

## Určení koncentrace plynů a par z rezonančních charakteristik interdigitálního systému

T. Blecha<sup>1</sup>

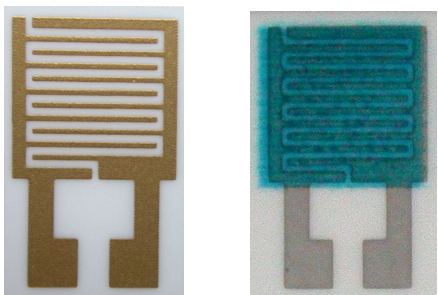
<sup>1</sup> Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni,  
Univerzitní 26, Plzeň  
E-mail : tblesti@ket.zcu.cz

### Anotace:

Základem většiny senzorů pro detekci plynů a par je interdigitální struktura, na které je vytvořena tenká senzitivní polymerní vrstva. Interdigitální struktura s takto vytvořenou senzitivní vrstvou vykazuje vlastnosti kondenzátoru, kde vlivem působení plynu nebo páry dochází ke změně kapacity a ztrátového činitele. Pro vyhodnocení koncentrace působícího plynu se nabízí zapojení interdigitální struktury v rezonančním obvodu. Článek popisuje možnosti vyhodnocení úrovně koncentrace vlhkosti pomocí rezonančních křivek. Na závěr jsou zde také prezentovány výsledky experimentu.

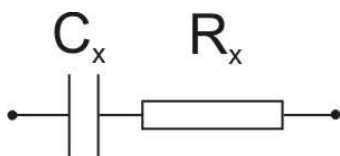
### ÚVOD

Pro chemické a biochemické senzory se nejčastěji využívá interdigitální struktura [1,4]. Základní uspořádání interdigitální struktury je uvedeno na obrázku 1. Tato struktura vykazuje jistou kapacitu a ztrátový činitel, proto lze strukturu nahradit ekvivalentním zapojením sériového nebo paralelního odporu  $R_x$  a kapacity  $C_x$  (obr.2). Celá struktura má tedy kapacitní charakter s určitým svodovým odporem [2].



Obr. 1: Čistá interdigitální struktura na keramickém substrátu a s polymerní organickou senzitivní vrstvou.

Senzorických vlastností je dosahováno nanášením tenkých organických polymerních vrstev na interdigitální elektrody [1,4]. Působením plynů nebo par na nanášený polymer dochází ke změně kapacity nebo svodového odporu celé struktury. Výběrem vhodného polymeru je možné detekovat různé typy plynných látek a vhodnou metodou zjistit změnu kapacity nebo svodového odporu, a tím i koncentraci plynu nebo páry.

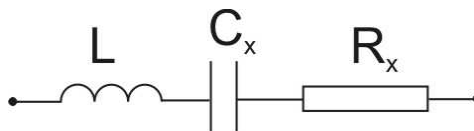


Obr. 2: Náhradní sériové zapojení interdigitální struktury.

Jelikož celá struktura má určitou kapacitu, nabízí se možnost vytvoření rezonančního obvodu. Změny rezonanční křivky v závislosti na působení plynu nebo páry je možné vyhodnocovat několika způsoby. Rezonanční metodu je možné použít za předpokladu, že vlivem působením plynu nebo páry na polymerní senzorskou vrstvu dojde k dostatečné změně kapacity interdigitální struktury. Kapacita čisté interdigitální struktury bez vrstvy polymeru se pohybuje řádově v jednotkách pF a závisí na geometrických rozměrech interdigitálních elektrod.

### REZONANČNÍ METODA

Pro vytvoření rezonančního obvodu s interdigitální strukturou je nutné nalézt vhodnou velikost indukčnosti. Hodnota indukčnosti ovlivní hodnotu rezonanční frekvence. Kapacita interdigitálního systému je poměrně malá a v případě rezonanční frekvence v oblasti kHz je nutné použít cívku s indukčností řádově desítky mH. Takto vysokou hodnotu indukčnosti lze realizovat pouze cívkami s jádrem. Tyto cívky jsou však poměrně rozměrné a mohou bránit v další integraci senzorů. Dalším faktorem je činitel jakosti cívky, která ovlivňuje strmost rezonanční křivky, a tím i citlivost systému na změnu koncentrace plynu nebo páry. Z hlediska konstrukce je možné využít sériovou nebo paralelní rezonanci (obr. 3 a obr. 4).

