

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vyhodnocení kmitočtové difference

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Václav KOTORA**
Osobní číslo: **E12B0225P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Vyhodnocení kmitočtové difference**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Proveďte rešerši v literatuře popsanych zapojení oscilátorů a generátorů kmitů pro kmitočty v rozsahu stovek kHz až stovek MHz.
2. Vyberte alespoň jeden vhodný typ oscilátoru s krystalovým rezonátorem. Sestavte dva shodné funkční vzorky vybraných oscilátorů.
3. Navrhněte, sestavte a ověřte funkční vzorek obvodů pro vyhodnocení kmitočtové difference funkčních vzorků oscilátorů.
4. Získané poznatky v práci velmi podrobně popište.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Václav Koucký, CSc.

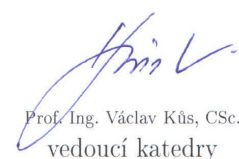
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

V první kapitole jsou popsána zapojení oscilátorů a generátorů využívající zapojení s RC, LC, vzájemnou indukčností a piezoelektrickým rezonátorem. Dále je zde popsán vliv mikrohmotnosti na povrch křemenného výbrusu. Změna mikrohmotnosti na povrchu křemenného výbrusu způsobuje posun rezonanční frekvence. Tento efekt je využíván pro detekování plynů a par.

V druhé kapitole jsou popsány obvody pro oscilátory a vyhodnocení kmitočtové difference. První metoda pro vyhodnocení kmitočtové difference je prováděna pomocí D-klopného obvodu. Druhá metoda pro vyhodnocení kmitočtové difference je prováděna pomocí osciloskopu, čítače a přesného generátoru. Na konci této práce jsou vyhodnoceny výsledky z měření.

Klíčová slova

Oscilátor, piezoelektrický rezonátor, křemenný výbrus, krystal, krystalový oscilátor, kmitočtová difference, D-klopný obvod, mikrováhy, operační zesilovač, rezonance, rezonanční frekvence, piezo senzor

Abstract

RC, LC, oscillators, oscillators with mutual inductive coupling and crystal oscillators are described in first capture of bachelor thesis. The influence of micro-mass on the quartz surface is described in this chapter too. Change of micro-mass on the quartz surface causes a shift of the resonant frequency. This effect is usable for gases and vapor detecting.

In second capture oscillator circuits and frequency difference detecting methods are described. The first frequency difference evaluation method is based on D-flip flop. Second method for frequency difference evaluation uses oscilloscope, counter and accurate generator. At the end of this bachelor thesis measuring results are presented.

Key words

Oscillator, piezoelectric resonator, quartz cut, crystal, crystal oscillator, frequency difference, D-flip flop, microbalance, operational amplifier, resonance, resonant frequency, piezo sensor

Prohlášení:

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

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

.....
podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavu Kouckému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

1 Oscilátory a generátory kmitů.....	12
1.1 Oscilátory se záporným diferenciálním odporem.....	12
1.2 Zpětnovazební oscilátory.....	13
1.2.1 RC oscilátory.....	14
1.2.1.1 Oscilátor s derivačními členy.....	14
1.2.1.2 Oscilátor s integračními členy.....	15
1.2.1.3 Oscilátor s Wienovým článkem.....	15
1.2.1.4 Oscilátor s přemostěným T-článkem.....	17
1.2.2 LC oscilátory.....	18
1.2.2.1 Tříbodové oscilátory.....	18
1.2.2.1.1 Hartleyův oscilátor.....	19
1.2.2.1.2 Colpittsův oscilátor.....	19
1.2.2.1.3 Clappův oscilátor.....	20
1.2.2.1.4 Vackářův oscilátor.....	20
1.2.2.2 Oscilátory s indukční vazbou.....	21
1.2.2.2.1 Meissnerův oscilátor.....	21
1.2.2.2.2 Reinartzův oscilátor.....	21
1.2.2.2.3 Armstrongův oscilátor.....	22
1.2.2.2.4 Schnellův oscilátor.....	22
1.3 Piezoelektrický rezonátor.....	23
1.3.1 Stabilita kmitočtu piezoelektrického rezonátoru.....	24
1.3.2 Náhradní schéma piezoelektrického rezonátoru.....	24
1.3.3 Použití piezoelektrických rezonátorů.....	26
1.3.3.1 Použití piezoelektrických rezonátorů pro detekování plynů.....	26
1.3.3.2 Použití piezoelektrických rezonátorů pro detekování par rtuti.....	27
1.3.3.3 Použití piezoelektrických rezonátorů pro detekování oxidu siřičitého.....	28
1.3.3.4 Použití piezoelektrických rezonátorů pro detekování oxidu uhelnatého.....	28
1.3.3.5 SAW senzory.....	29
1.3.4 Oscilátory s piezoelektrickým rezonátorem.....	29
1.3.4.1 Krystalové oscilátory s tranzistory.....	29
1.3.4.2 Krystalové oscilátory s invertory.....	31
2 Popis vlastního experimentování.....	32
2.1 Sestavení vhodných oscilátorů pro experimentování.....	32
2.1.1 Sestavení krystalového oscilátoru se dvěma invertory.....	33
2.1.2 Sestavení krystalového oscilátoru s tranzistorem.....	34
2.1.3 Sestavení krystalového oscilátoru s operačním zesilovačem.....	35
2.2 Metody a obvody pro vyhodnocení kmitočtové difference:.....	37
2.2.1 Vyhodnocení kmitočtové difference pomocí D-klopného obvodu.....	37
2.2.2 Vyhodnocení kmitočtové difference pomocí osciloskopu, čítače a přesného generátoru.....	42
2.3 Výsledky z experimentování.....	43
3 Závěr.....	46
Použitá literatura.....	47

Seznam symbolů a zkratk

R_+	rezistor s kladným odporem
R_-	rezistor se záporným odporem
β	přenos zpětnovazebního systému
A	přenos
φ	fázový posun
f_0	mezní frekvence
f_S	sériový rezonanční kmitočet
f_P	paralelní rezonanční kmitočet
Δf	posun rezonančního kmitočtu
A_U	napět'ové zesílení
M	vzájemná indukčnost
L_V	vazební indukčnost
C_V	vazební kapacita
C_S	kapacita sériové větve
L_S	indukčnost sériové větve
R_S	odpor sériové větve
C_P	kapacita paralelní větve
TKf	teplotní koeficient kmitočtu piezoelektrického rezonátoru
Q	činitel jakosti
NOT	negace (hradlo)
OZ	operační zesilovač
SKO	Schmittův klopný obvod

Úvod

Práce je rozdělena na dvě hlavní části. První část je zaměřena spíše na teorii. Jsou zde popsána zapojení oscilátorů a generátorů kmitů v zapojení s RC, LC, se vzájemnou indukční vazbou a krystalovým rezonátorem. Dále je zde popsáno působení mikrohmotnosti na parametry křemenného výbrusu vyjmutého ze svého ochranného pouzdra. Změna mikrohmotnosti na povrchu výbrusu může být zapříčiněna např. okolní vlhkostí vzduchu. Vlivem této mikrohmotnosti se rezonanční kmitočet piezoelektrického rezonátoru posunuje směrem dolů. Práce si klade za cíl zjistit tuto kmitočtovou diferenci bez působení mikrohmotnosti a při působení mikrohmotnosti na povrch výbrusu pro použití v piezosenzorice. V této části je také popsán princip pro detekování různých plynů a par (např. rtuti, oxidu siřičitého, oxidu uhelnatého) vyhodnocením rezonanční frekvence.

Druhá část je zaměřena na popis vlastního experimentování. Je zde popsán postup při návrhu krystalových oscilátorů, jejichž kmitočtová diference je následně vyhodnocována. Kmitočtová diference vzniká na základě použití dvou shodných oscilátorů řízených piezoelektrickým rezonátorem. Pokud jsou použity shodné rezonátory, a jeden z rezonátorů je vyjmut z ochranného pouzdra, jeho rezonanční frekvence klesne vlivem okolního prostředí (vlhkosti). Kmitočty obou oscilátorů se liší. Odečtením těchto dvou frekvencí dostaneme kmitočtovou diferenci. Další cíl této práce je diferenci vhodným způsobem kvantifikovat. Na základě tohoto je možné provádět experimenty se stanovením citlivosti křemenného výbrusu na vlhkost a na přítomnost dalších látek.

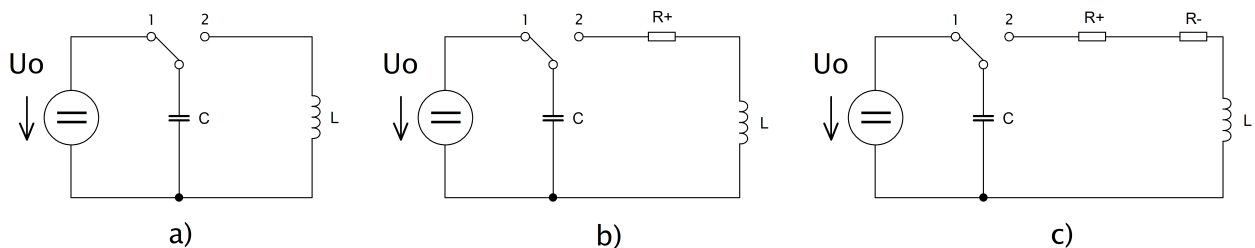
1 Oscilátory a generátory kmitů

Oscilátor (obecně) je zařízení, které je schopno konat kmitavý pohyb (např. mechanický nebo elektrický). Tento pohyb je charakterizován rychlostí, velikostí a svojí polohou v čase. Dále budou popsány pouze elektronické oscilátory. Tyto oscilátory se z hlediska tvaru průběhů rozdělují na harmonické oscilátory a relaxační oscilátory (generátory). Relaxační generátory jsou schopné vytvořit jiné průběhy než harmonické např. obdélníkový průběh, pilový průběh, lichoběžníkový průběh apod.

1.1 Oscilátory se záporným diferenciálním odporem

Pokud bude na obr. 1.1 a), resp. na obr. 1.2. a) kapacitor C nabit na hodnotu zdroje U_0 a přepínač bude přepnut z polohy 1 do polohy 2 začne se energie naakumulovaná v kapacitoru přelévat do induktoru. Až se všechna energie z kapacitoru přelije do induktoru, naakumulovaná energie se začne opětovně přelévat do kapacitoru. Pokud jsou uvažovány ideální součástky, bude se tento děj periodicky opakovat do nekonečna. V realitě je ale nutno uvažovat v obvodu ohmické ztráty viz. obr. 1.1 b), resp. obr. 1.2 b), kde se na odporu R_+ začne postupně naakumulovaná energie v obvodu měnit v Jouleovy ztráty a nakonec kmitů zaniknou. Tyto ztráty lze kompenzovat záporným odporem R_- podle obr. 1.1 c), resp. obr. 1.2 c). S různou velikostí odporů R_+ a R_- mohou nastat tyto stavy:

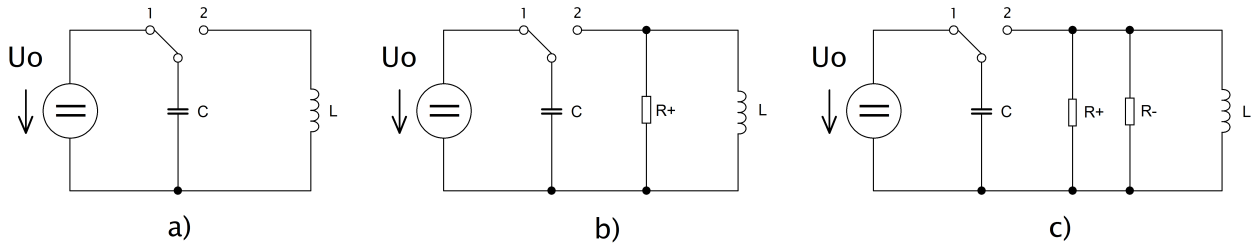
- $R_+ > R_-$ → vznik tlumených kmitů s klesající amplitudou
- $R_+ = R_-$ → vznik netlumených kmitů s konstantní amplitudou
- $R_+ < R_-$ → vznik netlumených kmitů s rostoucí amplitudou



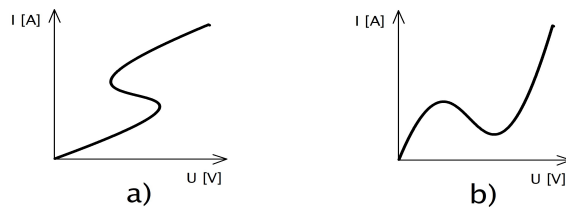
Obr. 1.1 Sériový rezonanční obvod a) ideální případ, b) bez kompenzace, c) s kompenzací

Na obr. 1.1 je znázorněn sériový kmitavý obvod. U tohoto obvodu je vhodné použít součástku s VA charakteristikou typu S, jejíž část vykazuje zápornou derivaci. Tato charakteristika je zobrazena na obr. 1.3 a) a jako součástku zde lze využít např. lavinové diody.

Na obr. 1.2 je znázorněn paralelní kmitavý obvod. U tohoto obvodu je naopak od sériového kmitavého obvodu vhodné použít součástku s VA charakteristikou typu N, jejíž část vykazuje opět zápornou derivaci. Tato charakteristika je zobrazena na obr. 1.3 b) a jako součástku zde lze využít např. tunelové diody.



