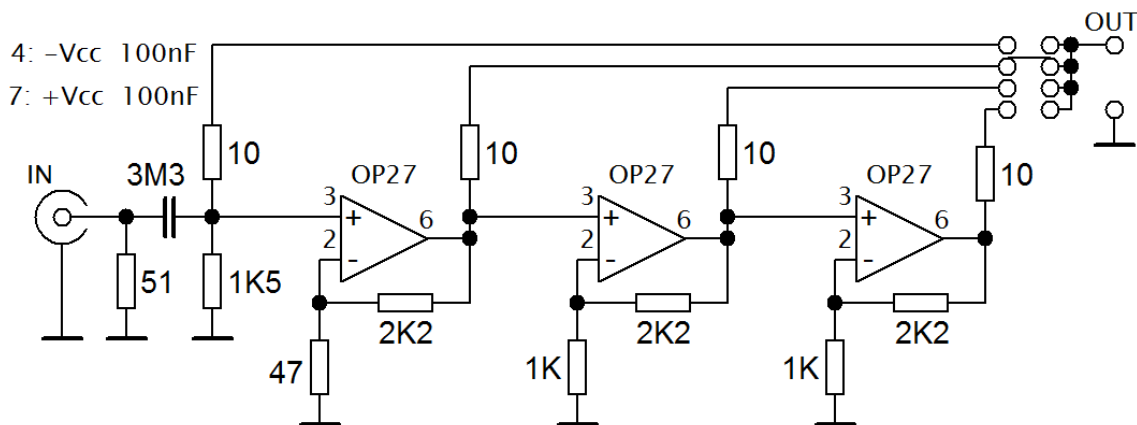
## 7 Návrh šumového generátoru

K praktické realizaci byl zvolen generátor šumu se žárovkou na obr. 7.1. Jako zdroj šumu se zde využívá rozžhavené vlákno žárovky. Vybrána byla sufitka z důvodu rovného vlákna a tudíž lepšího měření pyrometrem. Generátor byl navržen pro zesilovače, které málo šumí (ENR).



Obrázek 7.1: Schéma zapojení generátoru šumu

Schéma použitého zesilovače pro generátor šumu je na obr. 7.2. Nejvyšší možné zesílení pro signál bylo 54 dB. Pomocí pinů, které jsou znázorněny na konci schématu, se dá výsledné zesílení snížit.