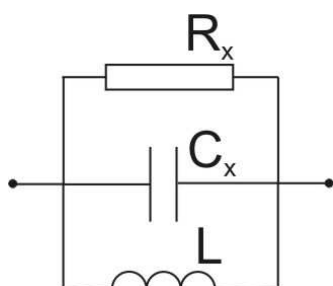


Obr. 3: Sériové zapojení RLC prvků.

Takto vytvořený obvod je komplexní jednohran, u kterého se při rezonanční frekvenci vyrovná působení indukčnosti a kapacity a celý obvod se chová jako činný odpor. Fázový posuv mezi procházejícím proudem a napětím na svorkách obvodu je roven nule [5]. V následujících dvou vztazích (1, 2) je vyjádřena

celková impedance sériového a paralelního rezonančního obvodu.

Během rezonance je impedance obvodu pouze reálná. Pro sériovou rezonanci bude impedance obvodu dosahovat minimálních hodnot a při paralelní rezonanci bude impedance dosahovat maximálních hodnot. Rezonanční frekvenci pro známé hodnoty indukčnosti a kapacity je možné určit z Thomsonova vztahu (3) a v případě nenulového svodového odporu platí upravená rovnice (4) [5].



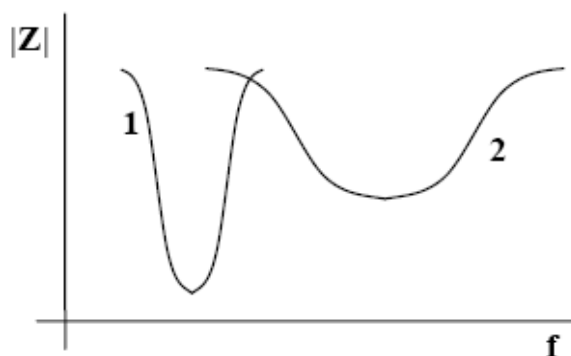
Obr. 4: Paralelní zapojení RLC prvků.

$$Z_S = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (1)$$

$$Z_P = \frac{(R + j\omega L) \frac{1}{j\omega C}}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \quad (2)$$

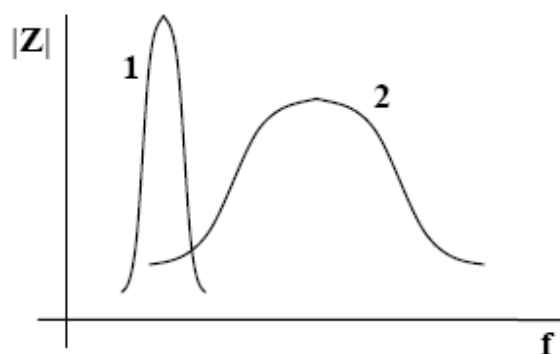
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC - \left(\frac{R}{L}\right)^2}} \quad (4)$$



Obr. 5: Rezonanční křivky pro sériový rezonanční obvod (1 - vyšší jakost, 2 - nižší jakost).

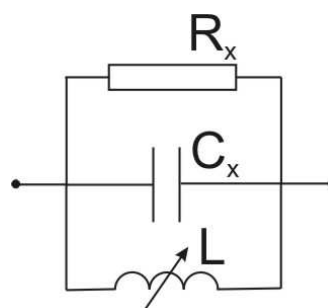
Na obrázku 5 a 6 jsou uvedeny typické průběhy impedance v závislosti na frekvenci pro sériový a paralelní rezonanční obvod. Charakteristiky označené 1 jsou pro rezonanční obvod s vyšším činitelem jakosti a charakteristiky označené 2 jsou pro rezonanční obvod s nižším činitelem jakosti. Z uvedených obrázků vyplývá, že činitel jakosti ovlivní strmost jednotlivých charakteristik, a tím i přesnost vyhodnocení koncentrace plynu nebo páry.



Obr. 6: Rezonanční křivky pro paralelní rezonanční obvod (1 - vyšší jakost, 2 - nižší jakost).