Obr. 1.2 Paralelní rezonanční obvod a) ideální případ, b) bez kompenzace, c) s kompenzací

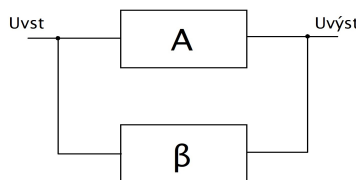


Obr. 1.3 a) Nelinearita typu S, b) Nelinearita typu N

1.2 Zpětnovazební oscilátory

Zpětnovazební teorie oscilátorů je úzce spjata se stabilitou zpětnovazebního systému. Na rozdíl od regulátorů, kde je vyžadována velmi vysoká stabilita systému taková, aby se systém nerozkmital u oscilátorů je naopak tato nestabilita využívána. Na obr. 1.4 je blokové schéma zpětnovazebního oscilátoru. Soustava se rozkmitá netlumenými kmity, pokud jsou splněny tyto podmínky:

- $\beta A = 1 \rightarrow$ amplitudová podmínka
- $\varphi_A + \varphi_B = 0 + 2k\pi; k = 0, 1, 2, \dots \rightarrow$ fázová podmínka



Obr. 1.4 Blokové schéma zpětnovazebního oscilátoru

Z amplitudové podmínky nám vychází, že pokud má zpětný člen β útlum např. 3 je potřeba tento útlum kompenzovat členem A , který bude zesilovat se ziskem 3. Fázová podmínka říká, že celkový fázový posun soustavy musí být roven nule. Pokud je tedy použit jako zesilovač tranzistor se společným emitorem, který má fázový posun 180° , musí mít zpětnovazební člen fázový posun také 180° . Tímto jsou splněné obě podmínky a soustava se rozkmitá.

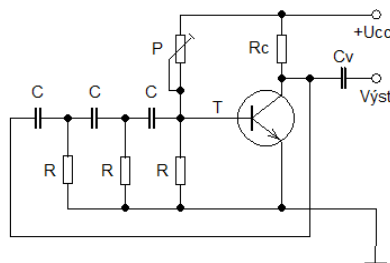
1.2.1 RC oscilátory

Tyto oscilátory se nazývají RC, jelikož mají ve zpětné vazbě pouze kapacitory a rezistory v různých variacích tak, aby byly splněny oscilační podmínky.

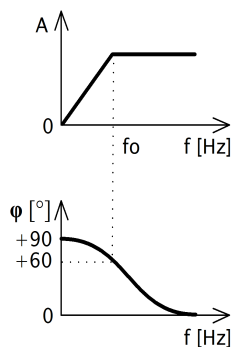
1.2.1.1 Oscilátor s derivačními členy

Oscilátor s derivačními členy je na obr. 1.5, kde každý ze třech derivačních článků posouvá fázi přibližně o 60° (viz. obr. 1.6), tedy celkem o 180° . Z amplitudové frekvenční charakteristiky je vidět, že se jedná o horní propust. Aby byla splněna fázová podmínka, musí mít zesilovač fázový posun také 180° . To se docílí použitím tranzistorového zesilovače se společným emitorem. Nastavením vhodného pracovního bodu tranzistoru tak, aby byla splněna amplitudová podmínka

pro vznik oscilací, se oscilátor rozkmitá frekvencí danou vztahem:
$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C \cdot \sqrt{6}}$$



Obr. 1.5 Oscilátor s derivačními členy

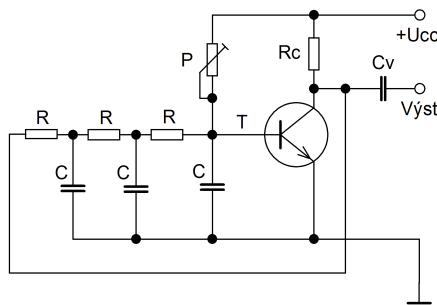


Obr. 1.6 Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika derivačního článku

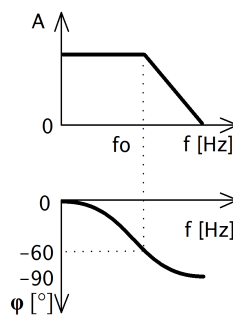
1.2.1.2 Oscilátor s integračními členy

Oscilátor s integračními členy je na obr. 1.7. Tento oscilátor je obdobou oscilátoru s derivačními členy. U oscilátoru s integračními členy zajišťuje potřebný fázový posun kaskáda tří integračních členů, kde každý člen posouvá fázi přibližně o -60° (viz. obr. 1.8), tedy celkem o -180° . Z amplitudové frekvenční charakteristiky je vidět, že se jedná o dolní propust. Aby opět byla splněna fázová podmínka, musí mít zesilovač fázový posun 180° . To se docílí použitím tranzistorového zesilovače se společným emitorem. Nastavením vhodného pracovního bodu tranzistoru tak, aby byla splněna amplitudová podmínka pro vznik oscilací, se oscilátor rozkmitá

frekvencí danou stejným vztahem jako u oscilátoru s derivačními členy: $f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C \cdot \sqrt{6}}$.



Obr. 1.7 Oscilátor s integračními členy



Obr. 1.8 Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika integračního článku

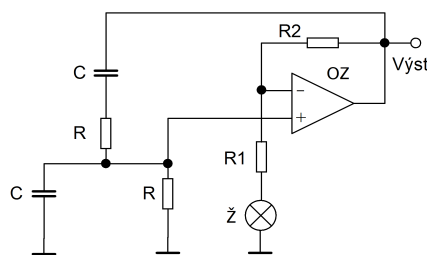
1.2.1.3 Oscilátor s Wienovým článkem

Oscilátor s Wienovým článkem je na obr. 1.9. Frekvence kmitů je určena pásmovou propustí tvořenou Wienovým článkem. Na obr.1.10 je vidět, že při kritické frekvenci má Wienův článek napěťový přenos rovný jedné třetině a fázový posun 0° . Fázovou podmínka je splněna tehdy, pokud

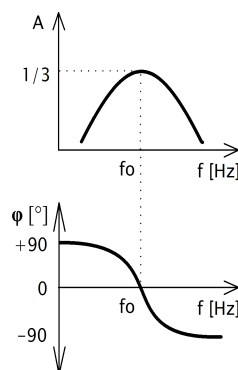
jsou použity dva tranzistorové zesilovače se společným emitorem tak, aby byl fázový posun roven 360° a nebo neinvertující zapojení s operačním zesilovačem kdy je fázový posun roven 0° . Pro splnění fázové podmínky je nutné nastavit napěťové zesílení zesilovače na: $A_U \geq 3$. Toto zesílení lze nastavit pomocí odporů R_1 a R_2 (viz. obr. 1.9) podle vztahu pro neinvertující zapojení operačního zesilovače:

$3 \leq \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$. Splněním těchto podmínek se oscilátor rozkmitá na frekvenci danou

kritickou frekvencí Wienova článku, která je dána vztahem: $f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$.

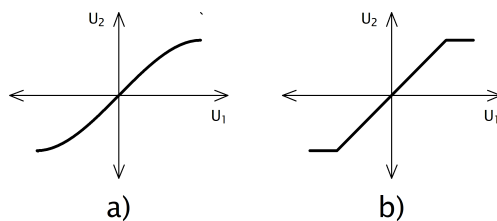


Obr. 1.9 Oscilátor s Wienovým článkem



Obr. 1.10 Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika Wienova článku

Pokud je v oscilátoru použit tranzistorový zesilovač není obvykle nutno stabilizovat amplitudu výstupního napětí. Na rozdíl od zesilovače s velkým zesílením (např. operační zesilovač) je amplitudu výstupního napětí nutné stabilizovat. Toto je dáno převodní charakteristikou použitého zesilovače, která je znázorněna na obr. 1.11 a) resp. obr. 1.11 b). Ostrý zlom charakteristiky lze odstranit např. použitím žárovky spojené do série s odporem R_1 , jak je naznačeno na obr. 1.9.



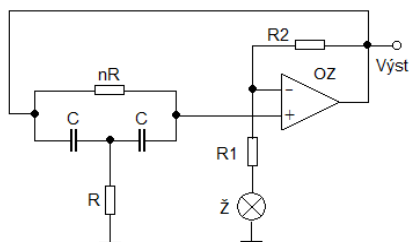
Obr. 1.11 Převodní charakteristika zesilovače a) s malým zesílením, b) s velkým zesílením

1.2.1.4 Oscilátor s přemostěným T-článkem

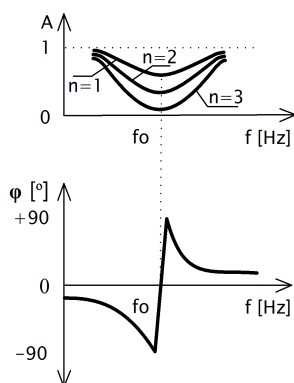
Oscilátor s přemostěným T-článkem je na obr. 1.12. T-článek je duální k Wienovu článku. Jedná se tedy o pásmovou zádrž. Na amplitudové a fázové charakteristice (obr. 1.13) je vidět, že při kritické frekvenci má článek fázový posun 0° . Je zde také výhodné použít operační zesilovač v neinvertujícím zapojení, jako tomu bylo i u oscilátoru s Wienovým článkem. Nastavení napěťového zesílení je ale o něco málo složitější. Zde musí mít zesilovač takový minimální napěťový zisk, který je závislý na konstantě n (čím je větší n , tím větší je při kritické frekvenci útlum, který je nutno kompenzovat tak, aby byly splněny amplitudové podmínky pro vznik oscilací). Velikost napěťového zesílení neinvertujícího operačního zesilovače je dáno vztahem:

$$A_u = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right). \text{ Tedy vhodným nastavením zesílení se oscilátor rozkmitá frekvencí, která je dána}$$

kritickou frekvencí přemostěného T-článku podle vztahu: $f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$. Použitím zesilovače s velkým zesílením je opět nutno stabilizovat amplitudu kmitů stejným způsobem, jak je vysvětleno v 1.2.1.3 na obr. 1.11 a) resp. 1.11 b). V praxi se ale v těchto oscilátorech nejčastěji používá dvojitý přemostěný T-článek. Tento článek má stejné chování, ale má lepší vlastnosti oproti jednoduchému T-článku.



Obr. 1.12 Oscilátor s přemostěným T-článkem



Obr. 1.13 Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika přemostěného T-článku

1.2.2 LC oscilátory

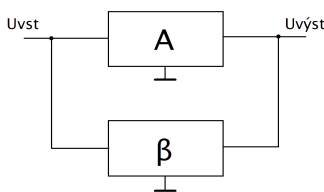
Jedná se o zpětnovazební oscilátory, které používají ve zpětné vazbě zpravidla paralelní rezonanční obvod. LC oscilátory lze rozdělit z hlediska provedení zpětné vazby do dvou hlavních skupin:

- Tříbodové oscilátory
- Oscilátory s indukční vazbou

1.2.2.1 Tříbodové oscilátory

Tříbodové oscilátory jsou dané svojí charakteristickou zpětnou vazbou. Blokové schéma tříbodového oscilátoru je na obr. 1.14. Z obrázku je zřejmé, proč mají tyto oscilátory název tříbodové (je to dáno připojením zpětné vazby ve třech bodech). Zpětná vazba obrací fázi o 180° a tudíž se jako zesilovače využívá tranzistorového zesilovače se společným emitorem případně operačního zesilovače v invertujícím zapojení tak, aby byly splněny podmínky pro vznik oscilací. Mezi hlavní reprezentanty tříbodových oscilátoru se řadí:

- Hartleyův oscilátor
- Colpittsův oscilátor
- Clappův oscilátor (modifikace Colpittsova oscilátoru)

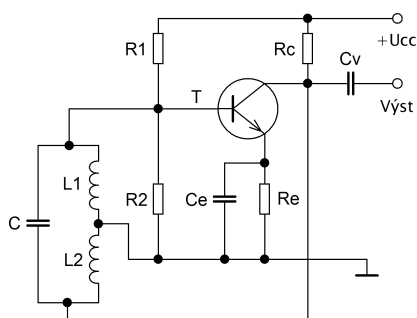


Obr. 1.14 Blokové schéma tříbodového oscilátoru

1.2.2.1.1 Hartleyův oscilátor

Zapojení Hartleyova oscilátoru je na obr. 1.15. Zpětnou vazbu tvoří rezonanční obvod složený z indukčností L_1 , L_2 a kapacitoru C . Tento rezonanční obvod se chová jako filtr, který propouští pouze rezonanční kmitočet f_0 . Spojení indukčností L_1 a L_2 je přivedeno na zem, což souhlasí s blokovým schématem třibodového zpětnovazebního oscilátoru. Po splnění amplitudové a fázové podmínky se oscilátor rozkmitá na rezonanční frekvenci zpětné vazby, která je dána

Thomsonovým vztahem: $f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$; $L = L_1 + L_2$.

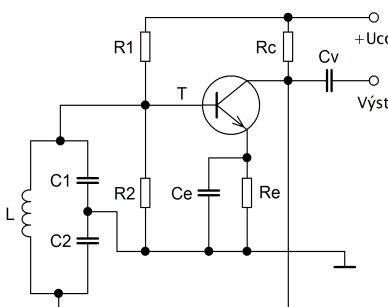


Obr. 1.15 Hartleyův oscilátor [1]

1.2.2.1.2 Colpittsův oscilátor

Colpittsův oscilátor funguje obdobně jako Hartleyův. Rozdíl je pouze v rezonančním obvodu, který tvoří zpětnou vazbu. Tento rozdíl je zřejmý z obr. 1.16, kde je uzemněno spojení kapacitorů C_1 a C_2 (na rozdíl od Hartleyova oscilátoru, kde je uzemněno spojení L_1 a L_2). Rezananční obvod se zde také chová jako propust, která propustí pouze rezonanční kmitočet f_0 . Po splnění amplitudové a fázové podmínky se oscilátor rozkmitá na rezonanční frekvenci danou

zpětnou vazbou, která je dána Thomsonovým vztahem: $f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$; $C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$.

