

# POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Doctoral Thesis

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

**Ing. Václav Smítka**

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

**Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor:

Study branch

**Elektronika**

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

**Analýza senzorů plynů ve frekvenční oblasti**

Školitel:

Supervisor

doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.

Oponent:

Opponent

prof. RNDr. Stanislav Nešpůrek, DrSc.

## Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Předložená disertační práce se zabývá problematikou detekce plynů pomocí vysokofrekvenční spektroskopie. Jde o poměrně komplikovanou experimentální techniku, která by mohla umožnit detekci složek v plynné směsi pomocí jednoho sensorového elementu využitím frekvenční závislosti komplexní permitivity, fázových posunů, příp. útlumu v rezonančním obvodu. Vzhledem ke své složitosti se tato technika v praxi běžně neužívá. Z hlediska oboru je problematika disertační práce, pokud by se ji podařilo zavést, vítaným příspěvkem pro oblast plynových senzorů, která se na katedře řeší. Pozice autora předkládané práce nebyla lehká, protože informací v literatuře není příliš mnoho, jak vyplývá z rešerše v práci uvedené.

## Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Evaluation of the the problem-solving process, the methods used and the goal to be met

Na začátku práce se diskutují základy dielektrické polarizace, frekvenční závislosti permitivity, polarizace v plynech a zavádí se pojem elektrického modulu. Základy širokopásmových dielektrických měření a dvojbranů jsou uvedeny na str. 38 – 43. Rozebrána je též problematika koeficientu odrazu, S-matic a dopadající a odražené vlny. Klíčovým prvkem experimentálního uspořádání je sensorový element (ten byl použit ve formě interdigitální struktury) a jeho podložka, dále pak komora pro plyn a elektrická připojení. Všechny tyto prvky mohou způsobovat problémy spojené s útlumem a odrazem signálu a vnášet do výsledku měření falešné informace. Je třeba konstatovat, že tyto konstrukční prvky byly za stávajících podmínek vyřešeny na úrovni, která postačovala pro prováděné experimenty. Pokud jde o cíle práce, byly v disertaci formulovány následovně: (1) Návrh postupu vyhodnocení změn imaginární složky permitivity z odezvy senzoru, (2) návrh topologie sensorového elementu, (3) návrh a konstrukce měřicí aparatury. Tyto cíle byly splněny.

## Stanovisko k výsledkům disertační práce a

k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Statement to the results of the dissertation and on the original contribution of the submitter of the dissertation

Autor poukázal na možnosti jak sestrojít poměrně náročnou aparaturu širokopásmové impedanční spektroskopie pro detekci plynů v podmínkách vysokoškolského prostředí. Sestrojil měřící celou pro směsi plynů s možností kontaktovat měřící element, která umožňuje dobré odstínění od vnějších elektromagnetických polí a omezení efektů rozptylu, reflexe a útlumu signálu. Protože kapacita podložky měřícího elementu má velký vliv na citlivost senzoru, byla jejímu výběru věnována značná pozornost. Z řady materiálů byl vybrán polyetylen, elektrody byly připravovány sítotiskem uhlíkové pasty. Dobré výsledky byly získány také s uhlíkovými nanotrubicemi. Tyto materiály se používaly také při sensorových měřeních. Pozornost byla věnována také impedančnímu přizpůsobení sensorové platformy a vedení. Mezi hlavní výsledky považují zjištění, že uvedená metoda je citlivá k  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2$  a vlhkosti. Vzhledem ke komplexnosti metody je možné pozorovat řadu faktorů, které by bylo dobré detailněji studovat, např. frekvenční oblasti kdy dochází ke změně útlumu při expozici plynem (např.  $\text{NH}_3$  15 GHz,  $\text{NO}_2$  7,4 – 7.6 GHz), „směsné oblasti“ kdy dochází ke změně útlumu při expozici jak  $\text{NH}_3$  tak  $\text{NO}_2$ ). Zajímavou se zdá být detekce pomocí fázového úhlu, kdy hladina šumu je nižší. Kinetika signálu po expozici plynem je pomalá, to ovšem může být důsledek sorpčně-desorpčních procesů.

