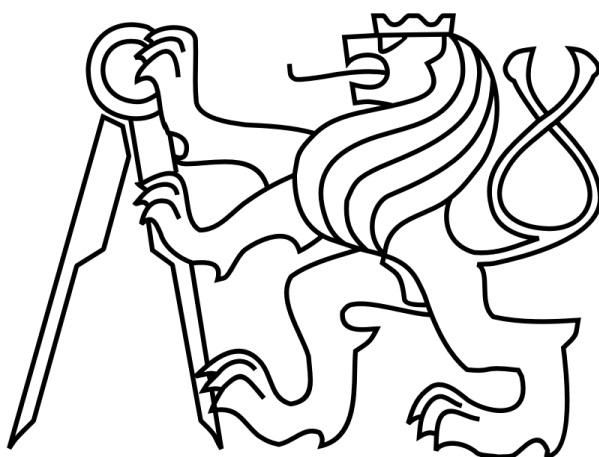


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická



Bakalářská práce

2017

Ilona Shevchenko



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky**

Příprava a charakterizace organických elektronických součástek

Preparation and characterization of organic electronic devices

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, Multimédia, Elektronika

Studijní obor: Komunikační Technika

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Laposá

Ilona Shevchenko

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Shevchenko** Jméno: **Ilona** Osobní číslo: **440933**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Komunikační technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Příprava a charakterizace organických elektronických součástek

Název bakalářské práce anglicky:

Preparation and Characterization of Organic Electronic Devices

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s principy činnosti a způsoby technologické realizace organických elektronických součástek. Zohledněte zejména technologie dostupné na katedře mikroelektroniky FEL ČVUT.
- 2) Připravte a charakterizujte vybrané organické elektronické součástky.
- 3) Vytvořte technologický postup přípravy realizovaných vzorků využitelný ve výuce.
- 4) Zhodnoťte dosažené výsledky, proveďte jejich srovnání a navrhnete další postup.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Klauk, H. Organic Electronics: Materials, Manufacturing, and Applications, ISBN 978-3527312641, Wiley 2006.
- [2] Klauk, H. Organic Electronics II: More Materials and Applications, ISBN 978-3527326471, Wiley 2012.
- [3] Saganuma, K. Introduction to Printed Electronics, ISBN 978-1461496250, Springer 2014.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Alexandr Laposa, katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.02.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **25.05.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studentky

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Ilona Shevchenko

Poděkování

Ráda bych poděkovala mému vedoucímu Ing. Alexandru Laposovi za věnovaný čas, ochotu, poskytnutí odborných materiálů a za pomoc a rady při zpracování této práce.

Mé poděkování patří též Bc. Vojtěchu Povolnému za pomoc a rady během mé práce v laboratoři.

Děkuji také svému kolegovi Oto Šarközy za morální podporu a trpělivost.

Anotace

Tato práce se zabývá přípravou elektronických součástek pomocí materiálového Inkjet tisku a charakterizací těchto struktur.

V teoretické části této práce jsou popsány principy výroby tištěné elektroniky a materiály pro elektroniku organickou. Dále je uveden související rozbor kapacitního senzoru, který byl vybrán k realizaci modelové elektronické součástky. Tato součástka je v praktické části použita jako snímač hladiny.

V praktické části je popsán postup výroby kapacitního snímače hladiny v inter-digitálním provedení, provedena jeho charakterizace a zjištěna závislost celkové kapacity senzorů na geometrických rozměrech.

Klíčová slova

Tištěná elektronika, Inkjet, inkoustový tisk, organická tištěná elektronika, kapacitní kondenzátor, Inter-digitální kapacitní snímač hladiny.

Annotation

The thesis studies preparation of electronic components using material Inkjet printing and characterization of these structures.

The theoretical part of this thesis describes principles of production of printing electronics and materials for organic electronics. Further, the related analysis of the capacitive sensor, selected for a model electronic component implementation is presented. The component is used as a level sensor in the practical part.

The process of production of inter-digital capacitor level sensor, its characterization and dependence of the total capacitance of the sensors on geometric dimensions is determined in the practical part.

Key words

Printed electronics, Inkjet printing, organic printing electronics, IDC, novel planar interdigital capacitor level sensor

Obsah

1.	Úvod	1
2.	Teoretická část	3
2.1	Úvod do organické tištěné elektroniky	3
2.2	Metody materiálového tisku	4
2.2.1	Inkoustový tisk	7
2.3	Inkousty pro materiálový tisk	10
2.3.1	Organické polovodiče	10
2.3.2	Vodivé organické materiály	11
2.4	Substráty	11
2.5	Kapacitní snímače	13
2.5.1	Princip činnosti	13
2.5.2	Deskový kapacitní senzor	14
2.5.3	Dotykový kapacitní senzor	15
2.5.4	Inter-digitální kapacitní snímač	15
3	Praktická část	18
3.1	Úvod	18
3.2	Výroba přípravku	18
3.2.1	Návrh motivu	18
3.2.2	Materiály použité pro tisk	20
3.2.3	Příprava tiskárny	21
3.2.4	Kontaktování	23
3.2.5	Vytvoření krycí vrstvy	24
3.3	Průběh a výsledky měření	28
3.3.1	Příprava měření	28
3.3.2	Charakterizace vzorku natisknutých na PET folii	29
3.3.3	Charakterizace vzorku natisknutých na Fotopapír	31
3.3.4	Porovnání charakteristik vzorku natisknutých na PET folii a na fotopapíru	33
3.3.5	Shrnutí a závěry měření	34
4	Závěr	35

5.	Použitá literatura a zdroje	1
6.	Přílohy	
A	Laboratorní úloha.....	
B	Seznam vyrobených vzorků	
C	Tabulky a grafy s naměřenými hodnotami.....	
D	Seznam použitých zařízení:	
E	Tabulky vlastností použitých materiálu.....	

