



# POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Doctoral Thesis

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Jiří Navrátil

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektronika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Aerosol Jet – alternativní technologie  
kontaktování, propojování a realizace  
součástek na flexibilních a 3D substrátech

Školitel:

Supervisor

Doc. Ing. Aleš Hamáček, PhD.

Oponent:

Opponent

Doc. Ing. Jan Řeboun, Ph.D.

## 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 pracovišti doktoranda. Využití pokročilých depozičních technologií, jako je technologie Aerosol Jet, dále rozšiřuje možnosti realizace a integrace zkoumaných součástkových a sensorových struktur a přináší zcela nové možnosti pro propojování a kontaktování součástek.

Za významné výsledky disertační práce v dané oblasti je možné považovat zejména nové tištěné rezistorové struktury pro výkonové aplikace plně integrované na keramických substrátech. Význam může být ilustrován mimo jiné uděleným patentem č. CZ 308757 B6 „Způsob výroby rezistoru pro výkonové aplikace“ a evropskou přihláškou vynálezu PCT/CZ2020/05055 "Method of producing a resistor for power applications" která byla zveřejněna ve Věstníku mezinárodního úřadu k datu 10.9.2021 pod číslem WO 2021/175347. Přínosná je rovněž nová metoda kontaktování čipových součástek využívající přetisk kontaktů součástek vodivými inkousty přes předem vytvořený dielektrický můstek. Tato metoda v mnoha aplikacích umožní náhradu konvenčních bondovaných spojů, neboť umožňuje dosažení vyšší míry planarity realizovaného propojení a dosažení menších parazitních indukčností.

## 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. Navrátil v první kapitole popisuje současný stav poznání v oblasti selektivních depozičních technik. Detailně se věnuje zejména perspektivní digitální tiskové technologii Aerosol Jet. Doktorand dále popisuje perspektivní oblasti využití depozičních technologií a zaměřuje se i na problematiku vzájemné kompatibility tiskových materiálů a substrátů.

V dalším textu se již věnuje přípravě dílčích součástkových, kontaktních či sensorových struktur právě pomocí depoziční technologie AerosolJet. Využití tiskové technologie AerosolJet jako prostředku pro tzv. „rapid prototyping“ v různých oblastech výzkumu a vývoje je jednotícím prvkem celé této práce. Doktorand se experimentálně zabýval výzkumem tištěných rezistorů pro výkonové aplikace na keramických substrátech, kontaktováním čipových součástek jako alternativní technologií k bondování a dále výzkumem vlákněných senzorů a dvou typů planárních elektrochemických senzorů. Zkoumané prvky popisuje v jednotlivých kapitolách, přičemž každá kapitola obsahuje i základní charakterizaci daného prvku a vlastní vyhodnocení.

Všechny vytčené cíle disertační práce jsou v práci popsány a 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

Experimenty potvrdily správnost zvoleného řešení, tj. použití digitální selektivní metody depozice AerosolJet, jako prostředku pro rychlé prototypování ve výzkumu a vývoji propojovacích, kontaktních a součástkových struktur. Pomocí provedených experimentů doktorand ověřil, že s využitím tiskových technik je možné realizovat nové plně tištěné součástky, planární či dokonce vláknenné senzory a realizovat kontaktní struktury zcela novým způsobem.

Cíle disertační práce byly dosaženy.

**Vyjádření k systematickému, 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, ve které jsou v jednotlivých podkapitolách popisovány experimenty a výsledky z jednotlivých řešených oblastí. Práce se korektně odkazuje na dostatečné množství literárních zdrojů, které vždy správně cituje.

Text práce je přehledně uspořádaný, srozumitelný, z hlediska grafiky a ilustrací je práce vyhovující. Práce obsahuje pouze drobné překlepy či formulační nepřesnosti, např. str. 7, u pH uveden nesprávně rozsah místo jednotek (0-14), str. 44 přebývající slova „tisku“, str. 88 chybějící horní index, str. 37. nevhodně zvolený výraz „organometalické vodivé pasty“.

**Vyjádření k publikacím studenta**

Statement to student's publications

Publikace autora disertační práce pana Ing. Jiřího Navrátila splňují požadavky čl. 2 Směrnice děkana Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni č. 2D/2019. Kromě značného množství publikací tematicky svázaných s obsahem disertační práce (2 publikace v IF a 15 článků ve sbornících) je doktorand spoluautorem ještě dalších 15 článků, které dokládají jeho široký technický obzor (zejména v oblasti kontaktování součástek technologiemi lepení a pájení). Mezi hlavní výstupy doktoranda patří i jeden udělený český patent a PCT přihláška, které je již zveřejněna ve Věstníku mezinárodního patentového úřadu.

**Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě**

Total evaluation and questions for defence

Technologicky orientovaná disertační práce pana Ing. Jiřího Navrátila poskytuje experimenty prověřený soubor metod a způsobů využití digitální tiskové technologie AerosolJet v oblastech výzkumu a vývoje součástek, senzorů a propojovacích struktur. V daných oblastech přináší nové možnosti, které jsou konvenčními způsoby výroby jen obtížně dosažitelné. Cílů stanovených při zadání práce bylo dosaženo.

Dotazy pro obhajobu práce:

1. Vysvětlete detailněji vztah povrchové energie substrátu a tiskové formulace na kvalitu smáčení. Jak se povrchová energie měří.
2. Na str. 62 uvádíte, že vzorek B s větším počtem čtverců, tj. menší mezerou a delšími elektrodami má větší el. odpor než vzorek A. Vysvětlete tento rozpor.
3. V práci na str. 37 zmiňujete tzv. organometalické pasty. Vysvětlete, o co se jedná a porovnejte je s konvenčními vodivými tlustovrstvými pastami.

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

ano  ne  
yes no

Datum  
Date

20. října  
2021

Podpis oponenta:  
Signature of opponent





# POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Jiří Navrátil

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektronika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Aerosol Jet – alternativní technologie  
kontaktování, propojování a realizace  
součástek na flexibilních a 3D substrátech

Školitel:

Supervisor

doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.

Oponent:

Opponent

doc. Ing. Tomáš Syrový, Ph.D.

## Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Disertační práce je založena na výsledcích vlastní vědecké činnosti, či činnosti v kooperaci s kolegy/partnery, na základě, níž vznikly 3 články v periodikách s impakt faktorem, 1 patent, 1 článek v periodiku abstrahovaném v databázi Scopus a řada příspěvků ve sbornících mezinárodních konferencí. Množství výzkumných výsledků různé povahy dokládá intenzivní vědeckou činnost v rámci studia. Dopad výzkumné činnosti rovněž prokazuje i citační analýza ve WOS/Scopus databázích. Z publikační aktivity je rovněž patrné, že autor práce má zkušenosti s prezentací svých výsledků na mezinárodních konferencích. Jeho vědecká činnost je doplněna i recenzní činností a přínos lze též sledovat v oblasti implementace využití techniky AJP v celé řadě elektronických aplikací. Z předložených materiálů je patrná i vysoká aktivita při řešení výzkumných problémů v rámci grantů a smluvních výzkumů.

## 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

Autor práce využil k přípravě řady elektronických struktur, či k jejich kontaktování tiskovou techniku AJP, jejíž uplatnění v rámci oblasti tištěné elektroniky v rámci ČR lze považovat za unikátní. V rámci přípravy řady elektronických struktur použil i adekvátní přístupy k optimalizaci jednotlivých vrstev, či vytvářených postupů jejich přípravy. V rámci práce byl vhodně studován inovativní přístup ke kontaktování elektronických součástek ať již formou tisku vodivých propojení pomocí AJP, či metodou fyzického kontaktu součástek fixovaných UV tvrditelnými adhezivy. Pro charakterizaci řady elektronických struktur byly použity adekvátní instrumentální techniky a přístupy pro vyhodnocení naměřených dat. Disertační práce bezpochyby plně splnila vytyčené cíle.

## 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

Výsledky disertační práce dosahují velmi dobrých výstupů, jejichž validita byla ověřena řadou oborových oponentů v mezinárodních periodikách. V rámci uděleného patentu lze zase hovořit o inovativním řešení dané problematiky.

Na základě provedeného výzkumu a vývoje, který zachycuje předložená disertační práce bylo vytvořeno know-how, které může být využito pro následné výzkumné úkoly, ale i ve spolupráci s praxí v rámci vývoje komerčních aplikací. Z hlediska přínosu výzkumné činnosti

disertační práce je jednoznačné, že vytvořené penzum znalostí bude zúročeno v dalším vědeckém výzkumu. Originalita řešení a přínos autora k daným výsledkům, je jednoznačný.