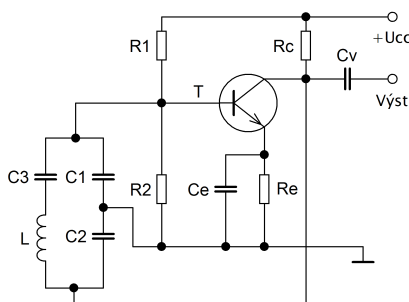


Obr. 1.16 Colpittsův oscilátor [1]

1.2.2.1.3 Clappův oscilátor

Jak již bylo řečeno v 1.2.2.1 modifikací Coplittsova oscilátoru dostaneme Clappův oscilátor. Modifikace spočívá v přidání kondenzátoru C_3 v sérii s induktorem L tak, jak je naznačeno na obr. 1.17. Přidáním kondenzátoru C_3 se zlepši možný rozsah a také stabilita celého oscilátoru. Splněním fázové a amplitudové podmínky se oscilátor rozkmitá na rezonanční frekvenci zpětné vazby danou

vztahem:
$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}; \quad C = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)^{-1} .$$



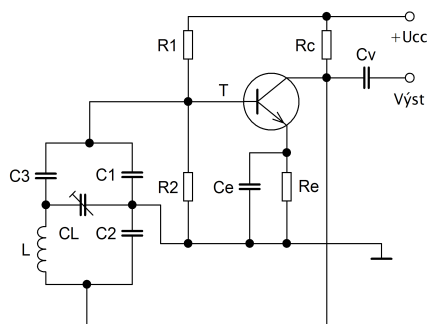
Obr. 1.17 Clappův oscilátor [2]

1.2.2.1.4 Vackářův oscilátor

Vackářův oscilátor je na obr. 1.18. Jedná se o další modifikaci Colpittsova oscilátoru doplněný o kapacitor C_3 v sérii s induktorem L a ladící kapacitor C_L . Pokud je kapacita C_L přibližně rovna nule, a jsou splněny podmínky pro vznik oscilací, obvod se rozkmitá frekvencí, která je dána

vztahem:
$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}; \quad C = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)^{-1} .$$
 Pokud se bude kapacita ladícího kapacitoru

C_L zvětšovat, bude se zvětšovat i kmitočet oscilátoru. Tento oscilátor patří mezi velmi stabilní. Pokud bychom chtěli stabilitu oscilátoru ještě zvětšit, je to možné pomocí použití krystalového rezonátoru.



Obr. 1.18 Vackářův oscilátor [2]

1.2.2.2 Oscilátory s indukční vazbou

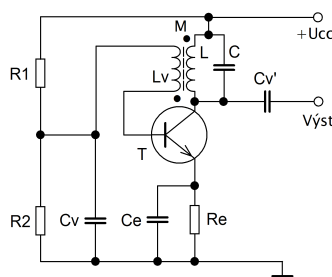
Oscilátory s indukční vazbou jsou tvořeny rezonančním obvodem, který určuje výstupní kmitočet. Rezonanční obvod takového oscilátoru se skládá z kapacitoru a dvou induktorů, které se navzájem ovlivňují pomocí vzájemné indukčnosti M . Jako zesilovače se zde nejčastěji využívá tranzistorového zesilovače v zapojení se společným emitorem. Mohou se zde ale také využít i jiná zapojení (společný kolektor nebo společná báze). Pokud je použito zesilovače, který obrací fázi, musí se docílit toho, aby fázi obracel také rezonanční obvod (jinak by nebyla splněna fázová podmínka pro vznik oscilací). To je dosaženo obrácením smyslu vinutí cívek (resp. prohozením konců vinutí). Tímto je fázová podmínka splněna a po vhodném nastavení zisku zesilovače se obvod rozkmitá. Mezi hlavní reprezentanty oscilátorů s indukční vazbou řadíme:

- Meissnerův oscilátor
- Reinartzův oscilátor
- Armstrongův oscilátor
- Schnellův oscilátor

1.2.2.2.1 Meissnerův oscilátor

Jak již bylo řečeno, tento oscilátor je typický svojí indukční vazbou, v tomto případě značenou M (viz. obr. 1.19). Vinutí cívek L a L_V je přizpůsobeno tak, aby byla splněna fázová podmínka pro vznik oscilací a to vhodným uspořádáním začátků a konců obou cívek. Kmitočet

oscilátoru je dán následujícím vztahem:
$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C}} \cdot$$

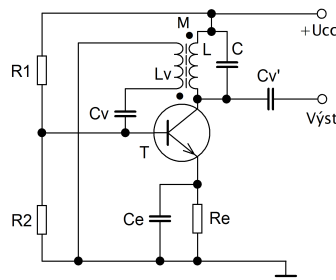


Obr. 1.19 Meissnerův oscilátor [3]

1.2.2.2.2 Reinartzův oscilátor

Další oscilátor s indukční vazbou je Reinartzův oscilátor. Jeho schéma je znázorněno na obr. 1.20. Opět jsou zde přizpůsobeny začátky a konce cívek L a L_V tak, aby byla splněna fázová

podmínka. Oscilátor pracuje na frekvenci pro níž platí vztah: $f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C}}$.

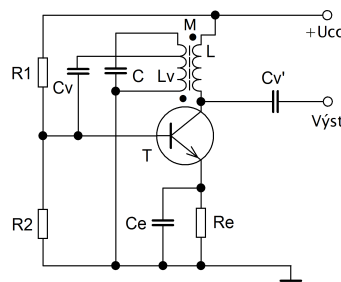


Obr. 1.20 Reinartzův oscilátor [3]

1.2.2.2.3 Armstrongův oscilátor

Armstrongův oscilátor je na obr. 1.21. Tento oscilátor je od ostatních oscilátorů s indukční vazbou mírně odlišný tím, že má z cívky L_V vyvedenou odbočku přes vazební kapacitor C_V do báze tranzistoru T. Je opět nutné splnit všechny podmínky pro vznik oscilací, jak již bylo řečeno v 1.2.2.2

Pro pracovní kmitočet tohoto oscilátoru platí vztah : $f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C}}$.

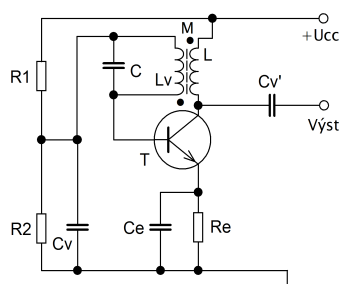


Obr. 1.21 Armstrongův oscilátor [3]

1.2.2.2.4 Schnellův oscilátor

Posledním zmíněným oscilátorem s indukční vazbou je Schnellův oscilátor, který je na obr. 1.22. Jako u všech předchozích oscilátorů s indukční vazbou je i zde nutné splnit podmínky pro vznik oscilací, uvedené v 1.2.2.2. Pracovní kmitočet Schnellova oscilátoru je opět dán již několikrát

zmíněným vztahem: $f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C}}$.



Obr. 1.22 Schnellův oscilátor [1]

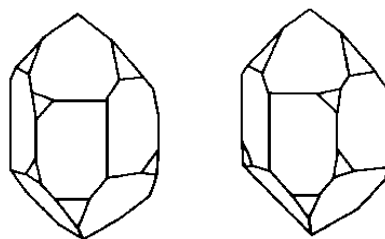
1.3 Piezoelektrický rezonátor

Piezoelektrický rezonátor se skládá z křemenného výbrusu. Křemen [12] je přírodní surovina, která má velmi dobré chemické a mechanické vlastnosti, ale i vlastnosti piezoelektrické. Jedná se o oxid křemíku, který má chemický vzorec: SiO_2 . Křemen, který se dá použít v elektronice musí mít určitou kvalitu a nesmí v sobě obsahovat nečistoty, různé praskliny, poruchy ve struktuře apod. Ačkoli je v zemské kůře přibližně 14 % tohoto oxidu křemíku, je pro účely elektrotechniky velmi obtížné najít křemen požadovaných vlastností. Místo, na kterém se přírodní křemen požadovaných vlastností nachází, je Madagaskar a Brazílie.

Protože se křemen požadovaných vlastností vyskytuje v přírodě velmi zřídka, byla vyvinuta metoda, pro vytvoření syntetického křemene. Syntetický křemen se vytváří v alkalickém roztoku s křemennou drtí v přístroji, který se nazývá autokláv. V autoklávu vzniká syntetický křemen za teploty 400 °C a tlaku 1000 MPa.

Z křemenného krystalu, který je na obr. 1.23, se poté odřízne pod vhodným úhlem křemenná destička. Podle úhlu, který svírá výchozí poloha řezu se dvěma osami rozeznáváme různé typy řezů:

- Řez Y
- Řez AT
- Řez NT



Obr. 1.23 Krystaly křemene [4]

1.3.1 Stabilita kmitočtu piezoelektrického rezonátoru

Dlouhodobá stabilita [12] piezoelektrického rezonátoru je dána změnami hmotnosti na povrchu výbrusu, ale také může být ovlivněna způsobem připevnění elektrod k výbrusu, které se k výbrusu připevňují napařováním, kde může dojít např. vlivem teploty k pnutí. AT řez, který kmitá v tloušťkově střižném módu, lze považovat za mikrováhu. Tedy podle [12] změna hmotnosti na povrchu výbrusu o $5 \cdot 10^{-9}$ gramu vyvolá změnu frekvence u rezonátoru pracujícím na kmitočtu 10 MHz změnu kmitočtu o 1 Hz. Pokud je požadována vysoká stabilita kmitočtu, je nutné omezit hmotnostní změny na povrchu rezonátoru. Na povrchu rezonátoru mohou vlivem okolního prostředí vznikat nežádoucí oxidy, které se mohou vyskytovat na kovové elektrodě. Tomu lze ale snadno zabránit tím, že se rezonátor uzavře do pouzdra, ze kterého se vyčerpá vzduch.

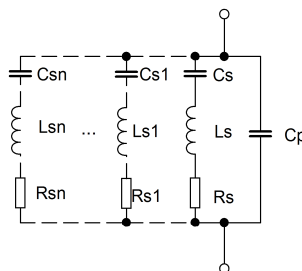
Jak již bylo řečeno, teplota může mít vliv na dlouhodobou, ale i krátkodobou stabilitu kmitočtu. Tato závislost lze vyjádřit tzv. teplotním koeficientem kmitočtu (TKf). TKf vyjadřuje relativní změnu kmitočtu vztaženou na $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. TKf je dán následujícím vztahem:

$$TKf = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_{jm}(T_2 - T_1)} \quad [12], \text{ kde } f_{max} \text{ je maximální kmitočet, } f_{min} \text{ je minimální kmitočet, } T_2 - T_1 \text{ je}$$

rozdíl teplot, f_{jm} je jmenovitý kmitočet rezonátoru.

1.3.2 Náhradní schéma piezoelektrického rezonátoru

Náhradní schéma piezoelektrického rezonátoru je na obr. 1.24. Pomocí tohoto schématu lze popsat vlastnosti a chování piezoelektrického rezonátoru. Náhradní schéma se skládá z hlavní sériové větve s prvky C_s , L_s , R_s a paralelní větve, která je dána prvkem C_p . Sériová větev v náhradním schématu popisuje dynamické chování piezoelektrického rezonátoru. Dynamická indukčnost [12] L_s reprezentuje kmitající hmotu, dynamická kapacita C_s reprezentuje elasticitu a prvek R_s reprezentuje náhradní odpor, který představuje tlumení kmitů, které může být způsobeno např. připevněním piezoelektrického rezonátoru k elektrodám, působením okolního prostředí, což může být například teplota, vlhkost apod.



Obr. 1.24 Náhradní schéma piezoelektrického rezonátoru

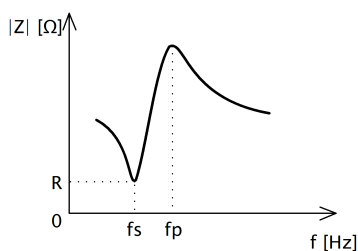
Paralelní kapacita je na obr. 1.24 dána prvkem C_P . Tato kapacita je dále určena především kapacitou křemenného výbrusu a kapacitou přívodů krystalového rezonátoru. Velikost kapacity C_P se pohybuje řádově v jednotkách pF. Další dvě sériové větve, které jsou dány prvky C_{S1} , L_{S1} , R_{S1} a C_{S2} , L_{S2} , R_{S2} odpovídají kmitočtům, na kterých může rezonátor fungovat. Reálný krystalový rezonátor [5] se totiž chová jako rezonanční obvod s několika rezonančními kmitočty. Pokud je ale uvažován jeden konkrétní kmitočet, na který je rezonátor konstruován, lze náhradní obvod zjednodušit pouze na sériovou větev s prvky C_S , L_S , R_S a k tomu připojenou paralelní větev danou prvkem C_P , jak tomu je naznačeno na obr. 1.24.