Seznam použitých zkratk a pojmů

PE	Printed Electronics (tištěná elektronika)
OPDs	Organic Photo Diodes (organické fotodiody)
OLED	Organic Light Emitting Diodes (organický světlo emitující diod)
RFID	Radio Frequency Identifier (identifikátory na radiové frekvence)
OFET	Organic Field Effect Transistors (organické tranzistory řízené polem)
PDMS	Polydimethylsiloxane
CIJ	Continual ink jet printing
DOD	Drop-on-demand
BMP	BitmaP (rastrový formát obrázku systému Windows)
PET	Poly(ethylene terephthalate)
PEN	Poly(ethylene naphthalate)
PI	Poly(imide)
IDC	InterDigitated Capacitor (inter-digitální kondenzátor)

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1: a) Princip kontinuálního tisku; b) Princip tisku „Na vyžádání“	7
Obrázek 2: Vybavení pracoviště pro materiálový tisk. Upraveno podle [12]	9
Obrázek 3: a) Parametry kondenzátoru s paralelními deskami; b) rozložení elektrického pole kondenzátoru s paralelními deskami	13
Obrázek 4: Změna kapacity vyvolaná a) změnou permitivity dielektrika; b) změnou plochy desek; c) změnou vzdálenosti mezi deskami	14
Obrázek 5: Konstrukce dotykového kapacitního senzoru. Upraveno podle [20]	15
Obrázek 6: Inter-digitální kondenzátor (IDC) ve 3D. Upraveno podle [21]	15
Obrázek 7: Rozložení elektrického pole v IDC. a) horní pohled na inter-digitální elektrody, b) pohled v průřezu	16
Obrázek 8: Rozměry layoutu inter-digitálního kapacitního senzoru	18
Obrázek 9: Příklad navrženého v AutoCAD layoutu inter-digitálního kapacitního senzoru	19
Obrázek 10: Catrige použitý pro tisk stříbrné vodivé vrstvy	20
Obrázek 11: Filtr PURADISC 25mm a) pohled z boku; b) pohled zdola	20
Obrázek 12: Podrobné nastavení inkoustu: a) Velikost napětí na jednotlivých tryskách; b) Teplota, Počet použitých trysek a výška cartridge, ve které bude tisknout; c) Typ a četnost čištění cartridge	22
Obrázek 13: Nastavení napěťového průběhu pro aktivaci trysek	22
Obrázek 14: Sledování letu kapky inkoustu	23
Obrázek 15: Elektricky vodivá pasta a nakontaktovaný vzorek	23
Obrázek 16: a) senzor před namočením ve vodě; b) senzor po ponoření ve vodě; c) senzor po uplynutí 10 minut; d) degradace v důsledku doteku	24
Obrázek 17: Vzorek pokrytý vrstvou uretanu po namočení ve vodě	25
Obrázek 18: Vzorek zakrytý vrstvou plastiku	26
Obrázek 19: Uspořádání pracoviště pro měření celkové kapacity senzoru	28
Obrázek 20: Kapacitní senzor vyrobený na PET folii (šířka prstů 2 mm a délka prstů 10 mm)	29
Obrázek 21: Kapacitní senzor vyráběný na fotopapíru ze (šířka prstů 1mm a délka prstů 20 mm)	31

Seznam použitých tabulek

Tabulka 1: Tiskové metody.....	6
Tabulka 2: porovnání parametrů tisku s různými způsoby buzení trysek. Podle [15]	8
Tabulka 3: Přehled vlastností krycích vrstev	25
Tabulka 4: Geometrické rozměry vzorku použitého pro zkoušku laminovacích folií	26

Seznam grafů

Graf 1: Závislost kapacity senzorů ($L=5$ mm, $W=1$ mm) na výšce ponoření pro různé krycí vrstvy.....	26
Graf 2: Závislost celkové kapacity na výšce hladině vody u vzorků senzorů s různou délkou prstů a vyrobených na PET folii	29
Graf 3: : Závislost celkové kapacity na výšce hladině vody u vzorků senzorů s různou šířkou prstů a vyrobených na PET folii	30
Graf 4: Závislost citlivosti senzorů na ploše elektrod u vzorků senzorů vyrobených na PET folii	30
Graf 5: Závislost celkové kapacity na výšce hladině vody u vzorků senzorů s různou délkou prstů a vyrobených na fotopapíru	32
Graf 6: Závislost celkové kapacity na výšce hladině vody u vzorků senzorů s různou šířkou prstů a vyrobených na fotopapíru	32
Graf 7: Závislost citlivosti senzorů na ploše elektrod u vzorků senzorů vyrobených na fotopapíru	33
Graf 8: Porovnání citlivosti vzorků vytisknutých na různých substrátech.....	33

1. Úvod

Za posledních 200 let elektronika prodělala obrovský a velmi prudký vývoj od elektromechanických relé přes tranzistory až po složité integrované obvody. V posledním desetiletí dochází k častějšímu využití nanotechnologií, díky kterým je možné realizovat složitější inteligentní zařízení, nevyrobitelné standardními elektrotechnickými technologiemi. Moderní svět klade nové požadavky na elektronické součástky. Běžně používané (anorganické) materiály pro substráty, elektronické struktury, pouzdra aj. jsou doplňované nebo nahrazované materiály organickými. Organické materiály mají řadu unikátních vlastností: jsou transparentní, mohou být nanášeny v tenké vrstvě (až do jednotek nanometrů), mohou být deponovány na více druhů substrátů (např. papír, tkaniny, fólie aj.), a proto dovolují vyrábět průhledná a flexibilní zařízení. Organické elektronické zařízení jsou energeticky účinnější a bezpečnější pro okolní prostředí a mohou být vyrobeny s použitím menšího množství energie (jsou ekologičtější).

Zároveň tedy dochází ke zdokonalení způsobu výroby. Výroba konvenční elektroniky je složitá a časově náročná, k tomu má vysoké výrobní náklady, proto se v dnešní době intenzivně pracuje na rozvoji nových technologií, například založených na tiskových metodách. A takové elektronice se pak říká tištěná elektronika. Tyto technologie jsou jednoduché a lehce aplikovatelné pro hromadnou výrobu. Zajímavou je i cena tištěné elektroniky. Díky tomu, že materiál nanášíme jen tam, kde je to potřeba, náklady na materiál jsou výrazně nižší než například u součástek na křemíkových substrátech. Z toho je jasné, že spojení organických materiálů a procesu materiálového tisku dává možnost vyrábět současné elektronická zařízení s výjimečnými parametry. V současné době je organická tištěná elektronika jedním z nejrychleji se rozvíjejících odvětví elektronického průmyslu. Hlavními objekty výzkumu jsou OLED displeje, tranzistory, solární články a biosenzory. Potenciální oblasti uplatnění organických elektronických součástek zahrnují širokou škálu oborů, včetně medicíny, biomedicíny, ochrany životního prostředí, informačních a komunikačních technologií či oblast bezpečnosti.

Na FEL ČVUT, katedře mikroelektroniky v laboratoři nanolitografie je k dispozici materiálová tiskárna vhodná pro výrobu organických elektronických součástek. Cílem této bakalářské práce je seznámení s principy činností a způsoby technologické realizace tištěných organických součástek.

V teoretické části této práce jsou stručně popsány principy výroby tištěné elektroniky a materiály pro elektroniku organickou. Dále je v teoretické části uveden související rozbor kapacitního kondenzátoru, který byl vybrán k realizaci modelové elektronické součástky vyrobené technologií inkoustového tisku. Tato součástka je dále použita jako snímač hladiny.