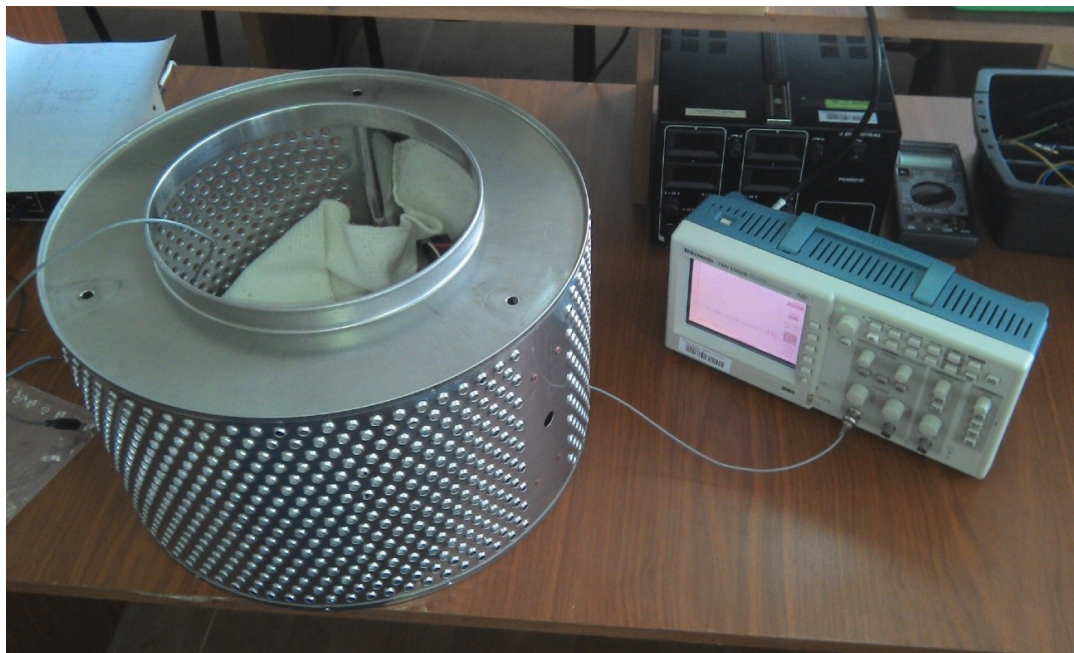


Obrázek 7.2: Schéma použitého zesilovače



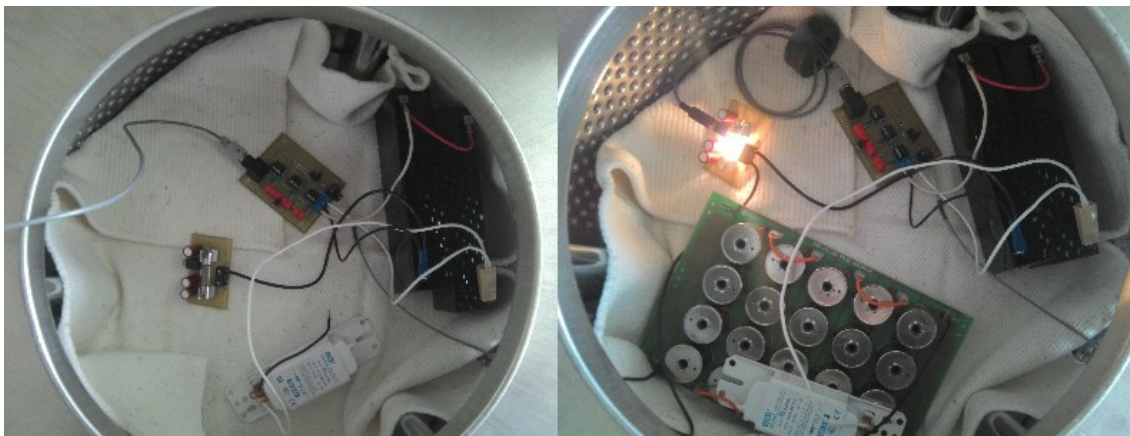
## 7.1 Vybavení k realizaci generátoru

Měření probíhalo na osciloskopu Tektronix TDS 1002B (obr. 7.3), který je schopen provést analýzu FFT. Jako stínění pro sestavený generátor byl použit bubn od pračky, který se pro lepší měření při zaznamenávání hodnot následně přikryl plechovým poklopem. Takto sestavené stínění stíní elektrické pole a vysokofrekvenční magnetické pole. Stínění nízkofrekvenčního magnetického pole je však slabé. To se projevilo rušením sousedícího osciloskopu.