### Rezonance s proměnnou indukčností

K této metodě se může přistupovat několika způsoby. První možností je zvolení rezonanční frekvence, která bude udržována konstantním doladováním indukčnosti cívky (obr. 7). Podle hodnoty indukčnosti lze určit relativní koncentraci plynu nebo páry. Tento přístup není příliš vhodný, protože indukčnost cívky by musela být proměnná ve velkém rozsahu hodnot. Realizace takovéto proměnné indukčnosti avšak odporuje požadavkům na integraci a zmenšování výsledného senzoru.

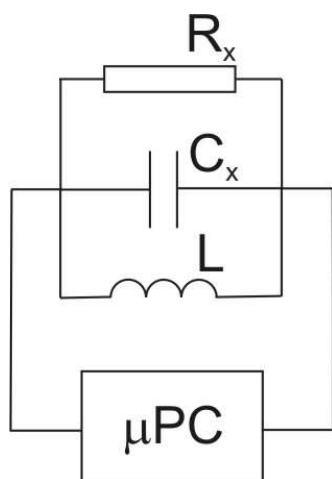


Obr. 7: Paralelní rezonanční obvod s proměnnou cívkou.

### Rezonance s proměnnou frekvencí

Tato metoda využívá vhodné cívky s konstantní indukčností. Vytvořením rezonančního obvodu spočívá princip metody v nalezení frekvence, při které je impedance dosahuje minimálních případně maximálních hodnot v závislosti na typu rezonančního obvodu a v závislosti na koncentraci detekovaného plynu. Změnou frekvence vstupního

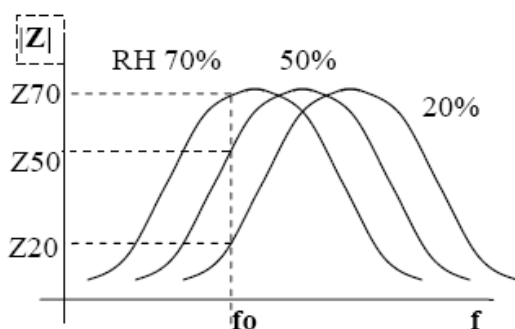
signálu hledáme minimální (maximální) výchylku amplitudy. Tento postup lze snadno realizovat pomocí mikropočítače. Mikropočítač je naprogramován tak, že postupně mění kmitočet signálu a pomocí zabudovaného AD převodníku lze měřit amplitudu signálu na rezonančním obvodu (obr. 8). Z hodnoty rezonanční frekvence je pak možné určit koncentraci plynu nebo páry. Další možností je přímé měření impedance obvodu pro jednotlivé frekvence s následným vyhodnocením rezonančních charakteristik pomocí mikropočítače.



Obr. 8: Vyhodnocení rezonance pomocí mikropočítače.

### Vyhodnocení rezonanční charakteristiky

Metoda využívá k vyhodnocení bok rezonanční křivky, kdy je stanovena pevná frekvence a v závislosti na koncentraci plynu je vyhodnocena amplituda signálu (obr. 9). Výhodou této metody je měření při konstantní frekvenci a použití cívky s konstantní indukčností. Nevýhodou je malý rozsah měření způsobené strmostí boku rezonanční křivky. Strmost křivky závisí na činiteli jakosti rezonančního obvodu. Zhoršení činitele jakosti sníží strmost křivky, a tím dojde také ke snížení citlivosti na koncentraci plynů a par.



Obr. 9: Vyhodnocení relativní vlhkosti z boku rezonančních křivek.

### Frekvenční modulace

Tato metoda vyžaduje použití rozmlázaného generátoru a použití frekvenčního demodulátoru. Rezonanční obvod musí být naladěn na určitou frekvenci  $f_n$ , která se nachází na boku rezonanční křivky. Tato frekvence se vlivem rozmlázaní bude měnit v úzkém pásmu  $f_n \pm f$ . Podmínkou je, aby se frekvence z uvedeného pásma nacházely stále na boku rezonanční křivky. Rozmlázaný generátor způsobí frekvenční modulaci, jelikož bude docházet ke změně amplitudy signálu se změnou kmitočtu. Při různých frekvencích vykazuje rezonanční obvod různou impedanci a frekvenčně modulovaný signál rozmlázaného generátoru se na boku rezonanční křivky demoduluje. Na boku křivky se FM signál převede na amplitudově modulovaný signál, který lze poté demodulovat diodovým detektorem. Nevýhodou tohoto řešení je poměrně náročný systém obsahující mnoho součástek a není tedy možnost větší integrace a miniaturizace.