Shrneme-li presentované výsledky, můžeme říci, že přínosem předkladatele je především sestavení aparatury širokopásmové impedanční spektroskopie pro detekci plynů a získání množství experimentálních dat. Nicméně vzhledem ke komplexnosti metody bych uvítal jejich detailnější rozbor. To je ovšem mimo rámec jedné disertační práce.

#### **Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce**

Statement to the systematics, clarity, formal adaptation and language level of the dissertation

Disertační práce sestává ze 101 stran textu. V úvodní části práce (str. 16 – 22) jsou popsány různé typy senzorů a diskutovány parametry, které je možné použít pro hodnocení kvality senzorů. Na str. 23 – 37 je diskutována elektrická polarizace, jsou rozebrány její typy, diskutován vliv vlhkosti a je zaveden pojem elektrického modulu. Základy širokopásmové dielektrické spektroskopie jsou rozebrány v kapitole 3. Uvedené části práce jsou přehledné a dobře vystihují problematiku, se kterou se autor setkal při řešení zadaného úkolu. V kapitole 4 je popsána příprava sensorového elementu, jeho topologie a jsou rozebrány vlastnosti citlivých použitelných materiálů pro účinnou funkci senzoru. Poslední část disertace shrnuje experimentální výsledky, které mohly být obsáhleji diskutovány. Vyhodnocení dat je provedeno pečlivě, bez zjevných chyb. Formální úprava, jazyková úroveň a logická struktura textu práce jsou na dobré úrovni.

#### **Vyjádření k publikacím studenta**

Statement to student's publications

Autor disertace uvádí 6 prací ve sbornících konferencí, 3 funkční vzorky, 2 ověřené technologie a jeden užitečný vzor. Práce v odborných časopisech není zmíněna. Vzhledem k experimentálním výsledkům a složité a málo publikované problematice se dá předpokládat, že autor využije získané poznatky k publikačním účelům.

## Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Odborná úroveň práce dobrá, téma je aktuální a z inženýrského hlediska zajímavé. I když jde o problematiku na katedře novou, zhostil se ing. Smítka tématu dobře. Analýza a interpretace dosažených výsledků a formulace závěrů dizertace jsou prezentovány bez zjevných chyb.

K práci mám několik dotazů:

1. Shrňte metody vyhodnocování experimentálních výsledků a vysvětlete, proč jste používal  $s_{21}$  a  $s_{11}$  parametry.
2. Upřednostňujete amplitudovou nebo fázovou metodu vyhodnocení experimentálních výsledků. Jaké jsou jejich výhody a nevýhody?

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

ano yes	X	no
------------	---	----

Datum

Date

23.8.2019

Podpis oponenta:

Signature of opponent





# POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Doctoral Thesis

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Václav Smítka

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektronika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Analýza senzorů plynů ve frekvenční oblasti

Školitel:

Supervisor

Doc. Ing. Aleš Hamáček, PhD.

Oponent:

Opponent

Doc. Ing. Jan Urbánek, CSc.

## Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Téma disertační práce úzce navazuje na řadu prací řešených na mateřském pracovišti doktoranda. Rozvoj výroby a aplikací senzorů plynů založených na principu chemické reakce analyzované směsi plynu s citlivou vrstvou senzoru je podmíněn znalostí vznikajících vazeb. Jedou z metod je sledování interakce s elektromagnetickým polem, které se doktorand ve své práci věnoval. Úspěšnost prováděných experimentů potvrzujících teoretické úvahy uváděné v kap. 1 až 3 byla podmíněna využitím špičkové přístrojové techniky (spektrálních vektorových analyzátorů) umožňující měření v kmitočtové oblasti až do 30 GHz. Výsledky práce, zvláště realizace potřebné měřicí komůrky respektující požadavky konstrukcí v obvodů pracujících v gigahertzovém pásmu. Znalost jejich vlastností bude dobrým východiskem pro další výzkumné práce v oblasti senzorů plynů.

## Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Evaluation of the the problem-solving process, the methods used and the goal to be met

Doktorand pan Ing. Smítka v prvních třech kapitolách podrobněji přibližuje chování dielektrika ve střídavém elektrickém poli. Uvádí důvody zavedení S parametrů, hlavně pak vstupního napěťového činitele odrazu  $s_{11}$  a vložného napěťového přenosu  $s_{21}$ , jako měřítek odezvy senzoru na sledovaný plyn. V dalším textu se věnuje přípravě sensorového elementu. Zdůvodňuje volbu rozměrů interdigitálních elektrod senzorů, volbu materiálů nosných podložek (komerční keramický substrát B12, polymerní organické materiály typu PET, PE, Polyimid (Kapton fy DuPont)), uspořádání elektrod, a technologií nanášení citlivých vrstev včetně progresivní techniky Aerosol JET). V rozsáhlé 6. kapitole (25 stran) detailně popisuje prováděné experimenty s cílem ověřit použitelnost navržené komůrky se senzorem a metodiku vyhodnocení získaných spekter při vybraných parametrech dílčích experimentů (relativní vlhkost, různé složení testované směsi plynů).

## Stanovisko k výsledkům disertační práce a

### **k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce**

Statement to the results of the dissertation and on the original contribution of the submitter of the dissertation

Disertační práce Ing. Václava Smítky obsahuje praktické ověření použitelnosti širokopásmové impedanční spektroskopie při výzkumu senzorů plynů. Výsledky budou základem pro další práce v oboru. Cíle disertační práce byly dosaženy. Experimenty potvrdily správnost zvoleného konstrukčního řešení sensorové komůrky umožňující měření spekter až kmitočtů řádu desítek GHz. Byla sestavena a pokusy ověřena správná činnost měřicí aparatury. Byl navržen a v experimentální části ověřen postup vyhodnocení naměřených spekter.

### **Vyjádření k systematic, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce**

Statement to the systematics, clarity, formal adaptation and language level of the dissertation

Práce je sestavena logicky, po teoretické části následuje část experimentální s ověřením metodiky vyhodnocování získaných spekter.

Text práce je přehledně uspořádaný, s nedostatky převážně formálními (neúplný seznam symbolů a zkratk – srovnej Obr. 23 a Obr. 19, podivné znaky v rozměrech některých veličin –  $n$ ,  $C$ ,  $C_s$ ,  $r$ ,  $\epsilon_r$  aj. , obrázky vložené "přes sebe" – Obr.12 a 13 aj.). U převzatých obrázků je použit jen původní anglický popis – Obr. 10.

V textu vložené obrázky spekter jsou dobře čitelné jen s lupou, vhodnější by bylo připojit je formou přílohy s větším písmem.

### **Vyjádření k publikacím studenta**

Statement to student's publications

Publikace autora disertační práce pana Ing. Václava Smítky splňují požadavky čl. 2 Směrnice děkana Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni č. 2D/2019. Kromě publikací tematicky svázaných s obsahem disertační práce (3 položky) dokládají široký technický obzor doktoranda v aplikované elektronice (tištěné, flexibilní) (13 položek).

### **Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě**

Total evaluation and questions for defence

Disertační práce pana Ing. Václava Smítky poskytuje experimenty prověřený způsob užití širokopásmové dielektrické spektroskopie při výzkumu materiálů vhodných pro výrobu senzorů plynů včetně metodiky vyhodnocení získaných spekter. Cílů stanovených při zadání práce bylo dosaženo.