Úvod

V praktické části je popsán postup výroby kapacitního snímače hladiny v inter-digitálním provedení pomocí technologií dostupných na katedře mikroelektroniky FEL ČVUT. Realizované vzorky jsou charakterizovány a je popsána závislost celkové kapacity senzorů na geometrických rozměrech. Výstupem této práce je také laboratorní úloha, která je sepsaná pro použití ve výuce (viz. Příloha A). Úloha slouží k seznámení studentů s principy činnosti kapacitních senzorů a ukázce využití materiálového tisku pro výrobu součástek.

Cíle práce:

- Seznámení se s principy činnosti a způsoby technologické realizace organických elektronických součástek dostupných na katedře mikroelektroniky FEL ČVUT.
- Realizovat a charakterizovat vybranou tištěnou elektronickou součástku.
- Vytvořit technologický postup přípravy realizovaných vzorků využitelný ve výuce.
- Zhodnotit výsledky.

2. Teoretická část

2.1 Úvod do organické tištěné elektroniky

Hlavní myšlenka organické elektroniky – použití elektroniky na bázi organických materiálů namísto tradičních anorganických materiálů. Organické látky se běžně používají jako dielektrikum, ale některé z nich vykazují také elektrické vlastnosti. Rovněž organické materiály mají řadu dalších výhod oproti anorganickým: mohou být lehké, tenké, flexibilní a průsvitné, nevyžadují vysoké teploty pro zpracování, poměrně snadno se nanášejí a deponují na různé substráty za pokojové teploty. Často je pojem organická elektronika označován jako tištěná elektronika, zkráceně PE (Printed Electronics). Inkousty pro materiálový tisk jsou ve formě kapaliny, koloidní soustavy, roztoku, disperze nebo suspenze.


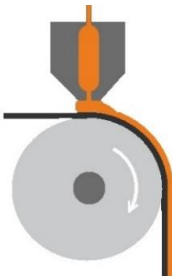

Kombinování organických látek a kovových inkoustů dává možnost vytvářet velké množství druhů elektronických součástek. Kovové vodivé inkousty a inkousty založené na vysoce vodivých polymerech používáme pro výrobu jak jednoduchých součástek jako kondenzátor, rezistor a induktor, tak i pro výrobu složitějších zařízení jako fotodiody OPDs (Organic Photo Diodes), světlo emitující diody OLED (Organic Light Emitting Diodes) displejů, identifikátory RFIDs (Radio Frequency Identifier), organické tranzistory řízené polem OFETs (Organic Field Effect Transistors).[1].

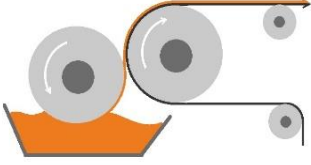
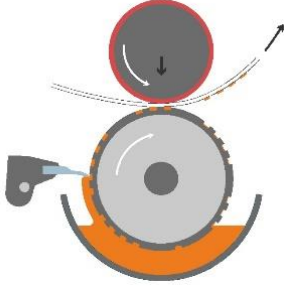
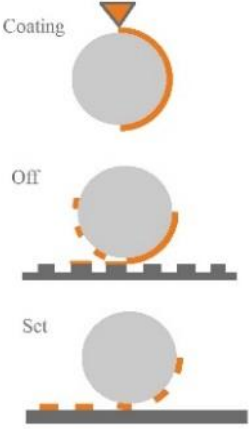
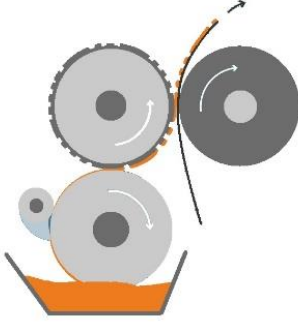
Organická elektronika se nesnaží konkurovat klasické výkonné elektronice, ale vytváří zcela nový segment velmi levných, jednoduše vyrobitelných zařízení, obecně s nižším výkonem, avšak se zcela novými vlastnostmi a možnostmi využití v celé řadě odvětví. Příkladem mohou být průhledné a ohebné solární panely a displeje, senzory a další [2].

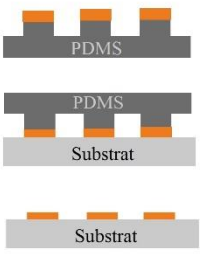
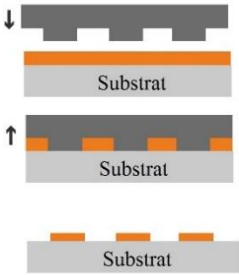
V dalších kapitolách budou detailně popsány metody a materiály pro výrobu tištěné organické elektroniky.

2.2 Metody materiálového tisku

Tištěná elektronika je souborem metod určených pro výrobu elektronických součástek na různých substrátech. Anorganické a organické inkousty nanesené na substráty vytváří aktivní nebo pasivní elektronické prvky, jako jsou například tenkovrstvé tranzistory nebo odpory. Existuje velké množství tiskových metod. V následující tabulce (Tabulka 1) jsou shrnuty běžné tiskové metody.

Název metody	Schéma procesu	Popis metody
Bezkontaktní metody		
Inkjet tisk		Používají kapky inkoustu emitované z trysek pro vytvoření materiálové vrstvy na substrátu. Nepotřebuje žádné zvláštní prostředí, například vakuum. Tisk může být proveden na jakýchkoli substrátech, například plast, papír, sklo nebo flexibilní folie. Více o Inkjet tisku bude řečeno v kapitole 2.2.1
Slot-die tisk		Jako substráty se nejčastěji používají sklo, ocel nebo polymery. Materiál, který chceme tisknout, je natlakovaný do štěrbin (slotů), ze které se přenáší na substrát ve tvaru. Tloušťka vrstvy je závislá na rychlosti tisku a na vzdálenosti mezi štěrbinou (slotem) a substrátem.
Kontaktní metody		
Sítotisk		Je nejrozšířenějším způsobem tisku. Patří mezi metody průtlačného tisku. Materiál prochází skrz tiskovou desku s nanesenou maskou. Tisková deska je umístěna nad potiskovým médiem. Tisknutý materiál je protlačován pohyblivou stěrkou. V netisknoucích místech je tisková deska uzpůsobena tak, aby skrze ni barva neprošla. Tak tloušťka natištěných struktur může být od desítek μm do 100 μm .