Krystalový rezonátor je schopen pracovat na dvou rezonančních kmitočtech. Jedná se o kmitočet sériový a paralelní. Při sériovém rezonančním kmitočtu nastává rezonance na prvcích C_S , L_S , R_S a tudíž je impedance dána pouze prvkem R_S , což představuje reálnou část impedance Z . Obvod se pak chová jako odpor s nulovým fázovým posunem mezi napětím a proudem. Sériový

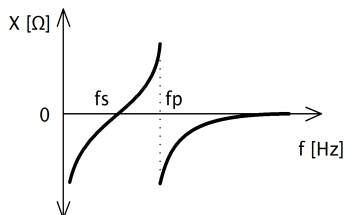
rezonanční kmitočet krystalového rezonátoru je dán vztahem [12], [5]: $f_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L_S \cdot C_S}}$ a

paralelní kmitočet je dán vztahem: $f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L_S \frac{C_S \cdot C_P}{C_S + C_P}}}$. Na obr. 1.25 je kmitočtová závislost

impedance Z rezonátoru. Na obr. 1.26 je kmitočtová závislost reaktance X rezonátoru. Na obou obrázcích je také vyznačena poloha sériového rezonančního kmitočtu f_s a paralelního kmitočtu f_p . O tom, jestli bude rezonátor kmitat na sériovém nebo paralelním kmitočtu pak rozhoduje výsledné zapojení celého oscilátoru (zejména volba zpětné vazby).



Obr. 1.25 Kmitočtová závislost impedance Z rezonátoru



Obr. 1.26 Kmitočtová závislost reaktance X rezonátoru

Dalším velmi důležitým parametrem krystalového rezonátoru je činitel jakosti Q , který je dán vztahem [12]: $Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot L_s}{R_s} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot R_s \cdot C_s}$. Činitel jakosti [12] je míra aktivity a kmitočtové stability krystalového rezonátoru. Požaduje se tedy velký činitel jakosti Q krystalového rezonátoru, aby se zajistila stabilita kmitočtu. Ve skutečnosti se činitel jakosti pohybuje v hodnotách 10^4 až 10^7 .

1.3.3 Použití piezoelektrických rezonátorů

Piezoelektrické rezonátory mají v dnešní době velmi vysoké uplatnění. Používají se zejména ve spotřební elektronice pro taktování mikroprocesorů (hodinky, hodiny, přehrávače, počítače), v přenosové technice (televize, rádia, mobilní telefony, satelit), v přístrojích pro zdravotnictví (senzory pro detekci plynů, vlhkosti, teploty apod.), ale také jako různé frekvenční filtry v rádiových zařízeních.

1.3.3.1 Použití piezoelektrických rezonátorů pro detekování plynů

Jak již bylo řečeno v 1.3.3, je možné využít piezoelektrický rezonátor pro detekci plynů a par z okolního prostředí. Tento princip [5] spočívá v nanesení určité látky na povrch křemenného výbrusu. Tato látka by měla být schopna na sebe navázat sledovanou látku v tomto případě určitý plyn. Absorpční látka na povrchu křemenného výbrusu je schopna do sebe navázat detekovaný plyn a tím se zvětší hmotnost této látky. Hmotnostní přírůstek je pak příčinou posunutí rezonančního kmitočtu. Posun rezonanční frekvence je dán Sauerbreyovým vztahem [5]:

$$\Delta f = -2,66 \cdot 10^{-6} \left(\frac{f^2 \cdot \Delta m}{A} \right), \text{ kde } f \text{ je jmenovitý rezonanční kmitočet krystalového rezonátoru,}$$

Δm je hmotnost látky (plynu), která je navázána na absorpční látku, A je plocha elektrody v cm^2 .

Látka, schopná na sebe navázat jinou látku (dále jen sorbent), musí mít nízkou hodnotou odpařování při provozních teplotách a to proto, aby změna hmotnosti Δm nebyla touto látkou nikterak ovlivněna, a aby Δm byla hmotnost pouze látky, kterou chceme detekovat. Sorbent také musí mít k měřené látce vysokou afinitu (přilnavost). Sorbent nanesený na piezoelektrický rezonátor by také neměl být nanesen v příliš slabé vrstvě a zároveň by neměla být tato vrstva příliš silná, což by mohlo mít za následek sice zvýšení citlivosti snímání, ale zároveň snížení stability. Tudíž vhodná tloušťka sorbentu je věc individuální a je to záležitost spíše experimentální v nalezení vhodného optima pro danou aplikaci. Hmotnost vrstvy sorbentu se může pohybovat podle [5] řádově v rozmezí 1 až $100 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^2$.

Rozlišovány mohou být dva typy sorbentů. První typ sorbentu je sorbent s vratnou sorpcí, tedy látka, která je navázána na sorbent se může odpařit a následně v další její přítomnosti navázat. Tudiž se jedná o reakci vratnou (opakovatelnou). Druhý typ sorbentu je sorbent, který detekovanou látku na sebe naváže a dále již nemůže být nikterak ze sorbentu odstraněna. Tudiž se jedná o nevratnou (neopakovatelnou) reakci. V praxi bude mít asi mnohem větší uplatnění první typ sorbentu (tedy sorbentu s vratnou sorpcí), než sorbentu druhého typu (sorbentu s nevratnou sorpcí). Na obrázku 1.27 je znázorněna tabulka s příklady látek, které je možné stanovit pomocí piezoelektrického rezonátoru a k tomu použité sorbenty.

Detekované látky	Sorbenty látek
uhlovodíky	silikonový olej
aromáty	β , β – dipropionitril, polyethylenglykol 400
nenasycené uhlovodíky	glyceryn s AgNO_3
schlorované uhlovodíky	polyanilin, polystyren
H_2O (vzdušná vlhkost)	polypyrrol, silikagel, Nafion (polymer na bázi PTFE se sulphonickými skupinami), molekulová síta, Al_2O_3
H_2S	octan olovnatý, Ag, Cu
NH_3	kyselina ascorbová, extrakt papriky
NH_3 , NO_x , SO_2 , H_2S	polypyrrol
organofosfáty	izonitrilobenzoyloctan sodný, komplex cobalt – izonitrilobenzoylaceton

Obr. 1.27 Detekovatelné látky a jejich sorbenty používané v piezosenzorice [5]

1.3.3.2 Použití piezoelektrických rezonátorů pro detekování par rtuti

Tato metoda je založena na posunu rezonanční frekvence piezoelektrického rezonátoru vlivem působení mikrohmotnosti na rezonátor.

Prvek, který by mohl být v tomto případě sorbentem par rtuti je například zlato. Zlato na sebe váže rtuť. Rtuť je dobrým rozpouštědlem zlata a touto reakcí vzniká sloučenina zlata a rtuti, která je známa jako amalgám. Látka složená ze zlata a rtuti je po dlouhou dobu využívána v lékařství, kde se amalgám využívá jako zubní výplň (plomba), která zabraňuje dalšímu šíření zubního kazu. Tímto způsobem lze podle [5] detekovat již 10^{-12} g zachycené rtuti. V případě detekce par rtuti se jedná o reakci s „nevratnou sorpcí“ resp. lze provést zpětnou sorpci, ale za normálních podmínek je tento proces velmi časově náročný (musí se počkat, až se rtuť odpaří a na piezoelektrickém výbrusu zůstane opět jenom zlatý povlak). Proces desorpce lze zrychlit a to tím, že celý proces bude probíhat za zvýšené teploty, konkrétně za teploty převyšující 200 °C.

1.3.3.3 Použití piezoelektrických rezonátorů pro detekování oxidu siřičitého

Oxid siřičitý je jedovatý štiplavý bezbarvý plyn, který vzniká při spalování síry nebo méně kvalitního hnědého uhlí například v teplárnách nebo tepelných elektrárnách. Oxid siřičitý je také hlavní surovinou pro výrobu kyseliny sírové.

Oxid siřičitý je možno detekovat pomocí par rtuti. K detekování oxidu siřičitého pomocí piezoelektrického rezonátoru se používá řada principů, kde základní reakce je popsána chemickou rovnicí [5]: $2\text{SO}_2 + \text{Hg}_2^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Hg}(\text{SO}_3)_2^- + \text{Hg}_{\text{plyn}} + 4\text{H}^+$, kde je zapotřebí vodného roztoku s dusičnanem rtuťnatým. Celá reakce může probíhat v uzavřené nádobce s vodným roztokem dusičnanu rtuťnatého, kde přes roztok probublává plyn, který chceme analyzovat. Po probublání nádobkou se uvolní plynná rtuť, která je vedena k piezoelektrickému rezonátoru (s vhodným sorbentem na povrchu), který zde plní funkci detektoru (viz. předchozí odstavec) a zaznamená přítomnost páry rtuti.

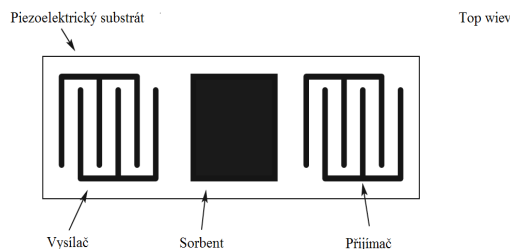
1.3.3.4 Použití piezoelektrických rezonátorů pro detekování oxidu uhelnatého

Oxid uhelnatý je jedovatý bezbarvý plyn, který je nebezpečný zejména tím, že nikterak nedráždí a nepáchne. Oxid uhelnatý vzniká při špatném spalování za přítomnosti velmi malého množství kyslíku.

Detekce oxidu uhelnatého opět souvisí s detekcí par rtuti. Reakce, pomocí které se díky přítomnosti oxidu uhelnatého začne uvolňovat pára rtuti je popsána následující chemickou rovnicí [5]: $\text{HgO}_{\text{pevné}} + \text{CO} \rightarrow \text{Hg}_{\text{plyn}} + \text{CO}_2$. Jak můžeme vidět, je zapotřebí pevného skupenství oxidu rtuťnatého, který když se sloučí s oxidem uhelnatým vznikne pára rtuti a oxid uhličitý. Pokud je požadována dostatečná rychlost celého procesu detekce, je nutné vést detekovaný plyn, přes komůrku, kde bude oxid rtuťnatý při teplotě přes 200 °C. Poté je směs vedena k piezoelektrickému rezonátoru s vhodným sorbentem (viz. 1.3.3.2), kde je detekována přítomnost páry rtuti. Tento způsob je méně vhodný pro použití v praxi z důvodu energetické náročnosti na ohřívání komůrky. Způsob není příliš vhodný z hlediska kolísání teplot při vytápění komůrky, kde kolísání teplot může negativně ovlivnit rezonanční frekvenci piezoelektrického rezonátoru, a následně by mohlo dojít ke špatnému vyhodnocení.

1.3.3.5 SAW senzory

Zkratka SAW pochází z angličtiny (Surface Acoustic Wave). Senzor se také dá využít pro detekci různých plynů. SAW senzor je na obr. 1.28 a jeho funkce je následující. Na vstupní část je přiveden VF signál, který je vlivem piezoelektrického jevu převeden na akustickou vlnu. Povrchem piezoelektrického substrátu se šíří podélná a příčná složka vlnění. Akustická vlna postupuje směrem od vysílače k přijímači. V přijímači se vlna opět převede vlivem piezoelektrického jevu na elektrický signál. Pokud na substrát vhodně umístíme nějaký typ sorbentu, který na sebe bude vázat požadované látky, začne se vlivem změny hmotnosti na substrátu měnit doba zpoždění a také výstupní amplituda výstupního signálu. Díky tomuto principu má SAW senzor velmi široké uplatnění v praxi např. ve zdravotnictví, v telekomunikačních aplikacích, v chemickém průmyslu apod.



Obr. 1.28 Struktura SAW senzoru [6]

1.3.4 Oscilátory s piezoelektrickým rezonátorem

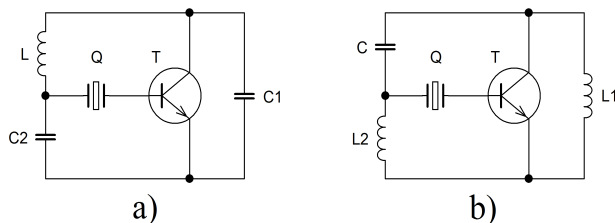
Oscilátory s piezoelektrickým rezonátorem jsou svojí strukturou velmi podobné předchozím typům oscilátorů s tou výjimkou, že na místo selektivních členů tvořených prvky R, L, C se u krystalových oscilátorů tyto členy nahrazují piezoelektrickým rezonátorem. Rozeznáváme tři základní zapojení tranzistorových oscilátorů podle umístění piezoelektrického rezonátoru v obvodu [12] :

- Tří bodová zapojení
- Se zápornou zpětnou vazbou
- S kladnou zpětnou vazbou

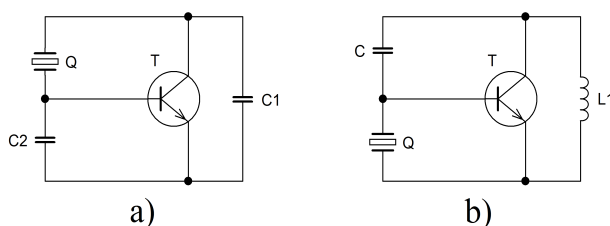
1.3.4.1 Krystalové oscilátory s tranzistory

Jak již bylo řečeno v 1.3.4, existují tři hlavní typy zapojení krystalových oscilátorů s tranzistory. Prvním ze zapojení jsou třibodové oscilátory, které jsou na obr. 1.29. Oscilátor v tomto zapojení pracuje na frekvenci mezi sériovou a paralelní rezonancí.