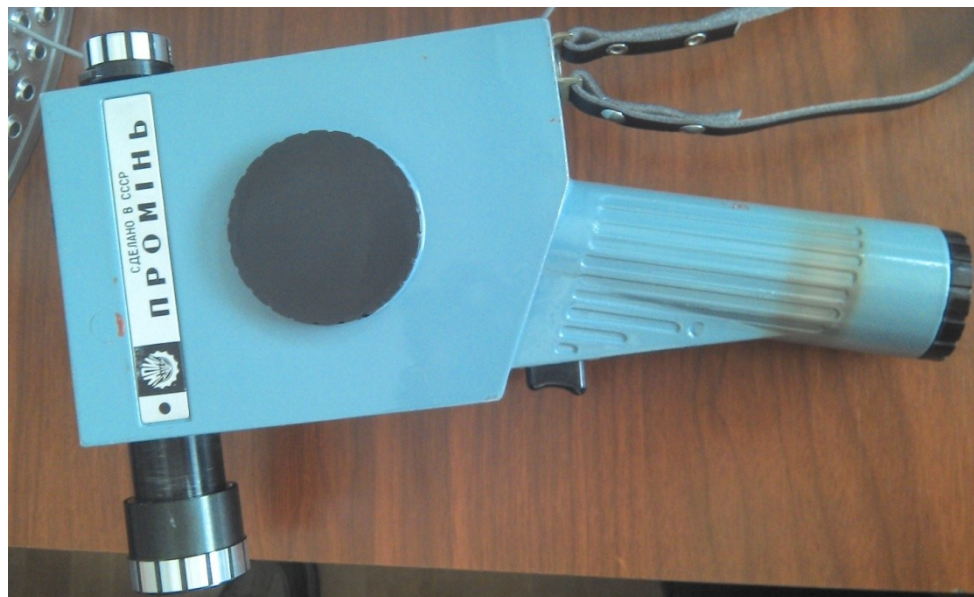


Obrázek 7.3: *Pohled na měřicí sestavu*

Na obr. 7.4 je znázorněno zapojení generátoru uvnitř bubnu. Nalevo je zapojení s jednou tlumivkou (36W ELT B2) a napravo pro dvě tlumivky, které jsou zapojeny do série. Pro napájení generátoru byly použity dva olověné akumulátory 12 V/ 2,2 Ah (bezšumové zdroje elektrické energie).



Obrázek 7.4: *Detailní pohled na zapojení uvnitř stínění*



Obrázek 7.5: Pyrometr k měření teploty vlákna žárovky

Pro zjištění teploty rozžhaveného vlákna žárovky byl použit pyrometr na obr. 7.5. Pyrometr je vhodný pro měření teplot od 800°C do 5000°C.

Tabulka 7.1: Naměřené hodnoty pro tlumivku 36W ELT B2

$f[\text{kHz}]$	$L[\text{H}]$	$Q$	$R[\text{k}\Omega]$		
0,1	1,129	15	10,7		
1	1,108	9,8	68,4		
10	3,112	0,535	104,6		
$f_0[\text{kHz}]$	$B[\text{kHz}]$	$f-3[\text{kHz}]$	$f+3[\text{kHz}]$	$C_p[\text{pF}]$	
13	15,7	22	6,3	133	

Tabulka 7.2: Naměřené hodnoty pro druhou tlumivku

$f[\text{kHz}]$	$L[\text{mH}]$	$Q$	$R[\Omega]$
0,1	5,26	3,07	10,13
1	4,76	30,2	910
10	4,753	370	

Hodnoty byly naměřeny pomocí přístroje Wayne Kerr 4210.

## 7.2 Měření šumu žárovky

Po sestavení generátoru a přivedení napětí z akumulátorů jsme mohli měřit výsledný šum pro různé použití tlumivek. Na osciloskopu se nastavil rozsah pro měření a postupně se manuálně rozsvěcovala a zhasínala žárovka. Pro zapojení se samostatnou tlumivkou 36W ELT B2 byla průměrná hodnota šumu z naměřených hodnot -86,51 dB pro stav s nerozsvěcenou žárovkou a -85,23 dB při rozsvěcení. Rozdíl tedy při rozžhavení vlákna žárovky byl 1,28 dB.

Při zapojení další tlumivky k předchozí již výsledný šum žárovky byl znatelně lepší. V nerozsvěceném stavu žárovky byl průměrný naměřený šum generátoru -87,05 dB a -79,74 dB při rozsvěcení. Mezi rozžhaveným a studeným stavem byl rozdíl 7,31 dB což je výrazný posun oproti předchozímu zapojení.

Vlákno žárovky ve studeném stavu mělo hodnotu odporu 3  $\Omega$  a při rozžhavení 38  $\Omega$ . Teplota rozžhaveného vlákna sufitky byla pomocí pyrometru naměřena na 1 650°C.

### 7.2.1 Výpočet výkonové spektrální hustoty

$$p = 4kT\Delta f = 4 \cdot 1,38 \times 10^{-23} \cdot (290 + 1650) \cdot 1 = 1,07 \times 10^{-19} W \quad (7.1)$$

$$P = 10 \log \frac{p}{1 \times 10^{-3}} = 10 \log \frac{1,07 \times 10^{-19}}{1 \times 10^{-3}} = -159,7 dBm \quad (7.2)$$

$$u^2 = 4kTR\Delta f = 4 \cdot 1,38 \times 10^{-23} \cdot (290 + 1650) \cdot 38 \cdot 1 = 4,08 \times 10^{-18} V \quad (7.3)$$

$$u = 2,02 nV \quad (7.4)$$

### 7.2.2 Výpočet ENR

$$ENR = 10 \log \frac{T-290}{290} = 10 \log \frac{1650-290}{290} = 6,71 dB \quad (7.5)$$