<p>Roll-to-Roll</p>		<p>Způsob tisku na flexibilních substrátech používaný v hromadné výrobě. Formový válec se otáčí v materiálu, který chceme natisknout. Druhý, tlakový, válec přenáší tištěný materiál na substrát. Tloušťka nanášené vrstvy závisí na vzdálenosti tiskových válců, rychlosti tiskového procesu a viskozitě nanášeného materiálu.</p>
<p>Hlubotisk (Gravure Printing)</p>		<p>Je jednou z nejstarších metod tisku. Na formovém válci je vyryt motiv. Válec je ponořen do vany s materiálem, který chceme tisknout, a nabírá ho do vyrytých jamek. Pak se štětkou odstraňuje přebytečné množství materiálu z netisknoucích míst. Tlakový válec přitlačuje substrát k povrchu formového válce, čím zajišťuje přenos materiálu.</p>
<p>Ofset tisk</p>		<p>Materiál je nanášen na formový válec pomocí barvicího válce. Z formového válce se materiál přenáší na přenosný válec, na kterém je vyryt motiv. Substrát je přitlačován k přenosovému válci pomocí tlakového válce, čím je zajištěn přenos materiálu. Mezi výhody této technologie patří vysoká produktivita a možnost nanesení otisků různé tloušťky na jeden substrát. Minimální tloušťka vrstvy je od 10 do 50μm.</p>
<p>Flexotisk</p>		<p>Barvicí válec čerpá materiál ze zásobníku a přenáší ho na formový válec. Na formovém válci je vyryt motiv, který chceme tisknout. Flexibilní elastická tisková deska je umístěna mezi formovým a tlakovým válcem. Tlakový vytváří potřebný tlak k otisku vzoru na substrát.</p>

<p>Mikrokontaktní tisk (μCP)</p>		<p>Polydimethylsiloxanová (PDMS) razítka s reliéfním vzorem jsou nejprve obarvena roztokem. Roztok vytvoří molekulovou vrstvu, nebo v případě velmi malých molekul se do PDMS absorbují. Poté se razítka vysuší a lisují se na připravený povrch. Proto, že PDMS razítka jsou velmi měkká, vytvoří těsný kontakt s povrchem a molekulami, které jsou z razítka na povrch převedena. Mikrokontaktní tisk dovoluje natisknout vrstvu do 100nm skoro na jakýkoli substrát.</p>
<p>Nanotisková litografie</p>		<p>Využívá se formy z tvrdého materiálu, na které je vyryt motiv v jednotkách nanometru. Forma je vtlačována do polymerního substrátu s nanoseným rezistem a tím se vytváří otisk v substrátu. Dál se rezist vytvrzuje pomocí reaktivního iontového leptání. Minimální velikost motivu může klesat být pod 10nm a být stejně velká jako velikost molekuly rezistu.</p>

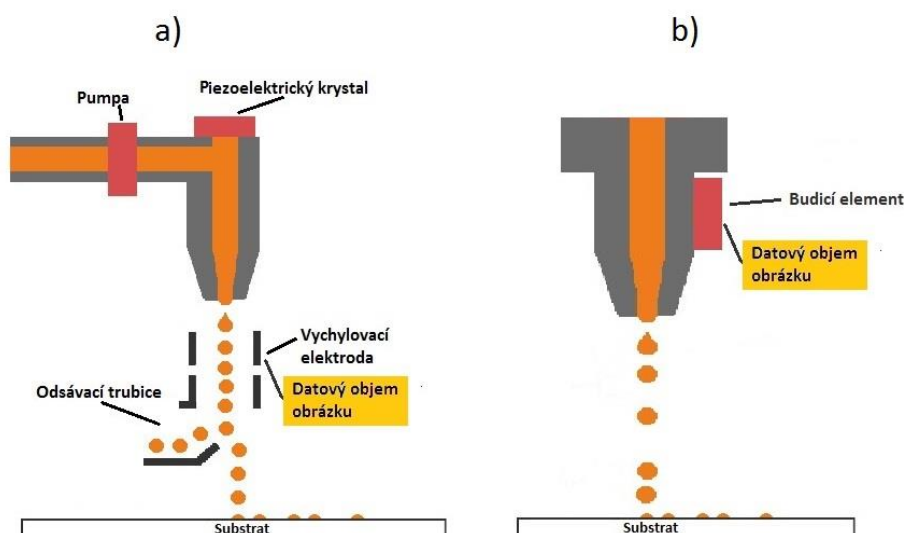
Tabulka 1: Tiskové metody [3],[4],[5],[6],[7]

Vhodný druh tisku volíme podle požadovaných parametrů technických vrstev, vlastností používaného materiálu a samozřejmě podle ekonomických a technických požadavků kladených na konečný výrobek. Například sítotisk je používán pro výrobu elektroniky díky možnosti vytvářet různé motivy tlustých vrstev pomocí materiálů ve formě past. Sítotiskem lze vyrobit nejen aktivní anorganické vrstvy, ale také izolační a pasivní vrstvy, přičemž tloušťka vrstvy má přednost před rozlišením. Hlubotisk, ofsetový a flexotisk jsou vhodné pro velkosériovou výrobu takových součástek jako například solární články díky velké výrobní rychlosti. Zatímco ofsetový a flexotisk se používají hlavně pro tisk elektrických vodičů, hlubotisk je vhodný zejména pro vrstvy citlivé na kvalitu tisku, takové jako polovodiče, dielektrické rozhraní a vodiče s vysokým rozlišením. [8] Také pro součástky vyžadující velké přesnosti použijeme inkoustový tisk.

2.2.1 Inkoustový tisk

Pro tisk složitějších struktur a motivů je vhodné použít inkjetový (materiálový) tisk. Technologie materiálového tisku je velice atraktivní pro své unikátní vlastností a flexibilitě. Patří mezi bezkontaktní metody tisku, a proto nepotřebuje žádnou masku ani razítko pro přenos materiálů na substráty. Dovoluje nanášet inkoust jen tam, kde je to potřeba, která vede k výraznému snížení materiálové spotřeby. Nepotřebuje žádné specifické prostředí (např. vakuum) na rozdíl od mnoha depozičních systémů. Inkoustový tisk umožňuje tisk předloh s vysokým rozlišením, umožňuje používat nejrůznější inkousty, včetně inkoustu s nízkou viskozitou, a tisk může být proveden na různé druhy substrátů (např. plast, papír, sklo nebo flexibilní folie).

Veškeré materiálové tiskárny používají kapky inkoustu emitované z trysek pro vytvoření materiálové vrstvy na substrátu. Existují dva hlavní principy tvoření kapek v těchto tiskárnách – kontinuální (CIJ) a „Na vyžádání“ (ang. Drop-on-demand, DOD), viz Obrázek 1.



Obrázek 1: a) Princip kontinuálního tisku; b) Princip tisku „Na vyžádání“.

V tiskárně, pracující na kontinuálním principu je nepřetržitý proud kapiček s třísky vytvořen pomocí piezoelektrického krystalu. Proud kapek je dále nabíjen a vychylován elektrostatickým polem pomocí vychylovací elektrody tak, aby dopadl na substrát. Nevychýlený proud je směřován do odsávací trubice, která vrací inkoust do oběhu.