### REZONANČNÍ CHARAKTERISTIKY V ZÁVISLOSTI NA ZMĚNĚ RELATIVNÍ VLHKOSTI

K testování byly použity interdigitální struktury na keramickém substrátu se šířkou mezery mezi interdigitálními elektrodami 30  $\mu\text{m}$ . Kapacita této struktury bez senzitivní polymerní vrstvy je 10 pF (pro 25°C a 50 % RH). Z důvodu požadavku rezonanční frekvence v pásmu 10 - 1000 kHz byla zvolena cívka s indukčností 10 mH. K ověření výše uvedených teoretických předpokladů pro vyhodnocení koncentrace plynů pomocí rezonančního obvodu byly vytvořeny testovací vzorky s různou organickou polymerní vrstvou (tab. 1).

Tab. 1: Testované vzorky.

	typ organického polymeru
vzorek 1	DPP 1092/382 + H <sub>2</sub> O
vzorek 2	JH024 (coreshell)
vzorek 3	JH001 (coreshell)
vzorek 4	JH00E (mikrogel)
vzorek 5	JH022 (mikrogel)
vzorek 6	ftalocyanin Ni 1044/320/1 + H <sub>2</sub> O
vzorek 7	ftalocyanin Al 1074/282 + H <sub>2</sub> O

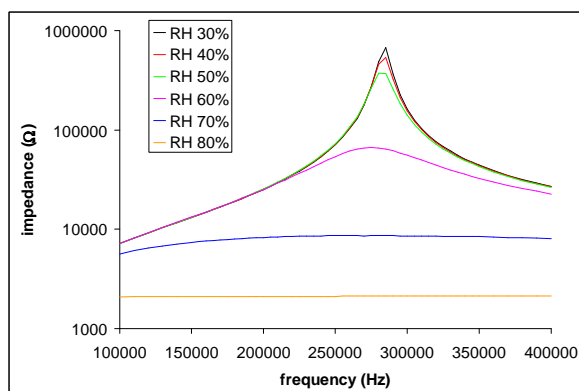
Měření rezonančních charakteristik bylo provedeno pro paralelní rezonanční obvod. Tento obvod má strmější rezonanční charakteristiky s výraznějším nárůstem impedance při rezonanční frekvenci než u sériového rezonančního obvodu.

Pro vyhodnocení úrovně relativní vlhkosti byla použita metoda rezonance s proměnnou frekvencí a metoda s následným vyhodnocením rezonanční charakteristiky.

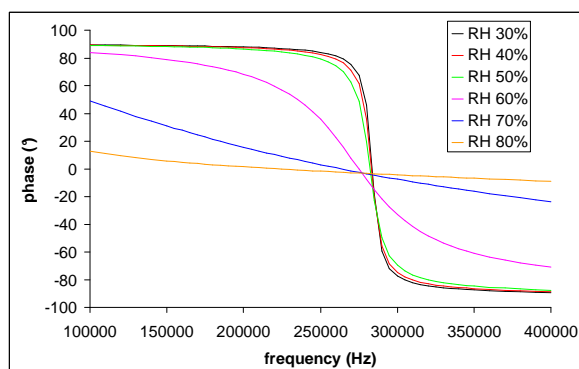
Testování bylo provedeno v klimatické komoře s proměnou vlhkostí. Teplota byla udržována konstantní na hodnotě 30°C. Měření bylo provedeno pro relativní vlhkost v rozsahu 30-80 %. Měření impedance bylo provedeno pomocí RLC můstku ve frekvenčním pásmu 10 kHz až 1 MHz.

Na obrázku 10 je uveden výřez naměřených rezonančních charakteristik pro různou relativní vlhkost pro vzorek 1. Z charakteristik je patrné, že vlivem vlhkosti dochází jen k malým změnám kapacity interdigitální struktury, a tím i k malé změně rezonanční frekvence. Výrazné změny nastávají v absolutní hodnotě impedance rezonančního obvodu. Vlivem větší relativní vlhkosti dochází ke zmenšení strmosti rezonanční charakteristiky. Tato změna strmosti je způsobena změnou jakosti rezonančního obvodu.