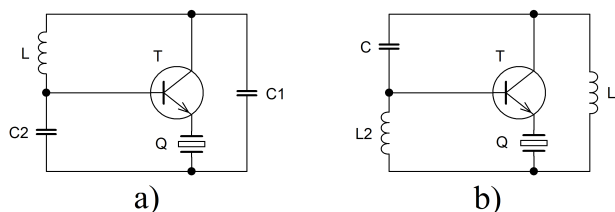
Do druhé skupiny patří oscilátory se zápornou zpětnou vazbou viz. obr. 1.30, 1.31, 1.32. Zde se piezoelektrický rezonátor zapojuje do obvodu záporné zpětné vazby, což znamená, že oscilátor bude kmitat na frekvenci, kde rezonátor vykazuje nejmenší impedanci. Oscilátory se zápornou zpětnou vazbou kmitají na frekvenci sériového rezonančního kmitočtu.



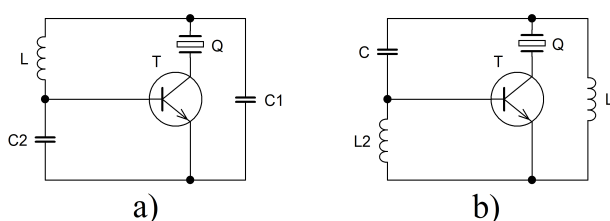
Obr. 1.29 Třibodový krystalový oscilátor a) kapacitní zapojení b) indukční zapojení [12]



Obr. 1.30 Krystalový oscilátor s rezonátorem v záporné zpětné vazbě v bázi [12]

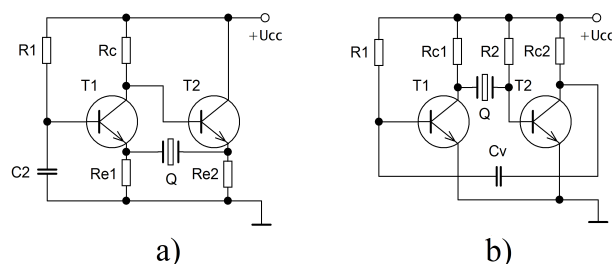


Obr. 1.31 Krystalový oscilátor s rezonátorem v záporné zpětné vazbě v emitoru [12]



Obr. 1.32 Krystalový oscilátor s rezonátorem v záporné zpětné vazbě v kolektoru [12]

Třetí typ zapojení oscilátorů jsou oscilátory s kladnou zpětnou vazbou. Tento typ oscilátoru je na obr. 1.33. Zde se zapojuje piezoelektrický rezonátor do obvodu kladné zpětné vazby. Zapojení opět pracuje na frekvenci, kde piezoelektrický rezonátor vykazuje nejnižší impedanci, což je v oblasti sériového rezonančního kmitočtu.

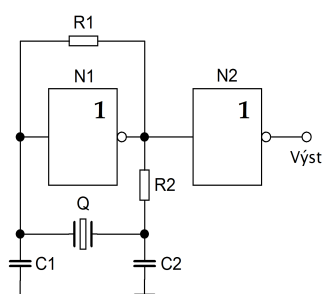


Obr. 1.33 Krystalový oscilátor s rezonátorem v kladné zpětné vazbě a) Butlerův b) Hegnerův [12]

1.3.4.2 Krystalové oscilátory s invertory

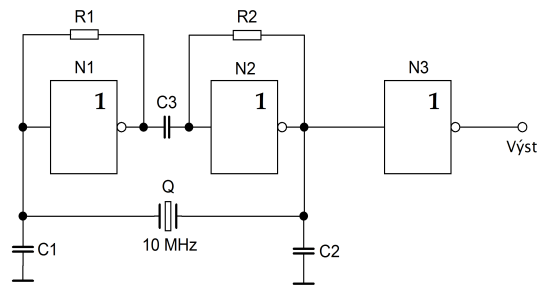
Tento typ oscilátorů využívá ve svém zapojení nejčastěji invertory pracující s úrovněmi TTL nebo CMOS. Oscilátory s hradly obecně mají menší stabilitu oproti oscilátorům popisovaných v 1.3.4.1. Také je zde velké riziko vzniku parazitních kmitů (zejména při nepřítomnosti rezonátoru v obvodu). Tento typ oscilátorů je vhodné provozovat řádově do desítek MHz (z důvodu pracovního rozsahu použitých invertorů). Zapojení má však i velkou výhodu a to je jednoduchost zapojení a malé množství externích součástek.

Jedno ze zapojení je na obr. 1.34. Zde se využívá dvou invertorů. Invertor N_1 zajišťuje oscilátoru nutný zisk a zároveň posun fáze o 180° . Rezistor R_2 slouží k úpravě výstupní impedance a kombinace kondenzátorů C_1 a C_2 spolu s piezoelektrickým rezonátorem posouvají fázi o dalších 180° . Tímto jsou splněny podmínky pro vznik oscilací a oscilátor se rozkmitá na frekvenci danou paralelní rezonancí rezonátoru. Invertor N_2 slouží k finální úpravě výstupního průběhu, kde může být použit SKO pro tvarování do obdélníkového průběhu.



Obr. 1.34 Krystalový oscilátor s jedním invertorem [12]

Další ze zapojení oscilátoru s invertory je na obr. 1.35. V zapojení jsou použity dva invertory jako součást oscilátoru a třetí invertor zde slouží také k finální úpravě výstupního signálu, jako v předchozím případě.



Obr. 1.35 Krystalový oscilátor se dvěma invertory [7]

2 Popis vlastního experimentování

Následující odstavce se týkají vlastního experimentování a popisování postupů při návrhu oscilátorů s piezoelektrickým rezonátorem. Základní experiment probíhá se dvěma shodnými oscilátory řízených piezoelektrickými rezonátory stejné frekvence, z nichž jeden je uzavřený ve vlastním pouzdře a druhý je z pouzdra vyjmut a vystaven působení okolního prostředí. Cílem této práce je zjistit frekvenční diferenci (rozdíl) těchto dvou oscilátorů a popsat, jakým způsobem lze diferenci vyhodnotit a na co je posun rezonanční frekvence piezoelektrického rezonátoru citlivý více a na co méně.

2.1 Sestavení vhodných oscilátorů pro experimentování

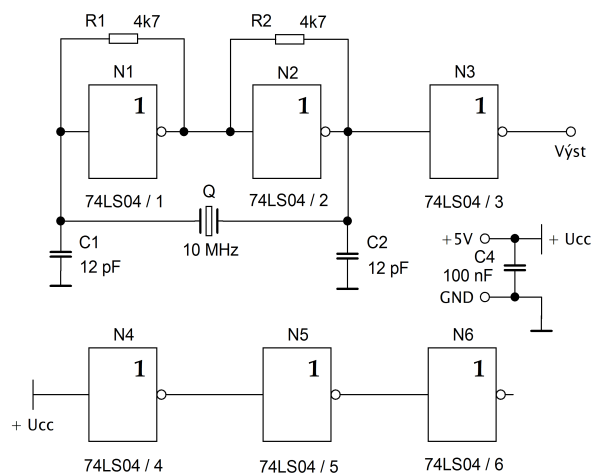
Oscilátor pro výše naznačený experiment by měl být schopen co nejpřesněji pracovat na rezonanční frekvenci uzavřeného resp. otevřeného piezoelektrického rezonátoru. V případě otevřeného piezoelektrického rezonátoru by měl být schopen oscilátor vlivem změny mikrohmotnosti na povrchu rezonátoru a následnému posunu rezonanční frekvence tuto rezonanční frekvenci následovat a tedy by měl být snadno rozladitelný v závislosti na rezonanční frekvenci rezonátoru.

Dále je nutné zajistit u oscilátoru s otevřeným piezoelektrickým rezonátorem stálost amplitudy a to i při posunu rezonanční frekvence v důsledku působení mikrohmotnosti na povrch piezoelektrického rezonátoru tak, aby kmity nebyly schopny snadného utlumení.

Další požadavek na oscilátory se týká výstupního průběhu. Průběh oscilátoru by měl být pokud možno sinusový. Piezoelektrické rezonátory jsou konstruované na sinusový průběh a pokud by tento průběh nebyl sinusový lze tušit, že v zapojení dochází ke zkreslení, které může následný experiment negativně ovlivnit.

2.1.1 Sestavení krystalového oscilátoru se dvěma invertory

Sestavení tohoto typu oscilátoru byl vybrán jako první experiment z důvodu jeho jednoduché konstrukce a byly ověřovány jeho vlastnosti. Reálné schéma zapojení z experimentu s hodnotami součástek je na obr. 2.1. Pro konstrukci byl zvolen integrovaný logický obvod 74LS04 pracující s TTL úrovní, který v sobě obsahuje 6 invertorů. Tento integrovaný logický obvod je schopen pracovat pouze s nižšími kmitočty, což při použití piezoelektrického rezonátoru s rezonanční frekvencí na 10 MHz bohatě postačuje. Pokud by ale bylo potřeba zvýšení pracovního kmitočtu, je nutné použít rychlejší integrovaný logický obvod např. 74HC04, což není logika TTL, nýbrž CMOS. Rozdíl mezi TTL a CMOS úrovněmi je znázorněn na obr. 2.2. Jak je vidět, při vhodného zvolení napájecího napětí, je možno úrovně TTL a CMOS kombinovat. Součástky R_1 , R_2 , C_1 , C_2 byly stanoveny experimentálně.



Obr. 2.1 Schéma zapojení dvouhradlového krystalového oscilátoru

	TTL	CMOS
U_{CC}	5 V	3 – 18 V
$U_{L(0)}$	0 – 0,8 V	$0 - 0,25 \cdot U_{CC}$
$U_{H(1)}$	2,5 – 5 V	$0,75 \cdot U_{CC}$ až U_{CC}
U_R	1,4 V	$0,5 \cdot U_{CC}$

Obr. 2.2 Vlastnosti TTL a CMOS

Napájení integrovaného logického obvodu je také nutno ošetřit vhodným blokovacím kondenzátorem, který kompenzuje zvlnění napětí. V tomto případě byl zvolen keramický kondenzátor 100 nF. Pokud by v obvodu nebyl použit blokovací kondenzátor, mohlo by vlivem zvlnění napětí docházet k poklesu napájení obvodu, což by mohlo mít za následek nefunkčnost celého zapojení. Toto riziko dále narůstá se zvyšujícím se pracovním kmitočtem.

Dále je také nutné ošetřit nezapojené vstupy obvodu 74LS04 z důvodu, aby nedocházelo k rušení funkce obvodu nežádoucími signály. Ošetření se provádí tak, že na vstup hradla přivedeme + napájecí napětí (log.1) a dále propojíme všechna hradla tak, jak tomu je naznačeno na obr. 2.1

Po sestavení oscilátoru byl na výstupu podle očekávání signál blížící se obdélníkovému průběhu. Oscilátor byl značně nestabilní (při přiblížení se až dotknutí zapouzdrěného piezoelektrického rezonátoru se frekvence rozbíhala řádově v jednotkách kHz). Z tohoto důvodu se tento typ oscilátoru pro plánovaný experiment jednoznačně nehodí.

2.1.2 Sestavení krystalového oscilátoru s tranzistorem

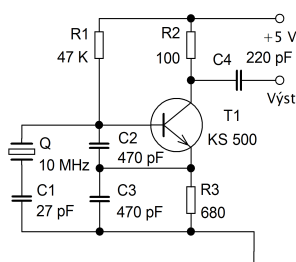
Pro další experiment byl vybrán krystalový oscilátor v Colpittsově zapojení s tranzistorem. Schéma zapojení reálného oscilátoru je na obr. 2.3. Oscilátor je napájen stejnosměrným napětím o velikosti 5 V. Oscilátor obsahuje tranzistor KS 500. Je zde také vidět, že zapojení obsahuje více součástek, než předchozí invertorový oscilátor. Také oživování celého zapojení probíhalo obtížněji, než v předchozím případě.

Nejdříve proběhl hrubý odhad všech rezistorů a kondenzátorů. Poté se zapojení zkonstruovalo na univerzální desce plošných, kde na místo pevných odporů byly umístěny odporové trimry. Odporovými trimry se experimentálně našel vhodný pracovní bod tranzistoru pro optimální funkci celého oscilátoru. Poté byly doupřaveny velikosti kapacit kondenzátorů tak, aby se výstupní průběh blížil co nejvíce sinusovce. Nakonec byly odporové trimry nahrazeny pevnými rezistory zařazené do elektrotechnické řady E12.

Zapojení se při prvních experimentech jevílo velmi příznivě požadavkům, které bylo potřebné splnit. Oscilátor s piezoelektrickým rezonátorem pracující na rezonanční frekvenci 10 MHz byl velmi stabilní. I při přiblížení se až dotknutí uzavřeného piezoelektrickému rezonátoru se frekvence držela stále na 10 MHz. Amplituda výstupního signálu velmi blízkému sinusovému průběhu při napájecím napětí 5 V byla cca 4 V, což bylo velmi uspokojivé. Další příznivou vlastností tohoto zapojení bylo, že při vyjmutí piezoelektrického rezonátoru z obvodu oscilátoru nevznikaly na výstupu žádné nežádoucí parazitní kmity. V tomto stádiu experimentování nebránilo nic tomu, ověřit vlastnosti zapojení s piezoelektrickým rezonátorem vyjmutým z jeho ochranného pouzdra.