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

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

Vlastní práce je poměrně obsáhlá, obsahuje 97 stran textu. Práce je psána v českém jazyce s dobrou a srozumitelnou úrovní jazyka. Práce je přehledně a systematicky strukturována. Text obsahuje 73 odkazů na zahraniční vědeckou a patentovou literaturu, z čehož plyne, že je vlastní práce podána v kontextu současného stavu problematiky ve světě. Mezi literaturou jsou však uvedeny rovněž zdroje (svět tisku), které bych osobně do disertační práce neuváděl. K práci bych měl výtky ve směru terminologické čistoty použitých termínů, kdy místy jsou použity nevhodné termíny především z oblasti tiskových technik, dále jsou používány nevhodně přeložené termíny jako „...Zaostřovací plyn...“, aj. V práci jsou přítomny překlepy, typografické chyby jako orámování obrázků, odkazy na obrázky přímo v nadpise kapitoly, aj. I přes zmíněné výtky shledávám celkově práci z formální stránky jako zdařilou.

### Vyjádření k publikacím studenta

Statement to student's publications

Záznamy na WOS nebylo možné zhodnotit, neboť jsou propojeny se stejnojmenným autorem z Univerzity Pardubice. Autor práce má 26 záznamů v databázi Scopus, kde jedním z hlavních autorů tří publikací v periodiku s IF a spoluautorem řady tematicky související příspěvků ve sbornících mezinárodních konferencí. Z přehledu literatury je patrné, že je i autorem jednoho národního patentu. Lze tedy konstatovat, že autor disertační práce splnil i požadavky kladené na publikační činnost.

### Celkové zhodnocení a otázky k obhajobě

Total evaluation and questions for defence

Na základě předložené práce a z pohledu publikace jejich výsledků v odborné literatuře lze konstatovat, že autor práce plně prokázal vědecky samostatně pracovat a že přispěl k rozvoji problematiky v rámci pracoviště. Disertační práce odpovídá obecně kladeným požadavkům nezbytným pro udělení akademického titulu Ph.D. Předloženou práci doporučuji k obhajobě.

Připomínky a dotazy k obhajobě:

- 1) Na str. 34 píšete: Plasmatická úprava substrátů není trvalá, jejich povrchová energie je zvýšena pouze dočasně (v řádu minut až hodin) a je tedy vhodné provádět plasmatickou aktivaci povrchu. I když máte u daného tvrzení odkazy na literaturu, jste si daným tvrzením skutečně jist? Kdyby tomu tak bylo, polygrafický obor by měl celkem významný problém. Z osobních zkušeností víme, že povrchová úprava pomocí plasmy je účinná v minimálně řádově delších časech. Mohl byste objasnit podstatu změny volné povrchové energie u povrchu polymerních materiálů?
- 2) V případě výsledků u Tabulky 5, jakému jevu přisuzujete vliv na tak vysoké nejistoty hodnot TCR a R? znak  $\pm$  využíváte pro jaký parametr? Jedná se o nejistotu stanovené veličiny pro který se má symbol užívat?
- 3) Jaká je příčina rozptylu u prvků uvedených v Tabulce 6, resp. v Obrázku 37?

Doporučuji disertační práci k obhajobě

I recommend the dissertation for the defence

ano  
yes

x

Datum  
Date

12. 11. 2021

Podpis oponenta:  
Signature of opponent





# POSUDEK OPONENTA DISERTAČNÍ PRÁCE

## Assessment of the Dissertation

Titul, jméno a příjmení studenta:

Title, name, surname of student

Ing. Jiří Navrátil

Doktorský studijní program:

Doctoral study programme

Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Study branch

Elektronika

Téma disertační práce:

Topic of the dissertation

Aerosol Jet – alternativní technologie  
kontaktování, propojování a realizace  
součástek na flexibilních a 3D substrátech

Školitel:

Supervisor

doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.

Oponent:

Opponent

doc. Ing. Jan Urbánek, CSc.

### Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Evaluation of the importance of the dissertation for the field

Předložená disertační práce pana Jiřího Navrátila se zabývá novou pokrokovou depoziční technologií využitelnou v rozvíjející se oblasti tzv. tištěné elektroniky. Tato nová technologie již svým názvem „aerosol jet“ napovídá o užitém principu - unášení mikrokapek inkoustu proudem plynu na podložku. Možnost selektivního ukládání kapalného materiálu na substrát tak výrazně rozšiřuje dosavadní možnosti nanášení aktivních materiálů. Tisk čar o šířce 10 mikrometrů se zdá být bezproblémovým.