Na obrázku 11 jsou uvedeny fázové charakteristiky pro vzorek 1. Pro nízkou relativní vlhkost je zřetelná změna fáze při rezonanční frekvenci. Vlivem změny svodového odporu dochází také k výrazné změně tvaru těchto fázových charakteristik. Pro vyšší hodnoty relativní vlhkosti není již patrná hodnota rezonanční frekvence.



Obr. 10: Rezonanční charakteristiky pro vzorek 1 – impedance.

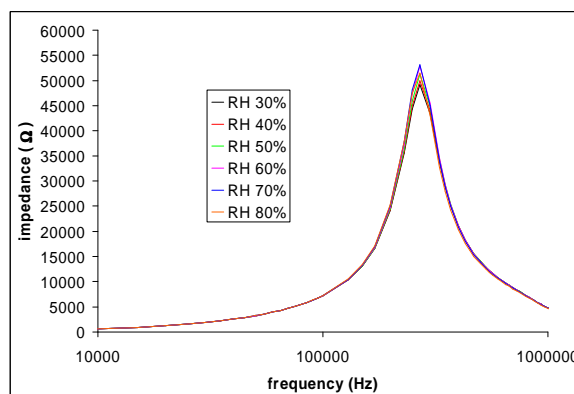


Obr. 11: Rezonanční charakteristiky pro vzorek 1 – fáze.

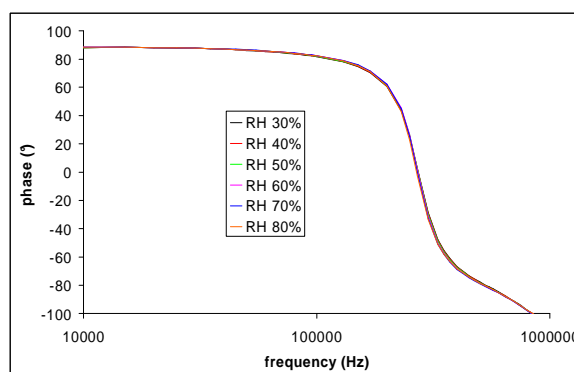
Na obrázku 12 jsou uvedeny rezonanční charakteristiky pro vzorek 2. Z těchto charakteristik je evidentní, že nedochází k výrazné změně kapacity ani svodového odporu, protože nebyla zjištěna

žádná změna rezonančních charakteristik. Tento typ organického polymeru proto není vhodný pro vyhodnocování hodnot relativní vlhkosti pomocí rezonančního obvodu.

Téměř žádná změna rezonanční frekvence a amplitudy impedance nepůsobí žádnou výraznou změnu fázových charakteristik v závislosti na relativní vlhkosti (obr. 13)

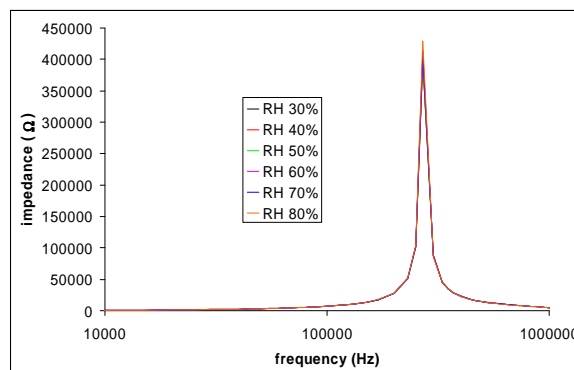


Obr. 12: Rezonanční charakteristiky pro vzorek 2 – impedance.

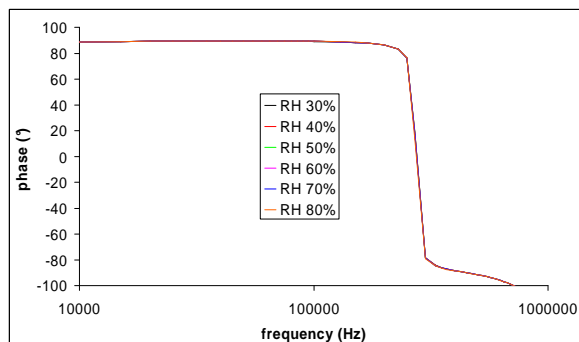


Obr. 13: Rezonanční charakteristiky pro vzorek 2 – fáze.