### 7.2.3 Šumový výkon žárovky pro tlumivky

Šířka pásma je zde 25 kHz:

$$p = 4kT\Delta f = 4 \cdot 1,38 \times 10^{-23} \cdot (290 + 1650) \cdot 25000 = 2,68 \times 10^{-15} W \quad (7.6)$$

$$P = 10 \log \frac{p}{1 \times 10^{-3}} = 10 \log \frac{2,68 \times 10^{-15}}{1 \times 10^{-3}} = -115,71 dBm \quad (7.7)$$

$$u^2 = 4kTR\Delta f = 4 \cdot 1,38 \times 10^{-23} \cdot (290 + 1650) \cdot 38 \cdot 25000 = 1,02 \times 10^{-13} V \quad (7.8)$$

$$u = 0,32 \mu V \quad (7.9)$$

Šířka pásma zde 125 kHz:

$$p = 4kT\Delta f = 4 \cdot 1,38 \times 10^{-23} \cdot (290 + 1650) \cdot 125000 = 1,34 \times 10^{-14} W \quad (7.10)$$

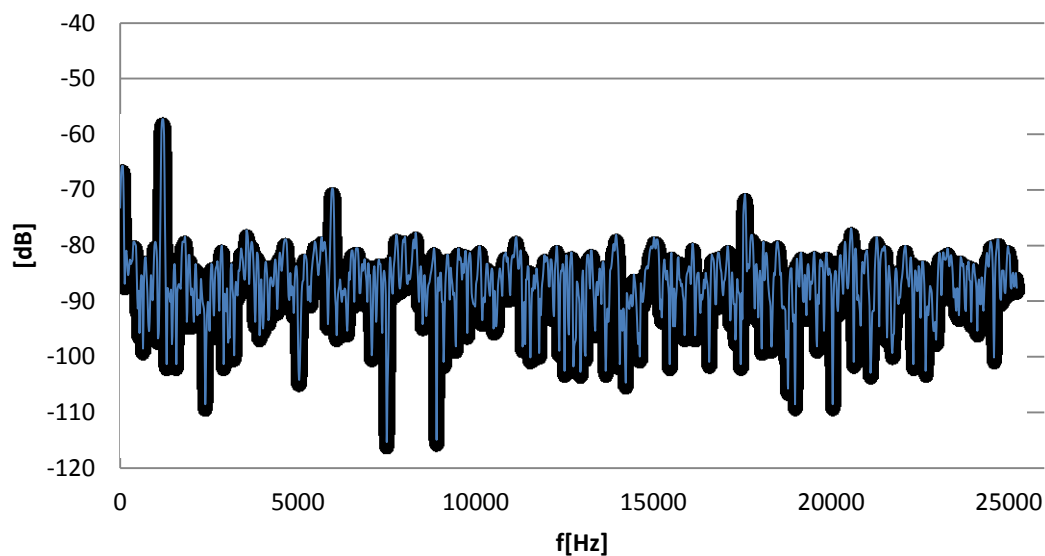
$$P = 10 \log \frac{p}{1 \times 10^{-3}} = 10 \log \frac{1,34 \times 10^{-14}}{1 \times 10^{-3}} = -108,73 dBm \quad (7.11)$$

$$u^2 = 4kTR\Delta f = 4 \cdot 1,38 \times 10^{-23} \cdot (290 + 1650) \cdot 38 \cdot 125000 = 5,09 \times 10^{-13} V \quad (7.12)$$