Významnou vlastností techniky aerosol-jet je možnost tisku na neplanární povrchy např. na vláknenné struktury.

Nová technologie tak doplňuje stávající techniky deposice materiálů na substráty a rozšiřuje možnosti tvorby funkčních elektronických celků či jejich částí.

Disertační práce ve svém celku prezentuje vlastnosti nové technologie a ilustruje vše na příkladech použití..

### Stanovisko k výsledkům disertační práce a

### k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Statement to the results of the dissertation and promyslené formulace o tvhe original contribution of the submitter of the dissertation

velmi dobrá

Počáteční kapitoly práce jsou věnovány stručnému přehledu „klasických“ depozičních technologií. Dále jasně a dostatečně podrobně uvádí princip a dílčí části zřízení Aerosol Jet. Diskutuje problémy rozhraní povrch substrátu - tištěný inkoust.

Následuje **stanovení cílů** disertační práce. První cíl sleduje tvorbu a kontaktování součástek TPC a SMT, druhý cíl sleduje jednak tvorbu planárních elektrochemických senzorů, jednak tvorbu odporového senzoru na vláknitém substrátu.

Na dalších 50 stranách předkládá řešení stanovených cílů práce.

Kapitola 3. je věnována možnostem souhry nové technologie s tlustovrstvou technikou TPC, kontaktování součástek především výkonových a realizace tlustovrstvových rezistorů.

Kapitola 4. je věnována oblasti senzorů. Úvodní odstavec popisuje problém tvorby tištěných struktur na vláknenných podložkách. Následující kapitoly 4.1.1 až 4.1.3 popisují tvorbu odporového senzoru na polyimidovém substrátu DuPont Kapton. Závěrečná kap. 4.1.4 tvrdí, že tím „...byla úspěšně overěna možnost vytvářet funkční vláknové senzory teploty pomocí technologie tisku aerosolu.“

Další části kap. 4. obsahují popis konstrukce dvou plynových senzorů – senzoru oxidu dusičitého s využitím pevnolátkového elektrolytu, a senzoru etylenu.

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

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

V předcházejícím odstavci bylo upozorněno na rozpor v textu kapitoly 4., který by mohl být vykládán jako nesplnění 2. cíle. To by ale odporovalo celkovému obrazu, který si čtenář práce vytvoří po jejím přečtení. Rozpor v kap. 4 přičítám časovému tlaku při kompletaci textu disertační práce (vanechání textu).

Doktorand využil možnosti nové technologie, konstrukce a parametry senzorů jsou nové, původní.

Uspořádání, jasné a promyšlené formulace, velmi dobré grafické provedení, logické uspořádání experimentů a vyvození závěrů z nich svědčí o pečlivosti autora. Práce je přehledná.

Je psána českým spisovným jazykem (drobné prohřešky: vrstva má „tloušťku“ ne „sílu“, hustý x hustší (ne hustější)).

### **Vyjádření k publikacím studenta**

*Statement to student's publications*

téma

Součástí práce je Přehled publikací ve vztahu k tématu práce – obsahuje 20 položek z let 2015 až 2021 (1 patent), publikací ostatních – obsahuje 16 položek z let 2015 až 2021.

Počet publikací přesahuje obvyklý počet. Zahrnuje široký okruh témat.

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

Disertační práce dokládá plné zvládnutí problematiky nové technologie nezbytné pro rozvoj techniky obecně, pro tištěnou elektroniku zvláště. Práci doporučuji k obhajobě. Očekávám, že pan doktorand Ing. Narátíl při obhajobě vysvětlí rozpor v kap. 4.

Další otázky:

- v kap.4.2.2.3 je uvedeno předpětí mezi pracovní a pseudoreferenční elektrodou  $\pm 800$  mV, v kap.4.2.1.3 pro stejný elektrodový systém uvádí hodnotu počředpětí -500 mV. Je hodnta +800 mV přípustná?

-V tabulce vedlejších jednotek SI uvádíte „standardní kubický centimetr“. Chybí jeho definice. Čím se liší od  $\text{cm}^3$ ?

-Na str. 24 uvádíte rozměry wide hlavy v násobcích 0,25mm. Proč? Otvor je skládaný ze segmentů po 0,25mm? Proč? Jak?

Doporučuji disertační práci k obhajobě  
I recommend the dissertation for the defence

<u>ano</u> yes	x	X no
-------------------	---	---------

Datum  
Date

23. října  
2021

Podpis oponenta:  
Signature of opponent