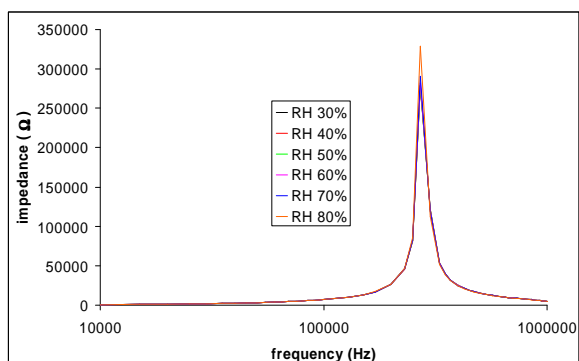
Vzorek 3 opět nevykazuje výraznou změnu kapacity a svodového odporu. Rezonanční charakteristiky pro různé relativní vlhkosti jsou shodné (obr. 14 a 15). Pro tento typ organického polymeru je opět frekvenční metoda založená na rezonanci nepoužitelná.



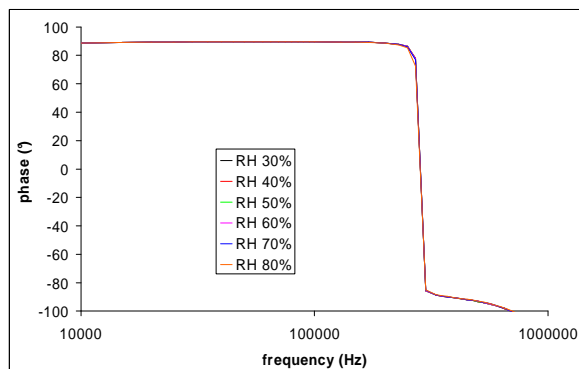
Obr. 14: Rezonanční charakteristiky pro vzorek 3 – impedance.



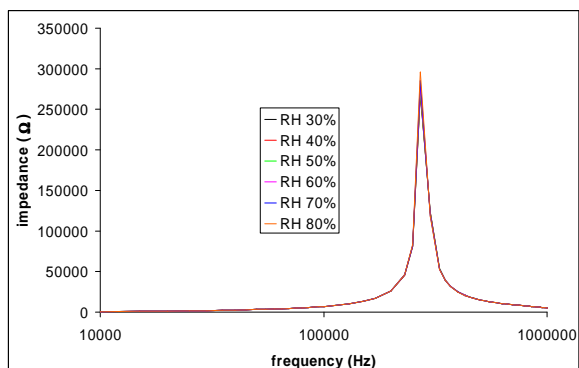
Obr. 15: Rezonanční charakteristiky pro vzorek 3 – fáze.



Obr. 16: Rezonanční charakteristiky pro vzorek 4 – impedance.



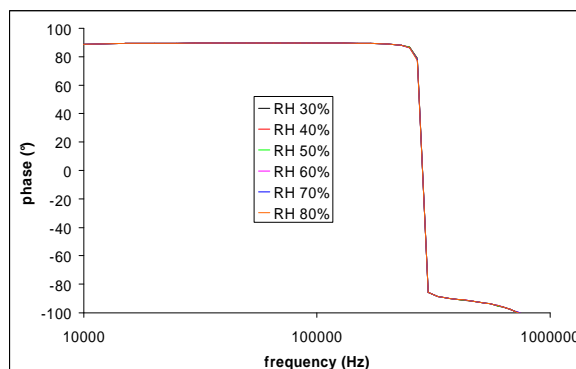
Obr. 17: Rezonanční charakteristiky pro vzorek 4 – fáze.



Obr. 18: Rezonanční charakteristiky pro vzorek 5 – impedance.