$$u = 0,71 \mu V \quad (7.13)$$

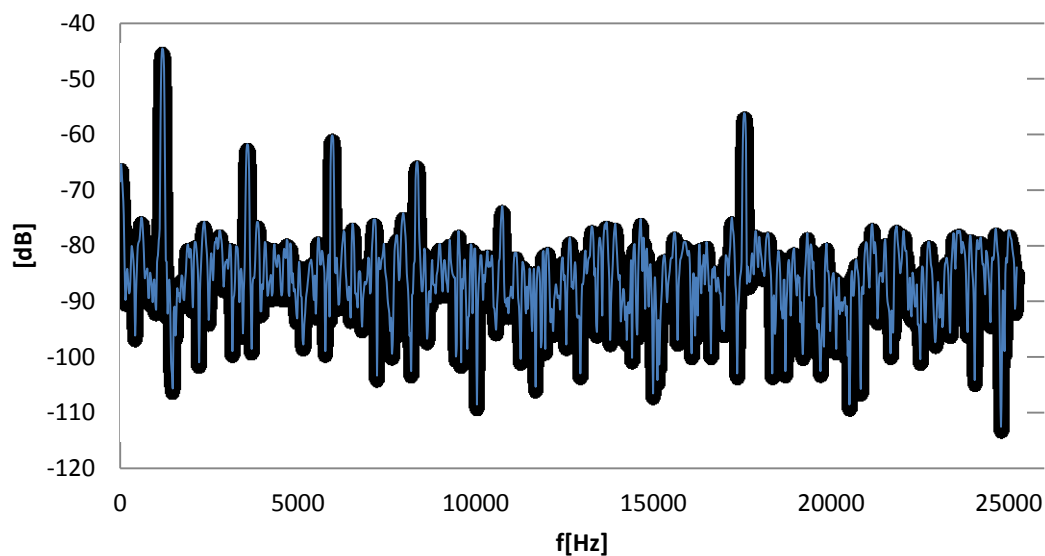
#### 7.2.4 Grafické zobrazení pro tlumivku 36W ELT B2

##### Žárovka nesvítí



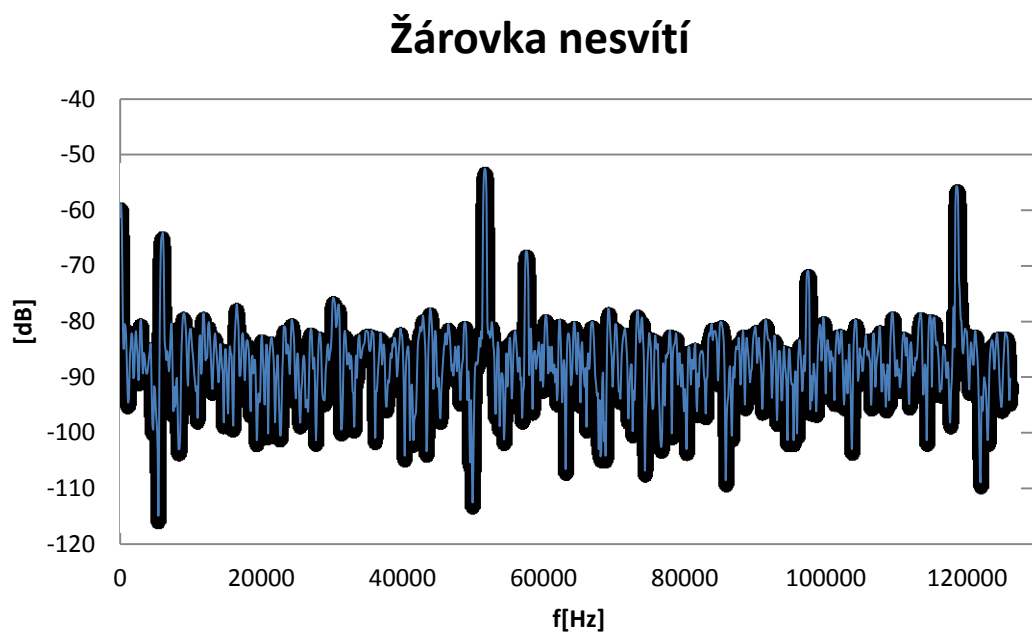
Obrázek 7.6: Měření šumu se zesílením 54 dB - žárovka nesvítí