Drop on demand je ideální technikou pro tisk materiálových funkčních vrstev. Za prvé, je velmi flexibilní díky tomu, že cartridge s inkousty lze snadno vyměnit. Za druhé, DOD systém s vysokým rozlišením je komerčně dostupný. Za třetí, změna intenzity řídicího elektrického impulzu a dalších jeho charakteristik umožňuje tisk čar s různými parametry. Nicméně, v důsledku přerušovaného vytvoření tlakových vln v dutině tryskové hlavy, jsou tryskové hlavy více náchylné k ucpaní než kontinuální tiskový systém. [9]

Teoretická část

Drop on demand tiskárna vystřikuje kapky inkoustu z trysky jen na požadavek, to znamená, že kapky jsou z tiskové hlavy „vystřeleny“ pouze tehdy, mají-li na potiskované médium dopadnout. Není potřeba používat vychylovací elektrody ani systém recyklace.

Pro úplnost existuje několik typů rozdělených podle:

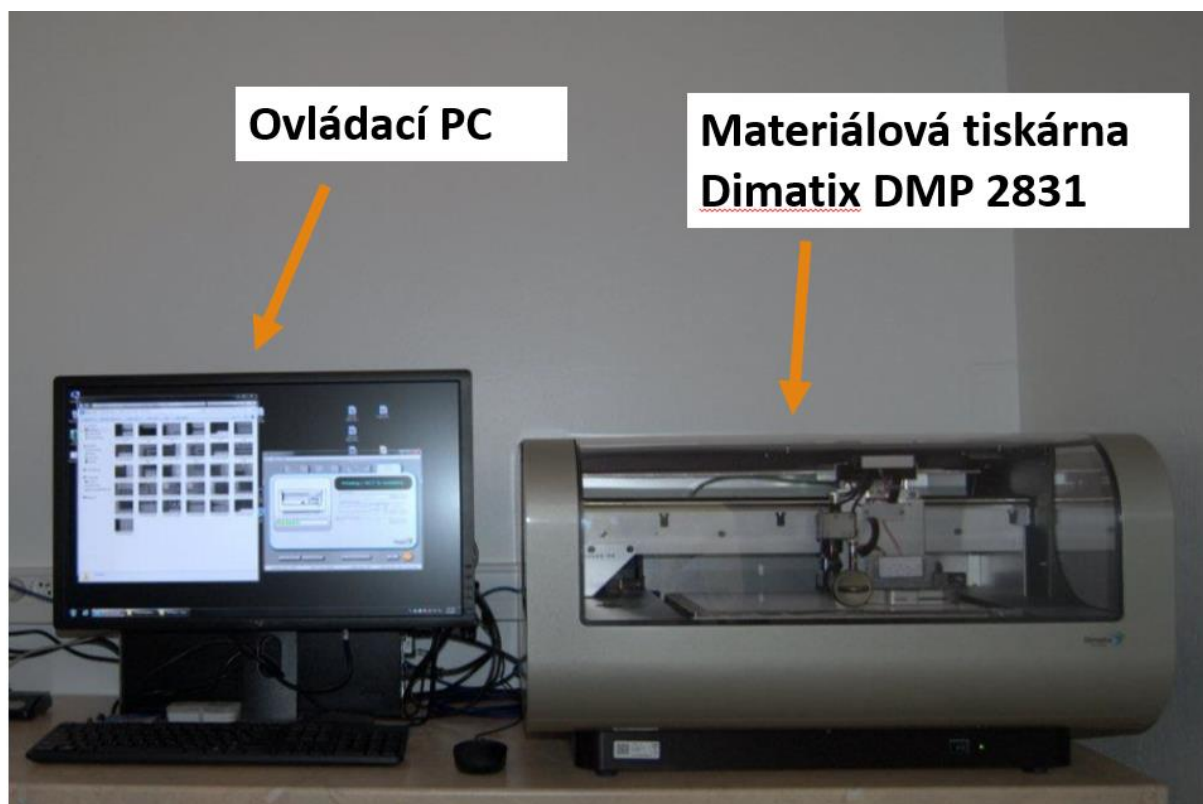
- Termální – nevhodný pro tisk materiálových funkčních vrstev z důvodu použití vysoké teploty pro systém buzení
- Piezoelektrický
- Akustický
- Elektrodynamický

V Tabulce 2 jsou shrnuty vlastnosti výše zmíněných typů buzení vhodných pro materiálový tisk.

Technologie	Minimální objem kapky (fl)	Minimální průměr kapky (μm)	Tisku několika tryskami	Požadovaná viskozita (mPa s)
Piezoelektrický tisk	1000	12	Ano	0,5-40
Akustický tisk	65	5	Ne	N/A
Elektrodynamický tisk	0,7	1	Ne	N/A
Kontinuální tisk	N/A (proud kapek)	5	Ano	0,7-2500

Tabulka 2: porovnání parametrů tisku s různými způsoby buzení trysek. Podle [10]

Na piezoelektrickém principu funguje systém pro materiálový tisk Fujifilm DIMATIX DMP 2831, který je k dispozici na katedře mikroelektroniky FEL ČVUT. (Obrázek 2). Tento typ tiskáren využívá k tisku piezoelektrickou deformaci tryskové komůrky. Princip činnosti a vlastnosti této tiskárny je detailně popsáno například v [11], [12].



Obrázek 2: Vybavení pracoviště pro materiálový tisk. Upraveno podle [12]

2.3 Inkousty pro materiálový tisk

Jedním z nejdůležitějších parametrů tiskového procesu je tiskový inkoust. Kvalita natištěných struktur především zaležet na jeho fyzikálních vlastnostech. Viskozita inkoustu definuje objem a formu kapky. Vysoká viskozita může být příčinou ucpání trysek a naopak nízká způsobí tvorbu přidružených kapek, proto doporučená viskozita by měla být v rozsahu $6-12 \cdot 10^{-3}$ Pas a povrchové napětí mezi $30 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^{-1}$. [13] Hodnota viskozity záleží na přítomnosti a koncentraci polymerů, složení rozpouštědla, koagulace částic. Dalšími parametry jsou hustota inkoustu a jeho povrchové napětí, které ovlivňují rychlost odtrhávání kapky. Povrchové napětí rovněž ovlivňuje velikost a tvar kapky a dále smáčení povrchu substrátu. [13] Velikost částice v inkoustu významně ovlivňují jeho vlastnosti. Aby se zabránilo ucpání trysky většími nanočásticemi a polymery, je nutné inkoust před tiskem přefiltrovat. Metoda materiálového tisku je velmi citlivá na tyto parametry, které v podstatě i určují použitelnost inkoustu.

Organické materiály používané pro materiálový tisk můžeme rozdělit na tři základní skupiny: polovodiče, vodiče a dielektrikum. Je nutné zmínit, že pro Inkjet tisk nelze použít čisté anorganické látky. Aby inkoust měl vlastností požadované pro tisk, je nutné anorganický materiál rozpustit v organickém rozpouštědle, čímž vznikají kompozitní organické materiály popsány v kapitole 2.3.2.