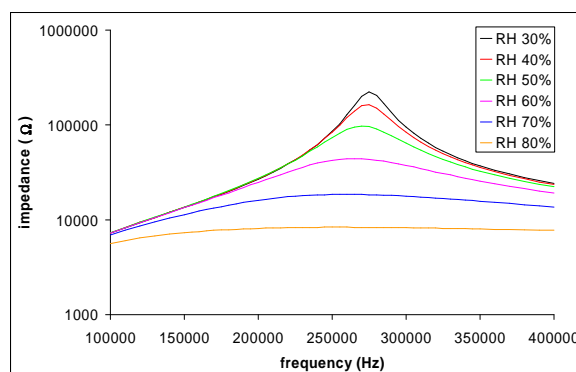
Na obrázku 16 - 19 jsou uvedeny charakteristiky pro vzorek 4 a 5. Z výsledných průběhů je zřejmé, že opět nedochází k výrazným změnám kapacity, a tím

zůstává rezonanční frekvence téměř konstantní. Zároveň nedochází ani ke změně velikosti impedance. Pro tento typ organického materiálu nelze použít metodu rezonančního obvodu.

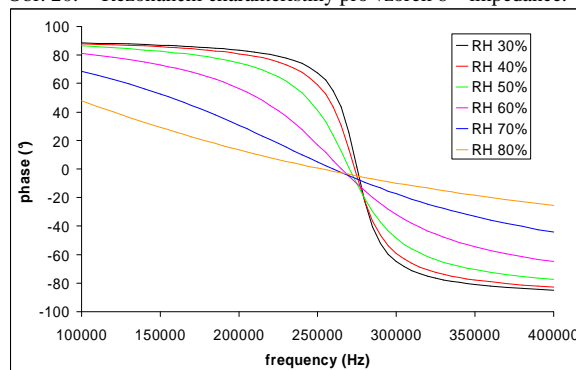


Obr. 19: Rezonanční charakteristiky pro vzorek 5 – fáze.

Na obrázku 20 je patrný průběh závislosti impedance na frekvenci pro různé hodnoty relativní vlhkosti pro vzorek 6. Tento vzorek vykazuje výraznější změny kapacity v závislosti na relativní vlhkosti a dochází tak k malé změně rezonanční frekvence. Se změnou rezonanční frekvence dochází také ke změně strmosti rezonančních charakteristik. Vlivem vyšší relativní vlhkosti se mění amplituda impedance pro rezonanční frekvenci. Avšak pro relativní vlhkost 70 až 80 % je strmost charakteristik tak nízká, že nelze přesně určit rezonanční frekvenci.



Obr. 20: Rezonanční charakteristiky pro vzorek 6 – impedance.

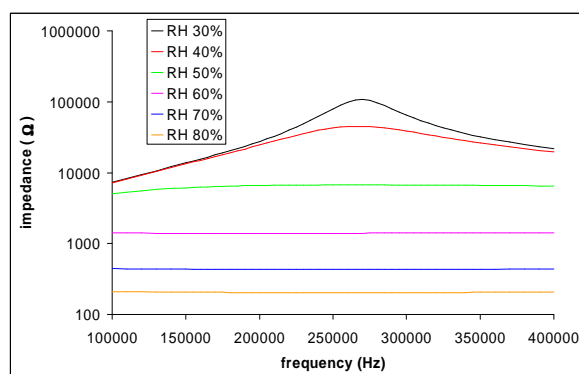


Obr. 21: Rezonanční charakteristiky pro vzorek 6 – fáze.

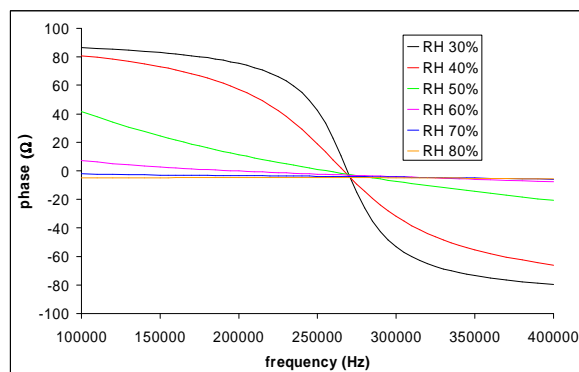
Během rezonance dochází také ke změně fázových charakteristik (obr. 21) v závislosti na změně rezonanční frekvence a jakosti rezonančního obvodu. S vyšší relativní vlhkostí jsou tyto fázové charakteristiky pozvolnější bez výrazných změn fáze v oblasti rezonance.