##### Žárovka svítí

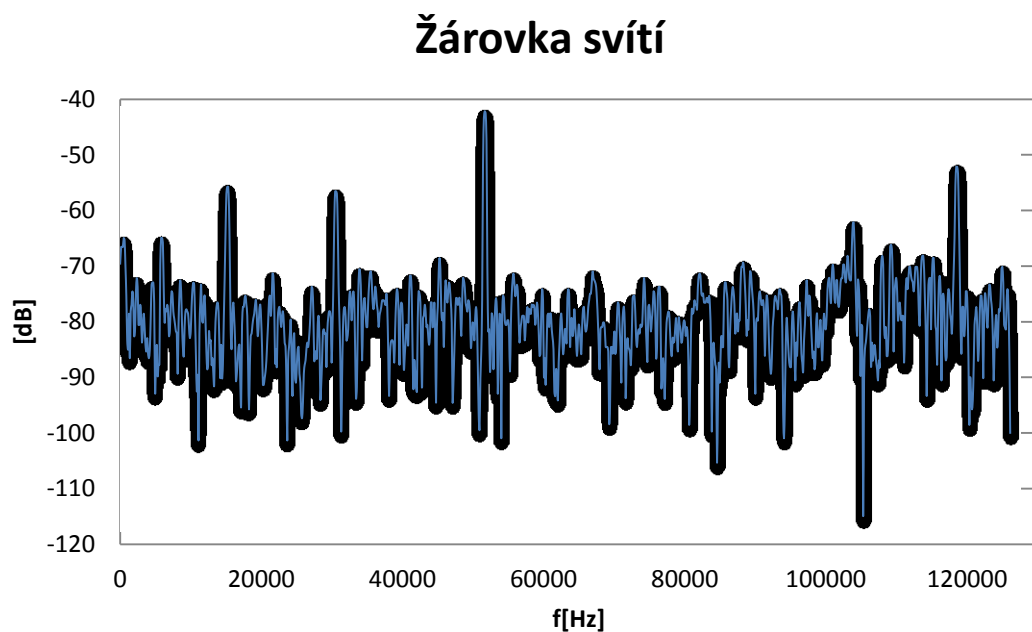


Obrázek 7.7: Měření šumu se zesílením 54 dB - žárovka svítí

### 7.2.5 Grafické zobrazení pro dvě tlumivky



Obrázek 7.8: *Měření šumu se zesílením 54 dB – žárovka nesvíí*



Obrázek 7.9: *Měření šumu se zesílením 54 dB – žárovka svítí*

## Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a prakticky realizovat generátor bílého šumu do 100 kHz. Pro úzkopásmové měření by postačil sinusový generátor, ale pro širokopásmové měření je již potřeba použít generátor šumu. V teoretické části byla vysvětlena základní charakteristika šumu, jeho rozdělení a možné uplatnění. Následně je zde uvedena skupina dalších možností sestavení šumových generátorů s různými součástkami jako jejich šumovým zdrojem.

V rámci řešení této práce byl vybrán šumový generátor s žárovkou, u kterého zastává pozici zdroje šumu rozžhavené vlákno žárovky. Žárovka byla vybrána z důvodu možnosti měření teploty vlákna pyrometrem a rovněž díky možnosti vypočtení hodnoty jejího šumu. Konkrétně jako žárovka byla použita sufitka, která byla zapojena do vodorovné polohy. Díky jejímu rovnému vláknu bylo snadnější rozpoznání stejné intenzity světla v použitém pyrometru při měření vlákna sufitky. Vlákno sufitky následně měnilo odpor mezi studeným a rozžhaveným stavem.

I přes některé potíže, hlavně při nastavování osciloskopu pro správné měření šumu se podařilo naměřit výsledný šum sestaveného generátoru. Při prvním měření se zesílením 30 dB byl výsledný šum utopený v šumu zesilovače osciloskopu. Po následné úpravě zesilovače díky zesílení 54 dB byl již požadovaný šum opravdu znatelný. Nejlepších výsledků při měření šumu generátoru jsme dosáhli při druhém měření se zapojením dvou tlumivek do série, což lze pouhým okem vyčíst i z uvedených grafů. Zajímavé bylo měření teploty vlákna starším typem pyrometru, kde se vlákno přes kukátko hledalo opravdu těžko.

Závěrem bych chtěl dodat, že díky této práci jsem měl možnost se obohatit o velmi zajímavé téma, následnou zkušenost při sestavení generátoru a rozvoji svých znalostí o problematice šumů do budoucna.