Po vyjmutí piezoelektrického rezonátoru z ochranného pouzdra a jeho následném umístění do obvodu oscilátoru se vlivem okolního prostředí posunula jeho rezonanční frekvence nepatrně směrem dolů a na výstupu oscilátoru se objevil průběh blízký sinusovému, ale s frekvencí nižší, než

jmenovitých 10 MHz. Tento jev byl pravděpodobně způsoben vlivem okolní vlhkosti prostředí, která se navázala na piezoelektrický rezonátor a vlivem mikrohmotnostní změny se vyvolal posun této rezonanční frekvence směrem dolů přibližně o 1 kHz. Při pokusu o další zvětšení okolní vlhkosti v blízkosti rezonátoru byla použita navlhčená textilie, která byla přiblížena k rezonátoru. Po přiblížení navlhčené látky k rezonátoru se výstupní kmitočet dále snížil o dalších přibližně 1 kHz, až následně došlo k tomu, že postupně klesala výstupní amplituda a oscilátor přestal kmitat. Toto chování oscilátoru bylo značně nevýhodné ke zjištění přesné a zároveň konečné kmitočtové difference. Tudíž se usoudilo, že zapojení pro další experimentování je nevýhodné a bylo potřeba najít lepší a výhodnější řešení, které by spolehlivě zajistilo to, že při posunu rezonanční frekvence piezoelektrického rezonátoru oscilátor nepřestane pracovat.



Obr. 2.3 Schéma zapojení krystalového oscilátoru v Colpittsově zapojení

2.1.3 Sestavení krystalového oscilátoru s operačním zesilovačem

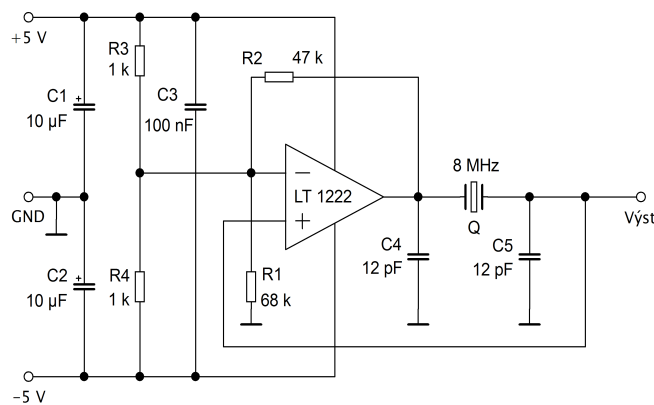
Jako další možnost pro konstrukci oscilátoru byl vybrán krystalový oscilátor s operačním zesilovačem. Zapojení tohoto oscilátoru je na obr. 2.4. Pro tuto aplikaci bylo zapotřebí vybrat rychlý OZ, který bude schopen pracovat řádově do stovek MHz. Proto byl vybrán operační zesilovač LT 1222 (pouzdro OZ je na obr. 2.5), který má parametr GBW 500 MHz (tedy při frekvenci 500 MHz má operační zesilovač zisk jedna). Operační zesilovač je nutno napájet symetrickým napájecím napětím o velikosti maximálně od V^+ do V^- 36 V. Bylo rozhodnuto, že bude postačovat napájecí napětí od V^+ do V^- 10 V. Dále bylo vhodné opatřit napájecí část vyhlazovacími kondenzátory C_1 a C_2 a blokovacím kondenzátorem C_3 , který vyrovnává napěťové poklesy vlivem indukčnosti napájecích cest k OZ. Kondenzátory C_1 a C_2 jsou tantalové a blokovací kondenzátor C_3 je keramický.

Na výstup OZ je připojen piezoelektrický rezonátor pracující na rezonanční frekvenci 8 MHz, který je blokován keramickými kondenzátory C_4 a C_5 o kapacitě 12 pF a druhým koncem je připojen k neinvertujícímu vstupu OZ. Zisk OZ byl nastaven experimentálně tak, že na místo rezistorů R_1 a R_2 byly umístěny odporové trimry, pomocí kterých se na výstupu nastavil sinusový

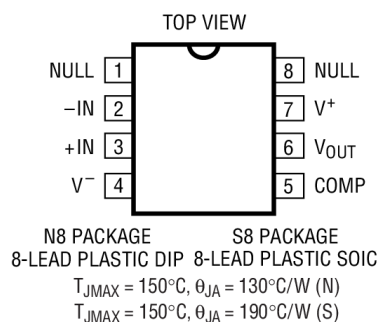
průběh. Po nastavení byly odporové trimry nahrazeny pevnými rezistory. Rezistory R_3 a R_4 se osvědčilo zvolit v poměru 1:1.

Oscilátor s uzavřeným piezoelektrickým rezonátorem ve svém ochranném pouzdře kmitá svojí jmenovitou frekvencí 8 MHz. Na výstupu je průběh velmi blízký sinusovému s amplitudou při napájecím napětí od V^+ do V^- 10 V cca 9 V. Frekvence i amplituda jsou i po přiblížení až dotknutí se piezoelektrického rezonátoru ve svém ochranném pouzdře velmi stabilní. Také při absenci piezoelektrického rezonátoru v zapojení oscilátoru nejsou na výstupu žádné nežádoucí parazitní kmity. Po vyjmutí piezoelektrického rezonátoru ze svého ochranného pouzdra a po umístění do obvodu oscilátoru se vlivem působení okolního prostředí změnila mikrohmotnost na povrchu výbrusu. Tato změna mikrohmotnosti je způsobena působením okolní vlhkosti. Vlivem tohoto se posune rezonanční frekvence piezoelektrického rezonátoru směrem dolů a následně se sníží i frekvence výstupního sinusového průběhu oscilátoru. Změna je přibližně o 1 kHz tak, jako u předchozího typu oscilátoru. Při pokusu o další zvětšení okolní vlhkosti v blízkosti rezonátoru byla opět použita navlhčená textilie, která byla přibližována k výbrusu. Při přiblížení navlhčené látky k výbrusu se výstupní kmitočet dále snížil o dalších přibližně 3 kHz, ale oproti předchozímu případu byla amplituda výstupního sinusového průběhu stále konstantní. Až po vyvinutí většího tlaku (ne příliš velkého z důvodu možné destrukce výbrusu) umělohmotným předmětem na povrch, kmity na výstupu oscilátoru zanikly.

Chování tohoto oscilátoru zcela vyhovovalo našim požadavkům pro další experimentování a následné vyhodnocení kmitočtové difference, která jak se zdálo na první pohled byla zapříčiněna změnami mikrohmotnosti na povrchu piezoelektrického rezonátoru vlivem působení okolní vlhkosti, případně vlivem působení okolní teploty. Pro další experimentování byly vytvořeny dva identické oscilátory.



Obr. 2.4 Schéma zapojení krystalového oscilátoru s OZ



Obr. 2.5 Pouzdro operačního zesilovače LT 1222

2.2 Metody a obvody pro vyhodnocení kmitočtové difference:

Po úspěšném sestavení dvou vhodných oscilátorů řízených piezoelektrickým rezonátorem bylo možné přistoupit k dalšímu experimentování. Další část experimentování byla zaměřena na vyhodnocení kmitočtové difference (kmitočtového rozdílu). Jeden z oscilátorů byl osazen piezoelektrickým rezonátorem ve vlastním pouzdře a druhý oscilátor byl osazen piezoelektrickým rezonátorem, který byl vyjmut ze svého ochranného pouzdra a vystaven působení okolního prostředí. Oba piezoelektrické rezonátory byly shodné (stejný výrobce, stejné jmenovité hodnoty).

Diference je obvykle způsobována změnami mikrohmotnosti na povrchu piezoelektrického výbrusu, které zapříčiní posun rezonanční frekvence rezonátoru zpravidla směrem dolů. Změna rezonanční frekvence rezonátoru následně zapříčiní změnu frekvence výstupního průběhu oscilátoru. Abychom byli schopni stanovit nějaký závěr o působení mikrohmotnosti na povrch rezonátoru a následné posunutí rezonanční frekvence, musíme změnu kmitočtu vhodným způsobem stanovit. Této problematice se věnují následující odstavce.

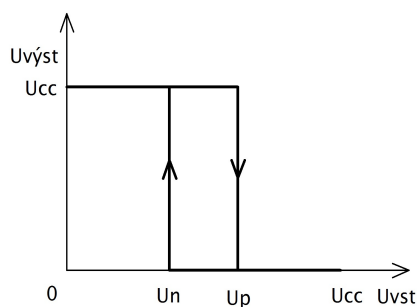
2.2.1 Vyhodnocení kmitočtové difference pomocí D-klopného obvodu

D-klopný obvod patří mezi synchronní klopné obvody. To znamená, že se stav na výstupu mění pouze v okamžiku, kdy je přiveden na klopný obvod synchronizační impuls (hodinový impuls) na vývod CLK D-klopného obvodu. Pravdivostní tabulka D-klopného obvodu je na obr. 2.6. Z pravdivostní tabulky a dále z časového diagramu, který je na obr. 2.7 je zřejmé, že D-klopný obvod lze využít pro vyhodnocení kmitočtové difference dvou oscilátorů, což bude popsáno dále.

Byly sestaveny dva oscilátory řízené piezoelektrickým rezonátorem a byly popsány v 2.1.3. Oba oscilátory byly osazeny shodnými piezoelektrickými rezonátory s jmenovitým kmitočtem 8 MHz. Jeden z rezonátorů byl uzavřen ve svém ochranném pouzdře a druhý byl ze svého ochranného

pouzdra vyjmut a vystaven působení okolního prostředí. Okolní prostředí působí na povrch piezoelektrického výbrusu změnou mikrohmotnosti. Změna mikrohmotnosti je způsobena okolní vlhkostí (křemen je dobrý sorbent vody), ale v případě použití sorbentu na povrchu piezoelektrického výbrusu, který je na sebe schopen vázat jiné látky, může být změna mikrohmotnosti způsobena i tímto. Změna mikrohmotnosti na povrchu způsobuje posun rezonanční frekvence piezoelektrického rezonátoru směrem dolů, což zapříčiní i posun frekvence výstupního sinusového průběhu z oscilátoru také směrem dolů na stejnou hodnotu, jako je rezonanční frekvence piezoelektrického rezonátoru.

Výstup z oscilátorů, jak již bylo řečeno, je sinusový. Pro vyhodnocení kmitočtové diference v D-klopném obvodu je nutné sinusový průběh vhodným způsobem převést do obdélníkového průběhu. Proto zde byl vybrán CMOS obvod 74HC14 hlavně z důvodu napájení. Obvod v sobě obsahuje 6 invertorů, které jsou na svých vstupech vybavené Schmittovým klopným obvodem. SKO [9] vykazuje hysterezní smyčku. Pro popis funkce je dále popisován již zmíněný invertor se vstupem s SKO. Převodní charakteristika této kombinace je na obr. 2.8. Z obrázku je patrné, že pokud je na vstup přivedena log. 0 bude na výstupu log. 1. Pokud napětí na vstupu vzroste nad hranici U_P , obvod se následně přepoklopí do log. 0. Po zpětném snižování napětí a překonání hranice U_N se obvod opětovně přepoklopí do log. 1. Díky tomuto bude na výstupu sice průběh negovaný, ale pravoúhlý, což bylo vyžadováno pro další zpracování signálu D-klopným obvodem.



Obr. 2.8 Převodní charakteristika invertoru s SKO [9]

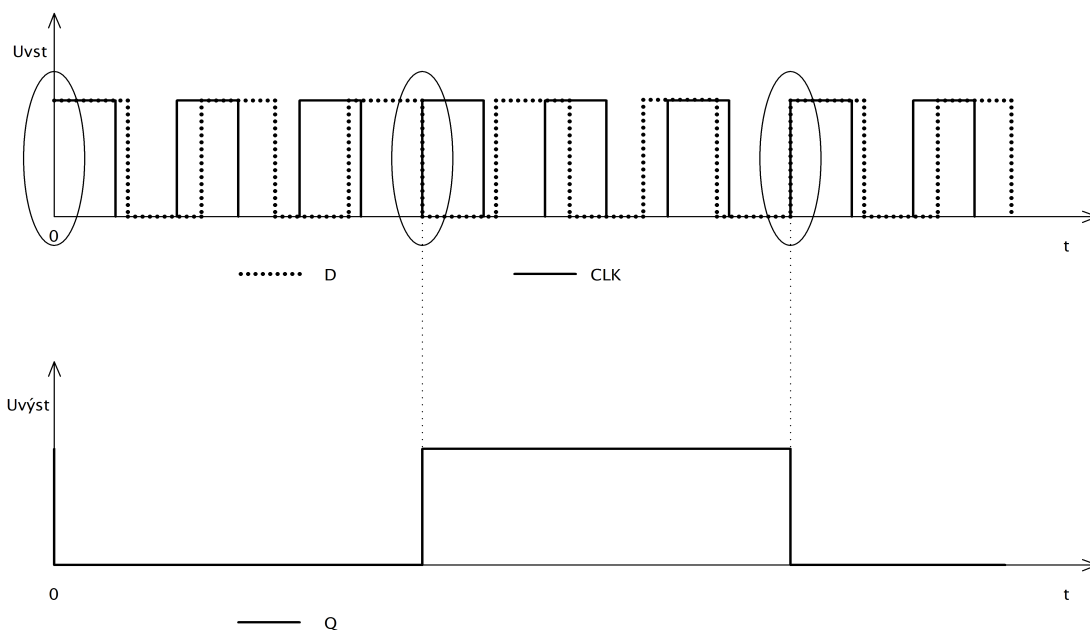
Po převedení sinusových signálů u obou oscilátorů na obdélníkový průběh jsou signály přivedeny na vstupy D-klopného obvodu.