Vzorek 7 vykazuje jen malou změnu kapacity v závislosti na relativní vlhkosti. Zároveň dochází k výrazné změně strmosti rezonančních charakteristik (obr. 22). Z uvedených výsledků vyplývá, že vzorkem 7 lze objektivně vyhodnotit relativní vlhkost v rozmezí 30-50 %. Pro vyšší hodnoty je strmost charakteristik příliš malá a rezonanční frekvence není úplně zřetelná.

Amplitudovým charakteristikám odpovídají i fázové charakteristiky (obr. 23). Pro vyšší relativní vlhkosti nedochází k výrazným fázovým změnám.



Obr. 22: Rezonanční charakteristiky pro vzorek 7 – impedance.



Obr. 23: Rezonanční charakteristiky pro vzorek 7 – fáze.

## ZHODNOCENÍ

Byla provedena analýza možností vyhodnocení koncentrací plynů a par pomocí rezonančního obvodu, který je tvořen interdigitálním kapacitorem a cívku. Pro tuto metodu je možné využít několik různých způsobů vyhodnocení. Nejeftivnější způsob se jeví vyhodnocení pomocí proměnné frekvence, kdy se zjišťuje rezonanční kmitočet v závislosti na změně kapacity interdigitální struktury s nanesenou senzitivní vrstvou. Podmínkou této

metody je velká změna kapacity vlivem působení plynu nebo páry pro přesnější vyhodnocení rezonanční frekvence. Druhým možným způsobem je vyhodnocování rezonanční charakteristiky pro konstantní frekvenci. Přesnost vyhodnocení tohoto způsobu je závislá na jakosti rezonančního obvodu. Interdigitální struktura vykazuje svodový odpor, který ovlivňuje strmost jednotlivých charakteristik, a tím je ovlivněna i přesnost vyhodnocení.

Na základě vyhodnocení experimentů je možné konstatovat, že rezonanční metoda je vhodná pouze pro určité organické polymerní senzitivní vrstvy. Pouze u vrstev 1, 6 a 7 dochází k malé změně kapacity vlivem působení relativní vlhkosti. U těchto vrstev pak dochází k malé změně rezonančních kmitočetů. Působením vlhkosti zároveň dochází ke změně strmosti rezonančních charakteristik, čím je snížena přesnost vyhodnocení pro vyšší hodnoty relativní vlhkosti.

V případě detekování plynů pomocí rezonanční metody je nutné nalézt organické polymery, které vykazují vlivem změny koncentrace těchto plynů výrazné změny kapacity celého interdigitálního systému. Zároveň nesmí docházet ke změně jakosti rezonančního obvodu.

## PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl s podporou rozvojového projektu *MŠMT POSTDOC 08* řešeného na ZČU v Plzni.

## LITERATURA

- [1] BLECHA, T.; ČENGERY, J.; HAMÁČEK, A.; HEINDL, K.; KAŠPAR, P.; ŘEBOUN, J.; SKOČIL, V.: Sensor's signal processing based on interdigital system with polymer nanofilm. Výzkumná zpráva, ZČU, 2006
- [2] ALLEY, G. D: Interdigital Capacitors and Their Application to Lumped-Element Microwave Integrated Circuits, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-18, No. 12, 1970
- [3] VANIŠ, P.: Zpracování signálu senzorů na bázi interdigitálního systému pro detekci plynů. Diplomová práce, ZČU, 2008
- [4] BLECHA, T.; ČENGERY, J.; HAMÁČEK, A.; HEINDL, K.; KAŠPAR, P.; ŘEBOUN, J.: Diagnostika elektrických parametrů senzorů vlhkosti. Výzkumná zpráva, ZČU, 2006
- [5] MAYER, D.: Úvod do teorie elektrických obvodů. Praha SNTL 1981
- [6] GÖPEL, W.; HESSE, J.; ZEMEL, J.N.: Sensors, Volume 3 – Chemical and Biochemical Sensors. VCH Weinheim, 1992, ISBN 3-527-26769-7