2.3.1 Organické polovodiče

Organické polovodiče jsou obvykle tvořeny molekulami s π -konjugovaným systémem vazeb a mají podobné vlastnosti jako polovodivé anorganické látky. Nicméně na rozdíl od anorganických materiálů jejich fyzikální a chemické vlastnosti lze změnit úpravou funkčních skupin na molekule [14]. Díky tomu lze snadněji dosáhnout požadovaných vlastností, která přináší zcela nové možnosti využití organických polovodičů.

Dle typu molekul se organické polovodiče dělí na polymery a nízkomolekulární materiály. Polymerní polovodiče mají většinou hlavní řetězec tvořen systémem π -konjugovaných vazeb s bočními řetězci, jenž definuje některé jeho vlastnosti jako například rozpustnost. [2] Polymery v čistém stavu jsou izolanty nebo polovodiče, ale dopováním sloučenin, které polymerům odebírají elektrony, nebo je naopak do polymeru dodávají, se z nich stávají elektrické vodiče. Nízkomolekulární organické polovodiče tvoří krystalické struktury, a proto oproti polymerům mají jasně definovanou krystalovou mřížku, stejnou molekulovou hmotnost a vysokou čistotu. [15]

2.3.2 Vodivé organické materiály

Organické vodivé materiály lze rozdělit na dvě skupiny z hlediska jejich elektrických vlastností, a to na:

- kompozitní organické vodivé látky (látky s nevlastní vodivostí)
- organické látky s vlastní vodivostí.

Kompozitní organické vodivé látky:

Kompozitní organické vodivé látky vznikají zakomponováním mikroskopických částic anorganického vodivého materiálu do matrice organického materiálu. Částice mohou mít tvar kuliček, lupínků nebo být ve formě jemno namletého prášku. Vodivost celého systému se přibližuje vodivosti zakomponovaných částic a elektrické vlastnosti jsou ovlivněny jejich tvarem, množstvím a homogenitou. Pro vytvoření kompozitních organických vodivých látek se nejčastěji používá uhlík nebo kovy.

Organické látky s vlastní vodivostí:

Vodivost organických látek s vlastní vodivostí je způsobena specifickým uspořádáním vzájemných vazeb molekul v samotném materiálu. Díky tomu, že vrstvy organických látek mohou být nanášeny za pokojové teploty přímo z roztoku, jsou vhodné pro nanášení tiskovými metodami.

2.4 Substráty

Substrát je nosnou podložkou integrovaných obvodů a systémů. Klíčovými parametry pro výběr materiálu substrátu jsou: drsnost a nerovnost povrchu, tepelné, termomechanické, vlastnosti, modul pružnosti, vodivost substrátu a jeho magnetické vlastnosti. Jako substráty pro tištěnou elektroniku je běžně používáno sklo, polymerní a kovové fólie, nebo dokonce papír.

Sklo je nejpoužívanějším materiálem pro substráty díky vynikajícím optickým a mechanickým vlastnostem. Skelný substrát může být flexibilní, pokud je jeho tloušťka menší než 100 μm ; má vysokou optickou propustnost, která je větší než 90%; je nepropustný vůči vodě a kyslíku; je teplotně odolný a odolný proti mnoha chemikáliím. Kromě toho je sklo kvalitním elektrickým izolantem. Nevýhodou flexibilního skla je jeho velká křehkost. [16]

Polymerní fólie jsou velmi flexibilní, levné, mají vysokou optickou propustnost a mohou být využity v hromadné výrobě. Nicméně jsou tepelně a rozměrově méně stabilní než skleněné substráty a nejsou odolné proti pronikání kyslíkem a vodou. Při aplikacích vysokých teplot se zkroutí a ztrácí své mechanické vlastnosti.

Teoretická část

Nejčastěji se používají tenké plastové folie:

Poly(ethylene terephthalate)folie (PET) pro svou nízkou cenu, optickým vlastnostem a poměrně vysoké teplotní stabilitě (teplota měknutí 250-255°C)[16]. PET folie byla využita v praktické části;

Poly(ethylene naphthalate)folie (PEN) pro svou vysokou pevnost, chemickou, hydrolytickou, tepelnou a oxidační odolnost a odolnost proti ultrafialovému (UV) záření;

Poly(imide)folie (PI) kvůli své tepelní stabilitě, dobré chemické odolnosti, vynikajícím mechanickým vlastnostem.

Papír je běžný a levný materiál. Jeho vysoká drsnost a vysoká savost je však pro elektroniku problematická. Povrch papíru je před použitím pro materiálový tisk nutné upravit (např. nanesením tenké vrstvy nebo korónového výboje).

2.5 Kapacitní snímače

V současné době jsou kapacitní senzory široce používány v mnoha oblastech. Kvůli své jednoduchosti umožňují vytvořit robustní a spolehlivé konstrukce. Jsou vhodné pro měření výšky hladiny, snímání polohy a analýzu materiálového složení. Svá uplatnění našly například v potravinářském, textilním a automobilovém průmyslu. Kapacitní senzory mají řadu výhod oproti jiným typům snímačů. Tyto výhody jsou:

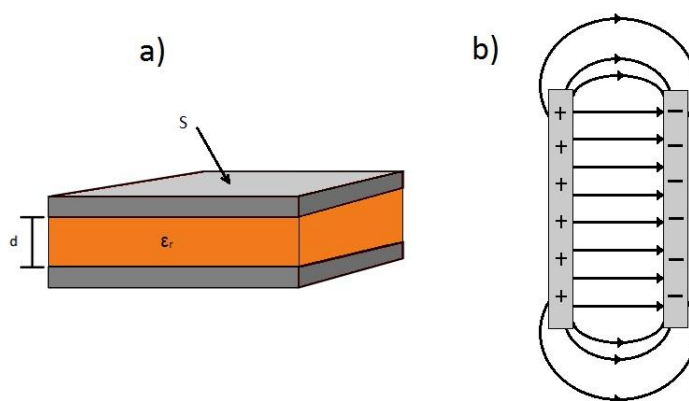
- Dokážou rozlišit praktický libovolný materiál, jak vodivý tak i nevodivý (kůže, plasty, kovy, kapaliny);
- Mají vysokou citlivost i do velké vzdálenosti;
- Pracují bezdotykově, bez zpětného působení;
- Mají nízkou spotřebu energie a dlouhou životnost;
- Mohou mít malé rozměry a hmotnost, snadno se tvarují a přizpůsobí se různým úkolům;
- Snadno se vyrábějí. Pro výrobu se používají levné materiály.[17]

2.5.1 Princip činnosti

Elektrická kapacita **C** vyjadřuje schopnost vodiče uchovat elektrický náboj **Q** při určitém napětí **U** (1) [18].