Dotazy pro obhajobu práce:

- 1) Na str. 47 uvádíte, že drsnost substrátu KB19C byla  $R_a=(0,25 \text{ až } 0,7) \mu\text{m}$ , tloušťka nanášené aktivní vrstvy (10 až 50) nm. Jakou technikou jste tuto tloušťku měřil?
- 2) V seznamu symbolů uvádíte  $\lambda$  jako vlnovou délku, na str. 51 jako osovou vzdálenost elektrod stejného pólu. Jedná se o stejný délkový rozměr?
- 3) Na obr. 19 a 23 jsou uvedeny kapacity náhradního schématu. V čem se kapacity  $C_{\text{sen4}}$  a  $C_{\text{sen4}}$  liší? Kapacita  $C_{\text{sub}}$  je v jednom případě nepřípojená. Proč? Co vyjadřuje kapacita  $C_p$  ?

Považuji za nutné připomenout, že k posouzení mě byla poslána práce bez podpisu autora ("Prohlášení") a celá práce byla v deskách zavázána "obráceně", tedy od konce.

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

ano

yes

x

ne

no

Datum

Date

20. září

2019

Podpis oponenta:

Signature of opponent



**Posudek oponenta disertační práce**  
Ing. Václava Smítky  
„Analýza senzorů plynů ve frekvenční oblasti“

**Ing. Václav Smítka** se ve své disertační práci zabýval návrhem topologie a materiálového složení senzorů plynů, konstrukcí měřících cel a širokopásmovou impedanční spektroskopií pro stanovení závislosti komplexní permitivity na změně složení sledovaných plynů.

Vlastní práce sestává z teoretické části, ve které je provedeno rozdělení senzorů plynů podle způsobu jejich detekce a popsány způsoby jejich polarizace. V poslední části je popsána použitá metoda charakterizace: širokopásmová dielektrická spektroskopie. Experimentální část se zabývá popisem přípravy senzorových elementů a konstrukcí měřící cely, v závěru jsou pak uvedeny experimentální výsledky především širokopásmové impedanční spektroskopie.

Z přehledu výstupů **Ing. Václava Smítky** vyplývá, že hlavní pozornost byla věnována především experimentální práci, jejím výstupem je spoluautorství dvou ověřených technologií, tří funkčních vzorků, jednoho užitého vzoru a programového vybavení pro řízení experimentů. Z literárních výstupů autor disertační práce uvádí dvě časopisecké publikace (ISSN) a čtyři příspěvky ve sborníku. Jedna publikace je uvedena ve WoS (Blecha a kol.).

Teoretická část je po obsahové stránce zpracována poměrně dobře, je v ní však značné množství nepřesností a chyb, které by bylo vhodné objasnit. První kapitola experimentální části práce (příprava senzorového elementu) prolíná s odkazy na literaturu (obr. 10 – obr. 15) takže není zcela zřejmé, jaký je podíl autora. Z uvedených výsledků poslední kapitoly nejsou provedeny téměř žádné závěry.

V diskusi bych navrhol vyjádřit se k následujícím problémům

- Jak byste interpretoval rozdílová spektra na obr. 26, 27 a 29. Z obrázků je zřejmé, že měření probíhala až do frekvence 20 GHz (mikrovlnná oblast). Jak bylo realizováno impedanční přizpůsobení (obr. 23) vedoucí k odstranění vlivu impedance přístroje a vedení (zpravidla se používají vlnovody). Co vyplynulo z analýzy rozdílu signálů měřených za různých podmínek. V teoretické části je diskutována komplexní permitivita. Poskytují uvedené grafy informaci o její změně důsledkem geometrie a složení senzoru, resp. koncentrace analyzovaného plynu. Ani z detailu měření (obr. 30, 31) není zřejmá tendence změny.
- Na obr. 32 a 33 jsou uvedeny spektrální odezvy S-parametrů ( $s_{11}$ ,  $s_{12}$ ) platformy připravené na polymerní podložku. Jak se tato spektra liší od spekter připravených na korundové podložky. Jaký byl důvod výběru okna, na obr. 31 (7,44-7,64) GHz a na obr. 38 (13,3 – 13,9) GHz k demonstrování vlivu účinku plynu na spektrum. Při ostatních frekvencích nejsou tyto změny zřejmé?