Vyhodnocení kmitočtové diference lze vysvětlit pomocí pravdivostní tabulky, která je na obr. 2.6 a z časového diagramu na obr. 2.7. Nejdříve bylo nutné nastavit D-klopný obvod do režimu řízení náběžnou hranou hodinovým signálem přivedeným na vývod **CLK**. To bylo provedeno

připojením log.1 na vstupy **R** a **S**. Dále bylo nutné připojit již obdélníkové signály z oscilátorů k D-klopnému obvodu. Signál z oscilátoru s piezoelektrickým rezonátorem v ochranném pouzdře byl přiveden na vývod **CLK** a signál z oscilátoru s piezoelektrickým rezonátorem vyjmutým z ochranného pouzdra byl přiveden na vývod **D**. Na obr. 2.7 je vidět, že jsou na vstupy D-klopného obvodu přivedeny dva signály různé frekvence. Průběh plnou čarou má nižší frekvenci, než průběh tečkovanou čarou. Na tomto časovém diagramu je vidět, že v čase $t=0$ se D-klopný obvod překlopil z log. 1 do log. 0. To lze vysvětlit na základě pravdivostní tabulky tak, že D-klopný obvod čekal, až se při náběžné hraně na vstupu **D** objeví log. 0. V důsledku tohoto se D-klopný obvod překlopil do log. 0. Po překlopení do log. 0 obvod čekal, až se při náběžné hraně CLK objeví na vstupu D log.1 a v důsledku tohoto se na výstupu klopného obvodu objevila log. 1. Nadále se celý cyklus opakuje. V časovém diagramu na obr. 2.7 jsou zakroužkovány oblasti, kdy dochází k překlopení. Vlivem rozdílných frekvencí na vstupu D-klopného obvodu a následnému překlápění se na výstupu objeví kmitočtová diference (rozdíl) těchto dvou signálů.

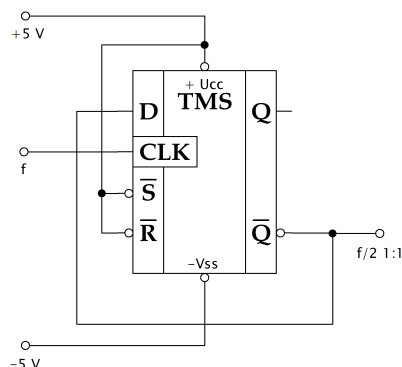
R	S	D	CLK	Q	\bar{Q}
0	0	X	X	?	?
0	1	X	X	0	1
1	0	X	X	1	0
1	1	X	X	Q_{n-1}	\bar{Q}_{n-1}
1	1	X	↓	Q_{n-1}	\bar{Q}_{n-1}
1	1	0	↑	0	1
1	1	1	↑	1	0

Obr. 2.6 Pravdivostní tabulka D-klopného obvodu [9]



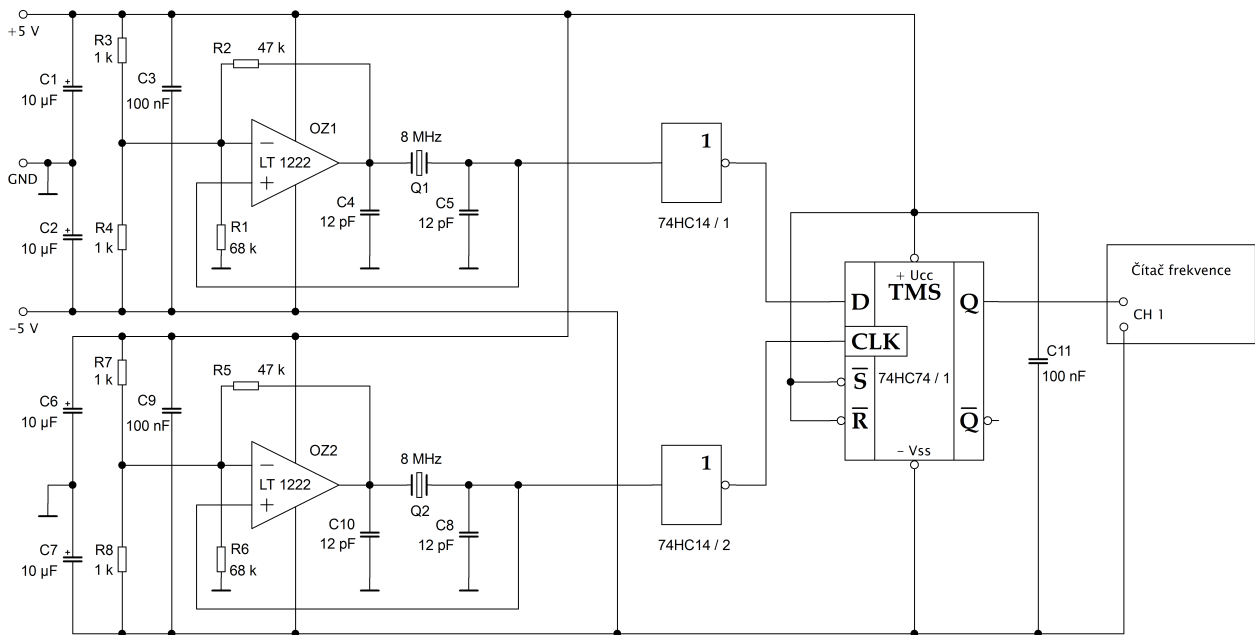
Obr. 2.7 Časový diagram vstupních a výstupních průběhů

Výstup klopného obvodu **Q** je nadále připojen k frekvenčnímu čítači, který následně zobrazí na displeji číselnou hodnotu kmitočtové difference obou oscilátorů. Kvůli velikosti napájecího napětí byl vybrán CMOS obvod 74HC74, který v sobě obsahuje dva D-klopné obvody. Pokud by výstupní signál neměl střihu 1:1 lze tedy výhodně využít druhého D-klopného obvodu v pouzdře 74HC74 jako děličku dvěma podle obr. 2.8, při vyhodnocování kmitočtové difference tímto způsobem. Je ale nutné počítat s tím, že ve skutečnosti je kmitočtová difference dvojnásobná. Použití kmitočtové děličky při experimentování v tomto případě nebylo potřeba.



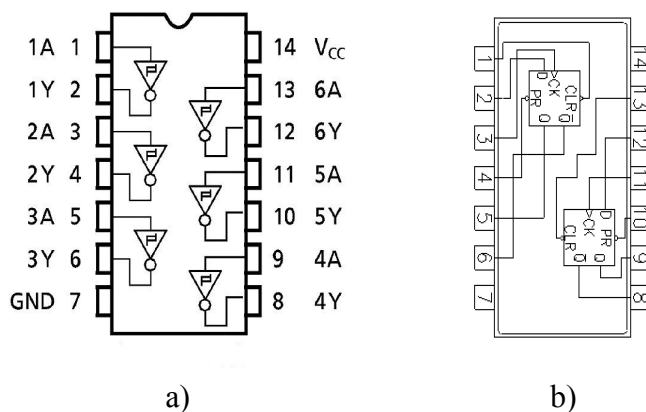
Obr. 2.8 Frekvenční dělička dvěma [9]

Konečné schéma je na obr. 2.9. Zde jsou vidět dva oscilátory s operačními zesilovači LT 1222. Oscilátory jsou podrobněji popsány v 2.1.3. Výstupní signál z oscilátorů je dále převeden z průběhu blízkému sinusovému na obdélníkový průběh pomocí obvodu 74HC14, který obsahuje 6 invertorů s SKO na vstupech. Z obvodu 74HC14 se použijí pouze dva invertory. Zbylé vstupy obvodů jsou ošetřeny stejně jako v 2.1.1 tak, aby nedocházelo k rušení funkce obvodu nežádoucími signály. Také je potřeba ošetřit přívod napájecího napětí blokovacím keramickým kondenzátorem 100 nF a to ze stejných důvodů uvedených v 2.1.1.



Obr. 2.9 Konečné schéma zapojení pro vyhodnocení kmitočtové difference

Výstupní signály z obvodu 74HC14 jsou přivedeny na vstupy **D** a **CLK** D-klopného obvodu 74HC74, kde dochází k odečtení frekvencí těchto dvou signálů a výsledkem je, že se na výstupu objeví rozdílná frekvence (diference) kmitočtů. Kmitočet je přímo zobrazitelný na displeji čítače frekvence. Napájení D-klopného obvodu je opět vhodné opatřit blokovacím kondenzátorem C_{11} o velikosti 100 nF z již výše zmíněných důvodů. Zapojení pouzder obvodu 74HC14 a 74HC74 je na obr. 2.10.



Obr. 2.10 Zapojení pouzder obvodů a) 74HC14 [10] , b) 74HC74 [11]

Sestavování obvodu probíhalo na univerzální desce plošných spojů. Po sestavení a osazení oscilátorů piezoelektrickými rezonátory (jeden ve svém ochranném pouzdrě a druhý vyjmutý ze svého ochranného pouzdra) se na displeji objevila kmitočtová difference cca 1 kHz. Po přiblížení

navlhčené textilie k otevřenému piezoelektrickému rezonátoru se diference ještě dále zvýšila na cca 4 kHz. Dále bylo požadováno, zjistit kmitočtovou diferenci pouze při přiblížení navlhčené textilie ke křemennému výbrusu tak, aby byla zanedbána okolní vlhkost místnosti a na displeji čítače by se objevovala diference od 0 Hz do frekvence takové, které odpovídá posun rezonančního kmitočtu rezonátoru, na který by bylo působeno přiblížením navlhčené textilie.

Tento problém byl vyřešen tak, že dosud uzavřený piezoelektrický rezonátor druhého oscilátoru byl také vystaven působení okolního prostředí a tím byla kompenzována chyba zapříčiněná okolní vlhkostí. Na první pohled se toto řešení zdálo jako velmi uspokojivé. Pokud na oba oscilátory působilo stejné okolní prostředí, čítač frekvence ukazoval na dispeji kmitočtovou diferenci 0 Hz. Při přiblížení navlhčené textilie k jednomu z otevřených piezoelektrických rezonátorů se kmitočtová diference dostávala přibližně ke 3 až 4 kHz.

Při bližším experimentování se ukázalo, že se kmitočtová diference začínala vyhodnocovat až při rozdílu frekvencí obou oscilátorů přibližně nad 200 Hz. Toto bylo zapříčiněno tím, že oba oscilátory pracovaly na velmi blízkém kmitočtu a přes jakousi vazbu se frekvenčně svázaly. Tato vazba byla pravděpodobně způsobena prostorovou integrací součástek na univerzální desce plošných spojů a nebo zvlněním napájecího napětí. Tento problém by řešilo úplné oddělení obou oscilátorů a to jak z hlediska napájení, tak i z hlediska prostoru. Pro orientační experimentování je tato metoda postačující. Pokud jsou požadovány přesnější výsledky vyhodnocení kmitočtové diference, je zde v následující kapitole popsána další metoda, která se jeví jako velmi přesná, ale značně nepohodlnější.

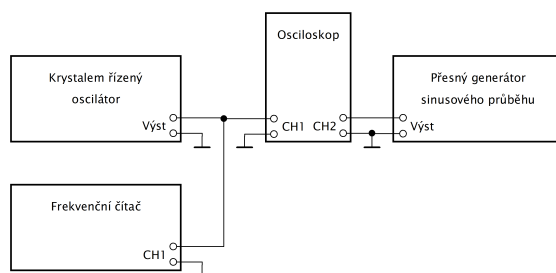
2.2.2 Vyhodnocení kmitočtové diference pomocí osciloskopu, čítače a přesného generátoru

Blokové schéma tohoto obvodu pro vyhodnocení kmitočtové diference je na obr. 2.11. Na místo dvou shodných krystalových oscilátorů, jak tomu bylo v předchozím případě je zde použit pouze jeden oscilátor řízený piezoelektrickým rezonátorem (oscilátor s OZ z kapitoly 2.1.3), který je vyjmut ze svého ochranného pouzdra a vystaven působení okolního prostředí. Jako druhý zdroj je zde použit přesný generátor sinusového průběhu, který je schopen pracovat s vysokou přesností i na vyšších kmitočtech (v tomto případě v okolí 8 MHz) a zároveň lze jeho frekvenci měnit po jednotkách Hz.

Osciloskop zde slouží spíše pro kontrolu, zda jsou na počátku experimentování shodné obě frekvence (jak oscilátoru řízeného piezoelektrickým rezonátorem tak generátor přesného kmitočtu)

a zda se tyto dvě hodnoty shodují jednak na displeji čítače tak na displeji přesného generátoru sinusového průběhu. Shodnost frekvencí se vyhodnocuje na osciloskopu tak, že se osciloskop zasynchronizuje na průběh přesného generátoru sinusového průběhu, a poté se frekvence generátoru mění podle potřeby do té doby, než se průběh krystalového oscilátoru díky nastavené synchronizaci na generátor a jeho pozměňování kmitočtu zcela „zastaví“. Takto lze velmi přesně vyhodnotit i malá kmitočtová diference. Dále se nastaví frekvence na přesném generátoru sinusového průběhu shodná s frekvencí krystalového oscilátoru. Pokud se frekvence na displeji frekvenčního čítače a přesného generátoru sinusového průběhu shodují, je možno začít s experimentováním.

Vlastní vyhodnocení kmitočtové diference probíhá tím způsobem, že je nejdříve nutno zaznamenat hodnotu, kterou zobrazuje frekvenční čítač před přiblížením navlhčené textilie a po přiblížení. Odečtením těchto dvou hodnot lze získat přesná kmitočtová diference. Pomocí osciloskopu lze zjistit, zda se rezonanční frekvence po oddálení navlhčené textilie od piezoelektrického rezonátoru vrátí na původní hodnotu či nikoli. Jak již bylo zmíněno, tato metoda je velmi přesná, ale méně pohodlná oproti předchozí metodě a to z důvodu nutnosti neustálého zaznamenávání a následnému dopočítávání hodnot pro získání kmitočtové diference.