## Použité zdroje

- [1] BUDĚJICKÝ, J. and F. KLÍMA. Šum elektronických obvodů. Praha: SNTL, 1962.
- [2] Charakteristiky šumu. Www.senzorika.leteckafakulta.sk [online]. 2009 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.senzorika.leteckafakulta.sk/?q=node/217>
- [3] Druhy šumu. Www.senzorika.leteckafakulta.sk [online]. 2009 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.senzorika.leteckafakulta.sk/?q=node/218>
- [4] ŽALUD, V. and V.N. KULEŠOV. Polovodičové obvody s malým šumem. Praha: SNTL, 1980.
- [5] MATYÁŠ, V. Měření, analýza a vytváření náhodných procesů. Praha: SNTL, 1976.
- [6] Generátor růžového šumu. Elektronovinky.cz [online]. 2014 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.elektronovinky.cz/konstrukce/generator-ruzoveho-sumu>
- [7] Šumy v elektronických systémech. Kiwiki [online]. 2011 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: [http://www.kiwiki.info/index.php/%C5%A0umy\\_v\\_elektronick%C3%BDch\\_syst%C3%A9moch](http://www.kiwiki.info/index.php/%C5%A0umy_v_elektronick%C3%BDch_syst%C3%A9moch)
- [8] Pro studenty8. In: NOISE – Šumová analýza [PDF]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: [http://user.unob.cz/biolek/vyukaVUT/prednasky/BMPS/pro\\_studenty8.pdf](http://user.unob.cz/biolek/vyukaVUT/prednasky/BMPS/pro_studenty8.pdf)
- [9] Sumy. In: PETRŽELA, J. Teorie elektronických obvodů [PDF]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTEO/mteo/sumy.pdf>
- [10] Mms\_mereni\_sumoveho\_cisla\_-\_www\_1. In: Měření šumového čísla [PDF]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: [http://old.elmag.org/lib/exe/fetch.php/k317:mms:mms\\_mereni\\_sumoveho\\_cisla\\_-\\_www\\_1.pdf](http://old.elmag.org/lib/exe/fetch.php/k317:mms:mms_mereni_sumoveho_cisla_-_www_1.pdf)
- [11] Agilent / HP 346B. Alliance Test [online]. 2012 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.alliancetesteq.com/equipment/agilent-hp-346b>
- [12] What's The Difference Between Acoustical And Electrical Noise In Components?. Electronic Design [online]. 2012 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://electronicdesign.com/electromechanical/what-s-difference-between-acoustical-and-electrical-noise-components>
- [13] Self-Noise of OpenBCI. EEG Hacker [online]. 2013 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://eeghacker.blogspot.cz/2013/12/self-noise-of-openbci.html>
- [14] Šumový generátor. Wikipedie [online]. 2013 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0umov%C3%BD\\_gener%C3%A1tor](http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0umov%C3%BD_gener%C3%A1tor)
- [15] Rezistor. Wikipedie [online]. 2014 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Rezistor>

- [16] Šum aktivních a pasivních součástek. SPŠE - slaboproud [online]. 2001 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://moryst.sweb.cz/elt2/stranky1/elt004.htm>
- [17] Colors of noise. Wikipedie [online]. 2014 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Colors\\_of\\_noise](http://en.wikipedia.org/wiki/Colors_of_noise)
- [18] Barvy šumu. Wikipedie [online]. 2013 [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Barvy\\_%C5%A1umu](http://cs.wikipedia.org/wiki/Barvy_%C5%A1umu)
- [19] White Noise. Media College [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.mediacollege.com/audio/noise/white-noise.html>
- [20] Purple Noise. Media College [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.mediacollege.com/audio/noise/purple-noise.html>
- [21] Brown Noise. Media College [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.mediacollege.com/audio/noise/brown-noise.html>
- [22] Pink Noise. Media College [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.mediacollege.com/audio/noise/pink-noise.html>
- [23] Orange Noise. Media College [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.mediacollege.com/audio/noise/orange-noise.html>
- [24] Red Noise. Media College [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.mediacollege.com/audio/noise/red-noise.html>
- [25] Green Noise. Media College [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.mediacollege.com/audio/noise/green-noise.html>
- [26] Gray Noise. Media College [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.mediacollege.com/audio/noise/gray-noise.html>
- [27] Black Noise. Media College [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://www.mediacollege.com/audio/noise/black-noise.html>



---

Součástí BP je CD.

Adresářová struktura přiloženého CD:

- namerene\_hodnoty.xlsx
- BP\_MIM011.pdf