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1)$$

Čím větší kapacita, tím větší množství náboje může být na vodiči. Protože, kapacita vodiče je velmi malá, používáme součástky zvané kondenzátory, ty jsou tvořeny dvěma vodivými deskami oddělenými dielektrikem (Obrázek 3).



Obrázek 3: a) Parametry kondenzátoru s paralelními deskami; b) rozložení elektrického pole kondenzátoru s paralelními deskami

Teoretická část

Kapacita kondenzátoru s paralelními deskami je dána permitivitou desky plošného spoje a společnou plochou elektrod a vypočítává se podle vztahu (2):

$$C = \frac{\epsilon_r S}{d} \quad (2)$$

Kde

S (m^2) - obsah plochy desky,

d (m) - vzdálenost desek,

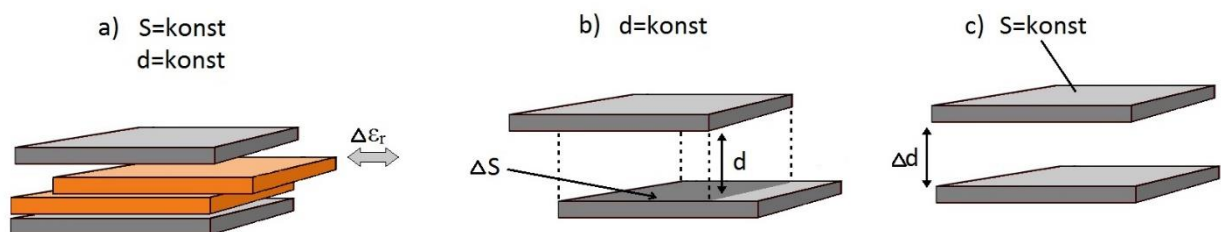
ϵ_r ($\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$) - relativní permitivita dielektrika [18]

Podle struktury, kterou jsou tvořeny, můžeme kapacitní senzory rozdělit do následujících skupin:

- Deskový kapacitní senzor (paralelní desky);
- Dotykový kapacitní senzor (jedna deska tvořena elektrodou, druhá - libovolný vodivý či nevodivý předmět);
- Inter-digitální kapacitní snímač (vodivé elektrody umístěné v jediné vrstvě).

2.5.2 Deskový kapacitní senzor

Deskový kapacitní senzor je tvořen pomocí deskového kondenzátoru. Kapacita je závislá na ploše desek, vzdálenosti mezi deskami a permitivitě dielektrika. Změna jakýchkoli parametrů vyvolává změnu kapacity (Obrázek 4). Vysoká hustota elektrických polí mezi dvěma deskami zajišťuje vysokou citlivost senzoru. Příklady aplikací pro tuto topologii jsou materiálová analýza a snímání polohy.

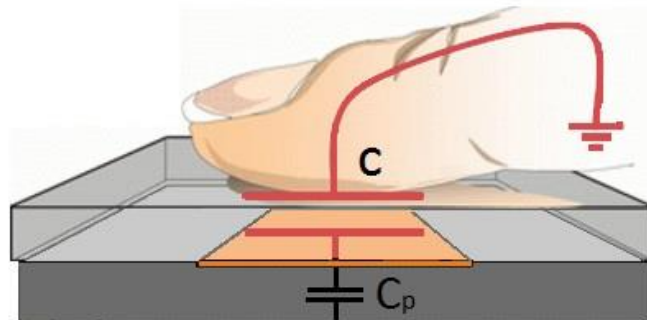


Obrázek 4: Změna kapacity vyvolaná a) změnou permitivity dielektrika; b) změnou plochy desek; c) změnou vzdálenosti mezi deskami

Materiálovou analýzu provedeme na základě rozdílu dielektrických konstant materiálů, které budou vystupovat jako dielektrika. Princip činnosti snímače polohy je na základě změny vzdálenosti mezi elektrodami nebo změny jejich ploch.[19]

2.5.3 Dotykový kapacitní senzor

Funkčnost takového senzoru je založená na vodivosti lidského těla. Povrch senzoru tvoří jedna vodivá vrstva (Obrázek 5).

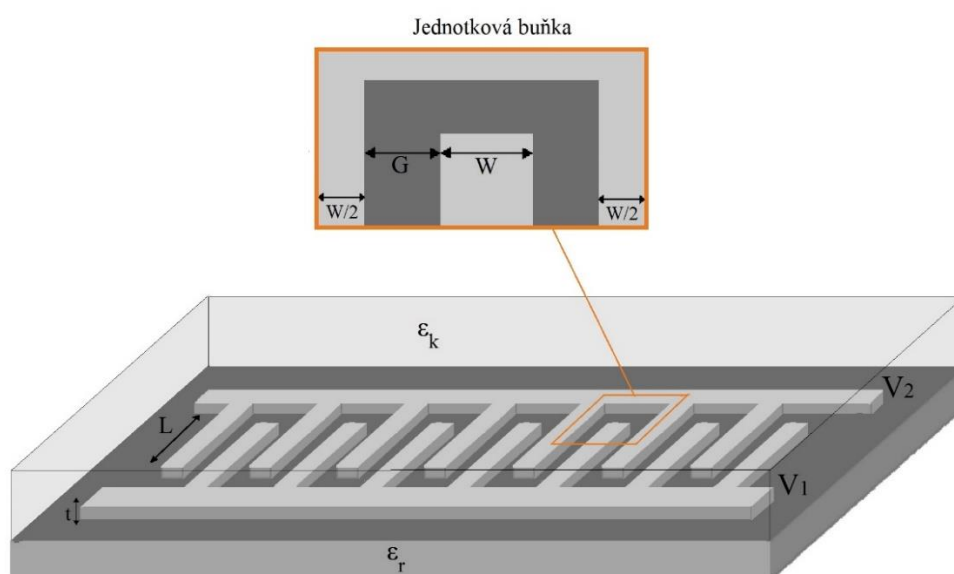


Obrázek 5: Konstrukce dotykového kapacitního senzoru. Upraveno podle [20]

Přiblížením prstu nebo případně jiného libovolného vodivého či nevodivého předmětu dojde ke změně kapacity C mezi elektrodou umístěnou na nevodivé desce a zemí, která je v klidovém případě tvořena pouze parazitní kapacitou samotné nosné desky C_p .