- Vliv vlhkosti je zřejmě zásadní parametr ovlivňující funkčnost senzoru. Byla provedena měření širokopásmové impedanční spektroskopie, která by tento vliv demonstrovala? Jak by podle vás mohla přispět právě metoda širokopásmové impedanční spektroskopie ke stanovení druhu plynu, resp. jeho koncentrace.

V další části jsou uvedeny komentáře k teoretické části

- str. 15: v 1. dílčím cíli je zmíněna "imaginární složka permitivity" a "imaginární složka impedance", o jaké veličiny se jedná,
- str. 20: "Posouvá volné nosiče ... ve směru orientace elektrického pole", není uvedeno o jaké nosiče se jedná,
- str. 21: text před rovnicí (2) s ní nesouvisí,
- str. 22: text nekoreluje s obr. 1, kde jsou znázorněny složky komplexní permitivity (paralelní), v textu je diskutována impedance (sériová),
- str. 24: rovnice (4) – (8) nemají logickou návaznost, z rovnice (4) a (5) nevyplývá rovnice (6), ale je třeba použít ještě rovnici (8),
- str. 24 ve vztahu (9) je reálná část komplexní permitivity označena jiným symbolem než ve vztahu (8),
- str. 25: je sice pravda, že permitivita má obecně tenzorový charakter, ale ve vztahu (10) a na obr. 2 je uvedena jako skalární komplexní číslo, na obr. 10 nekoreluje vertikální osa se vztahem (2), nepatří tam imaginární jednotka,
- str. 25: "tenzorický charakter" je chybně, správně má být tenzorový charakter,
- str. 27: vztah (14) je identický se vztahem (9),
- str. 28: rovnice (17) má chybně zapsané závorky, význam exponentu je v zapsaném tvaru stejný jako v rovnici (16), tj. koeficient šířky spektra,
- str. 28: vztah (18) není dostatečně vysvětlen,
- str. 29: vztah (19) má chybné jednotky veličin,
- str. 39: metody dielektrických měření by si zasluhovaly detailnější popis,
- str. 51: text před rovnicemi (31) a (32) s nimi nesouvisí,
- str. 56: poslední odstavec kap. 4.4: co to je citlivý parametr?
- str. 70: v prvním odstavci kap. 6.1 je uvedeno, že S-parametry  $s_{11}$  a  $s_{22}$  na obr. 25 nekorelují, domnívám se že shoda mezi nimi (ale i mezi S-parametry  $s_{12}$  a  $s_{21}$ ) je velmi dobrá,

Po typografické stránce mám k práci značné výhrady. Bez lupy se nedají některé popisy obrázků vůbec přečíst, obrázky nemají jednotnou formu, často jsou nepřehledné.

Avšak i přes uvedené připomínky hodnotím disertační práci Ing. Václava Smítky jako užitečnou a to především z hlediska aktuálnosti problematiky a přímé orientace do praxe. Výsledky, které jsou v práci prezentovány, bezesporu přispějí k rozšíření poznatků v oblasti studia vlastností senzorů plynů.



Vzhledem k tomu, že Ing. Václav Smítka prokázal předpoklady k samostatné tvůrčí činnosti, doporučuji přijmout jeho disertační práci k obhajobě ve studijním oboru "Elektrotechnika a informatika" a udělit mu na základě úspěšné obhajoby titul Ph.D.

V Brně dne 12. září 2019



prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.  
Ústav fyzikální a spotřební chemie  
Fakulta chemická  
Vysoké učení technické v Brně