Obr. 2.11 Blokové schéma pro vyhodnocení kmitočtové diference pomocí osciloskopu, čítače a přesného generátoru

2.3 Výsledky z experimentování

Pro další a zároveň finální experimentování byla zvolena metoda pro vyhodnocení kmitočtové diference pomocí osciloskopu, čítače a přesného generátoru z proto, že tato metoda je velmi přesná. Princip této metody je popsán v 2.2.2 a důvod, proč se mění výstupní kmitočet oscilátoru řízený piezoelektrickým rezonátorem je popsán v 2.1.3.

Experimenty probíhaly v laboratoři při teplotě 25,5 °C a relativní vlhkosti vzduchu 30 %. První experiment je zaznamenán v tabulce na obr. 2.12. Bylo potřeba vytvořit prostředí s vyšší relativní vlhkostí vzduchu. To bylo docíleno pomocí skleněné baňky s vodou. Hodnota $f_{0\ 30\ \%}$ je frekvence před experimentem při relativní vlhkosti vzduchu 30%, hodnota $f_{0\ 81\ \%}$ je frekvence uvnitř

skleněné baňky s vlhkostí vzduchu 81 %, hodnota $f_{O\ 30\ \% + 4\ \text{sek}}$ je frekvence po vyjmutí piezoelektrického rezonátoru ze skleněné baňky a po uplynutí 4 sekund s vlhkostí vzduchu 30 %. Hodnota f_{dif1} je kmitočtová diference vlhkosti vzduchu 30 % oproti vlhkosti vzduchu ve skleněné baňce s vlhkostí 81 % ($f_{\text{dif1}} = f_{O\ 30\ \%} - f_{O\ 81\ \%}$) a hodnota f_{dif2} je kmitočtová diference vlhkosti vzduchu 30 % (před experimentem) oproti vlhkosti vzduchu 30 %, ale po vyjmutí piezoelektrického rezonátoru ze skleněné baňky po uplynutí 4 sekund ($f_{\text{dif2}} = f_{O\ 30\ \%} - f_{O\ 30\ \% + 4\ \text{sek}}$). Z tohoto je vidět, že při použití piezoelektrického rezonátoru pro detekování vlhkosti je reakce tohoto senzoru rychlá. Po uplynutí dalších 4 sekund se oscilátor opět vrátil na svojí počáteční hodnotu (tedy na hodnotu $f_{O\ 30\ \%}$).

$f_{O\ 30\ \%}$ [Hz]	$f_{O\ 81\ \%}$ [Hz]	$f_{O\ 30\ \% + 4\ \text{sek}}$ [Hz]	f_{dif1} [Hz]	f_{dif2} [Hz]
7 981 894	7 977 347	7 981 831	4 547	63

Obr. 2.12 Tabulka experimentu s okolní vlhkostí vzduchu

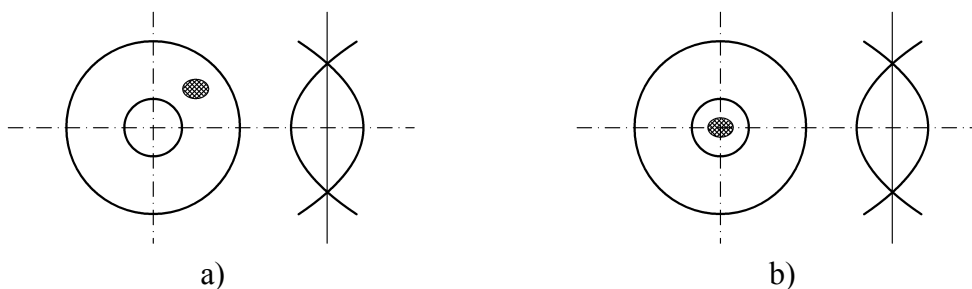
Další experiment byl podobný experimentu s okolní vlhkostí vzduchu s tím rozdílem, že místo zvýšené vlhkosti vzduchu (přítomnost vodní páry) ve skleněné baňce se do baňky umístilo malé množství isopropylenu, který se v baňce odpařoval a vznikla tak pára isopropylenu. Isopropylen se používá k odmašťování povrchů. Isopropylen má tu výhodu, že se odpařuje z povrchu celý (pokud je jeho čistota velmi vysoká) a nezanechává po sobě žádné zbytky, což bylo dále využito k dalším experimentům. Experiment je zaznamenán v tabulce na obr. 2.13. Hodnota f_{OV} je frekvence vně skleněné baňky s isopropylenovou párou, hodnota f_{OU} je frekvence uvnitř skleněné baňky s isopropylenovou párou a hodnota $f_{OV + 4\ \text{sek}}$ je frekvence po vyjmutí piezoelektrického rezonátoru ze skleněné baňky po uplynutí 4 sekund. Hodnota f_{dif1} je kmitočtová diference mimo skleněnou baňku oproti umístění piezoelektrického rezonátoru do skleněné baňky s párou isopropylenu ($f_{\text{dif1}} = f_{OV} - f_{OU}$) a hodnota f_{dif2} je kmitočtová diference před experimentem a po uplynutí 4 sekund po vyjmutí piezoelektrického rezonátoru ze skleněné baňky s párou isopropylenu ($f_{\text{dif2}} = f_{OV} - f_{OV + 4\ \text{sek}}$). Pokud bychom tyto hodnoty porovnali s předchozím experimentem, lze říci, že piezoelektrický rezonátor reaguje citlivěji na vodní páru než na páru isopropylenu.

f_{OV} [Hz]	f_{OU} [Hz]	$f_{OV + 4\ \text{sek}}$ [Hz]	f_{dif1} [Hz]	f_{dif2} [Hz]
7 981 978	7 980 674	7 981 942	1 304	36

Obr. 2.13 Tabulka experimentu s párou isopropylenu uvnitř skleněné baňky

Další experiment spočíval v nanesení malé kapky isopropylenu na okraj křemenného výbrusu a dále na střed, kde se sledovala kmitočtová diference před nanesením kapky a po

nanesení kapky. Poloha kapky je naznačena na obr. 2.14, kde je naznačen i pohyb piezoelektrického výbrusu a zaznamenané hodnoty z experimentu jsou v tabulce na obr. 2.15.



Obr. 2.14 Poloha kapky isopropylenu na povrchu křemenného výbrusu a) na okraji b) uprostřed

	f_p [Hz]	f_{p_0} [Hz]	$f_{p+15 \text{ min}}$ [Hz]	f_{dif1} [Hz]	f_{dif2} [Hz]
Kapka na okraji	7 981 978	7 980 652	7 981 320	1 326	658
Kapka uprostřed	7 981 320	7 977 836	7 980 136	3 484	1 184

Obr. 2.15 Tabulka experimentu s kapkou isopropylenu na povrchu křemenného výbrusu

Hodnota f_p je frekvence před nanesením kapky isopropylenu na povrch křemenného výbrusu, hodnota f_{p_0} je frekvence bezprostředně po nanesení kapky isopropylenu na povrch křemenného výbrusu a hodnota $f_{p+15 \text{ min}}$ je frekvence po vyschnutí kapky isopropylenu z povrchu křemenného výbrusu, v tomto případě kapka vyschla vždy maximálně za 15 minut. Hodnota f_{dif1} je kmitočtová diference před nanesením kapky isopropylenu na povrch křemenného výbrusu a po bezprostředním nanesení. Hodnota f_{dif2} je kmitočtová diference před nanesením kapky isopropylenu na povrch křemenného výbrusu a po vyschnutí kapky.

Z tabulky na obr. 2.15 je zřejmé, že posun rezonanční frekvence také závisí na místě působení mikrohmotnosti na povrchu křemenného výbrusu. Je patrné, že piezoelektrický výbrus je značně citlivější, pokud se místo působení mikrohmotnosti na povrchu přibližuje směrem ke středu. Dále lze vyčíst, že isopropylen nebyl čistý a obsahoval v sobě ještě další příměsi, které se z povrchu křemenného výbrusu neodpařily a rezonanční kmitočet se tak nevrátil do svých původních hodnot. To bylo potvrzeno i v laboratoři. Po vyschnutí kapky isopropylenu na povrchu křemenného výbrusu zůstala jasně viditelná stopa po původní kapce. Tímto byl křemenný rezonátor k dalšímu experimentování nepoužitelný.

3 Závěr

V první kapitole byla popsána zapojení oscilátorů a generátorů kmitů v zapojení s RC, LC, se vzájemnou indukční vazbou a s piezoelektrickým rezonátorem. Byl zde popsán vliv působení mikrohmotnosti na povrch křemenného výbrusu, který byl vyjmut ze svého ochranného pouzdra a byl vystaven působení okolního prostředí. Dále zde byly popsány metody a principy pro detekci plynů a par, které využívají posun rezonančního kmitočtu piezoelektrického rezonátoru vlivem působení mikrohmotnosti na křemenný výbrus. To bylo v další kapitole zkoumáno a ověřováno.

Druhá kapitola byla zaměřena na popis vlastního experimentování. Byl zde popsán návrh vhodných oscilátorů, které byly osazeny piezoelektrickými rezonátory (ať už ve svém ochranném pouzdře či bez něj). Dále byly popsány a navrženy dva obvody (metody) pro vyhodnocení kmitočtové difference těchto dvou oscilátorů řízených piezoelektrickým rezonátorem, kde jeden z oscilátorů byl řízen piezoelektrickým rezonátorem ve svém ochranném pouzdře a druhý z oscilátorů měl tento rezonátor ze svého ochranného pouzdra vyjmut a byl vystaven působení okolního prostředí. Vlivem působení okolního prostředí na křemenný výbrus (plynem, párou) docházelo k posunu rezonančního kmitočtu rezonátoru směrem dolů. Proto byly navrženy metody, pomocí kterých lze kmitočtovou diferencí normálového oscilátoru a oscilátoru osazeným piezoelektrickým rezonátorem, který je vystaven působení okolního prostředí vyhodnotit. První metoda využívala D-klopný obvod. Princip této metody je popsán v 2.2.1, kde je na obr. 2.7 uveden časový diagram, kde je zřejmé, jak D-klopný obvod kmitočtovou diferencí vyhodnocuje. Na obr. 2.9 je uvedeno výsledné schéma zapojení jak s oscilátory tak s obvodem pro vyhodnocení kmitočtové difference. Druhá metoda pro vyhodnocení kmitočtové difference využívala osciloskopu, čítače a přesného generátoru sinusového kmitočtu. Tato metoda je vysvětlena v odstavci 2.2.2, kde na obr. 2.11 je blokové schéma této metody.

V posledním odstavci (2.3) druhé kapitoly byly popsány experimenty s kmitočtovou diferencí oscilátorů při působení vlhkosti a při působení páry isopropylenu v blízkém okolním prostředí piezoelektrického výbrusu. Zde se ukázalo, že křemenný výbrus je citlivější na vodní páru, než na páru isopropylenu. Z toho lze usoudit, že křemenný výbrus je dobrým sorbentem vody. Byl zde také popsán experiment, při kterém byla umístěna kapka isopropylenu na kraj a střed piezoelektrického výbrusu, kde se ukázalo, že piezoelektrický výbrus je nejcitlivější na změnu mikrohmotnosti uprostřed.

Použitá literatura

- [1] Ing. Alexander Žatkovič. Oscilátory LC. In: alzat.szm.com [online]. 27.6.2010 [cit. 2.6.2015]. Dostupné z: http://alzat.szm.com/Oscilat/oscil_lc/oscil_lc.htm
- [2] Ing. Alexander Žatkovič. Frekvenčná stabilita LC oscilátorov. In: alzat.szm.com [online]. 19.12.2014 [cit. 2.6.2015]. Dostupné z: http://alzat.szm.com/Oscilat/oscil_lc/frekstab.htm
- [3] Tomáš Bořil. LC oscilátory. In: A4 [online]. 9.11.2005 [cit. 2.6.2015]. Dostupné z: <http://a4.webzdarma.cz/>
- [4] Symetrie krystalů a krystalové třídy. In: Czech and Slovak Crystallographic Association [online]. 15.10.2007 [cit. 2.6.2015]. Dostupné z: <http://www.xray.cz/kryst/str04-2c.htm>
- [5] VŠCHT Praha. In: [online]. [cit. 2.6.2015]. Dostupné z: http://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/14_senzory_QCM.pdf
- [6] A review of gas sensors employed in electronic nose applications. In: K.N.Toosi University of Technology [online]. 15.6.2013 [cit. 2.6.2015]. Dostupné z: <http://saba.kntu.ac.ir/eecd/ecourses/inst%2086/Projects/Electronic%20Nose/final%20atashzar/New%20Folder/Emerald%20FullText%20Article%20%20A%20review%20of%20gas%20sensors%20employed%20in%20electronic%20nose%20applications.htm>
- [7] Jiří Pinker, Václav Koucký. Analogové elektronické systémy. Západočeská univerzita v Plzni, 2004. ISBN 80-7043-284-5
- [8] Linear technology. In: [online]. [cit. 2.6.2015]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/image/3755.png>
- [9] David Doušek. Číslicová technika. Praha: BEN, 2009. ISBN 80-7300-025-3
- [10] It-densi. In: [online]. [cit. 2.6.2015]. Dostupné z: http://it-densi.ocnk.net/data/it-densi/product/20130911_0cb8e2.jpg
- [11] Futurlec. In: [online]. [cit. 2.6.2015]. Dostupné z: <http://www.futurlec.com/IC7474.gif>
- [12] Josef Pavlovec, Jaroslav Šřamar. Krystalové jednotky a oscilátory. Amatérské rádio 1987, B/2.