2.5.4 Inter-digitální kapacitní snímač

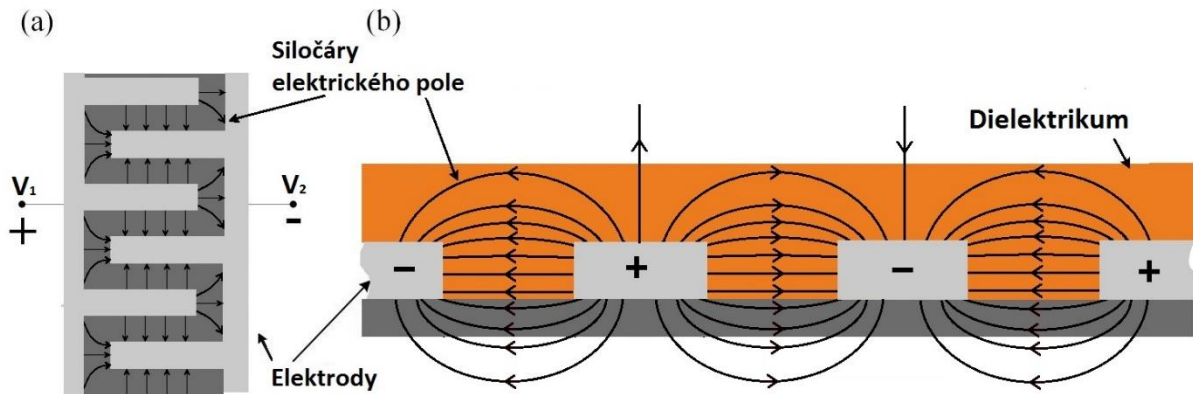
Vzorem pro inter-digitální kapacitní snímač je elektronická struktura nazývaná inter-digitálním kondenzátorem (IDC). Jak je znázorněno na Obrázek 6, IDC je tvořen vodivými elektrodami umístěnými v jediné vrstvě na povrchu základní podložky.



Obrázek 6: Inter-digitální kondenzátor (IDC) ve 3D. Upraveno podle [21]

Teoretická část

Každá elektroda se skládá z N prstů. Každý prst má šířku W . Šířka mezery mezi dvěma prsty G má být stejná jako šířka prstu W . Jednotková buňka je definována jako vzdálenost mezi osami přilehlých prstů patřících k téže elektrodě. Elektrické pole generované použitím různých potenciálů na elektrodách V_1 a V_2 se pohybuje z jedné elektrody na druhou, proniká do dielektrické fólie a také do substrátu pod elektrodami jak je zobrazeno na Obrázku 7 b).



Obrázek 7: Rozložení elektrického pole v IDC. a) horní pohled na inter-digitální elektrody, b) pohled v průřezu

Kapacita měřená mezi elektrodami závisí na dielektrických konstantách substrátu a dielektrické vrstvy aplikované na povrch senzoru proto je nutné znát vlastnosti těchto materiálů (permitivitu, vodivost). Dalším parametrem ovlivňujícím celkovou kapacitu je kapacita mezi elektrodami, která závisí na šířce elektrody W , na tloušťce elektrody t a vzdálenosti mezi sousedními elektrodami G . Když je dielektrická folie vyrobena z izotropního materiálu, kapacitu jednotkové buňky lze vypočítat podle rovnice 1[21]:

$$C_{uc} = \varepsilon_0(\varepsilon_r + \varepsilon_k) \frac{K(\sqrt{1 - (\frac{W}{G})^2})}{K(\frac{W}{G})} + 2\varepsilon_0\varepsilon_k \frac{t}{W} \quad (3)$$

Kde ε_0 je dielektrická konstanta volného prostředí. ε_r a ε_k jsou dielektrické konstanty substrátu a dielektrické folie. $K(\cdot)$ je úplný eliptický integrál první řady. Plným využitím symetrie a zanedbáváním kapacit hran, se vypočítá celková kapacita IDC podle následujícího vztahu:

$$C_{celkova} = C_{cu}(N - 1)L \quad (4)$$

kde N je počet prstu po celé délce vodivých elektrod a L délka prstu.[21] [22]

Nejčastěji je inter-digitální kapacitní snímač používán jako kapacitní snímač hladiny, který pracuje na principu vyhodnocení změny permitivity prostředí. Kapalina ovlivní dielektrické vlastnosti folie na úseku, který je ponořen, a tím i velikost celkové kapacity. Kapacitní snímače hladiny jsou široce používané ve výrobních procesech pro detekce hladiny kapalin v zásobnících, kontrolu výšky hladiny při plnění obalů, detekce průtoku a přítomnosti

Teoretická část

granulovaných, sypkých, práškovitých a pastovitých látek v obalech, plastovém a skleněném potrubí a v dávkovacích zařízeních. [20] Proto je velmi důležité vyrábět citlivé a současně flexibilní snímače.

Citlivost senzoru K je poměr změny vstupní veličiny x a odpovídající změny snímané veličiny y (vzorec (5)). Citlivost je definovaná sklonem charakteristické přímky a v případě ideálního tvaru charakteristické přímky je rovna konstantě:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (5)$$

Dále bude v praktické části popsána výroba inter-digitálního kapacitního snímače hladiny pomocí inkjet tisku, navrhnuté a charakterizované motivy s různými geometrickými parametry.

3 Praktická část

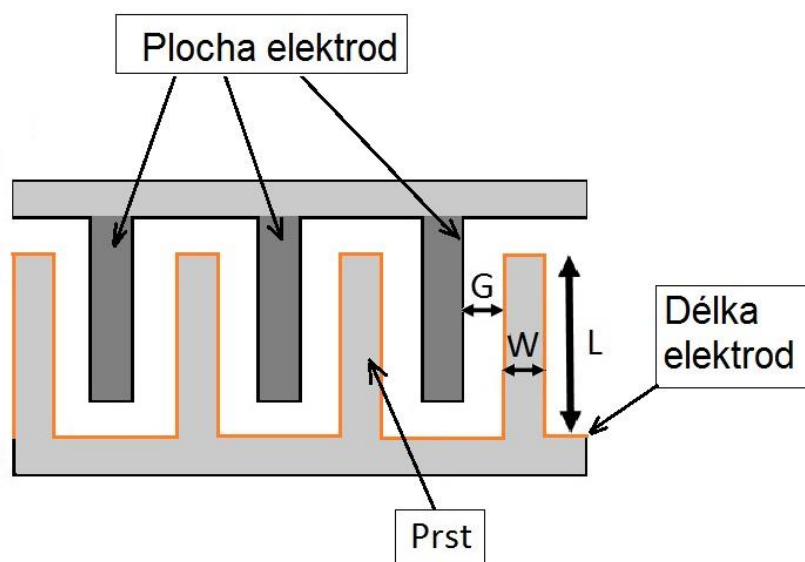
3.1 Úvod

Cílem praktické části je vytvoření technologického postupu přípravy IDC senzorů využitelných ve výuce. Vytvoření snímače hladiny bude probíhat pomocí systému pro materiálový tisk Fujifilm IMATIX DMP 2831 dostupné na katedře mikroelektroniky FEL ČVUT. Záměrem je vytvoření dostatečného množství vzorků s různými geometrickými parametry a porovnání jejich vlastností. Během zpracování praktické části byl proveden výběr vhodného motivu tiskové vrstvy, výběr vhodné krycí bariérové vrstvy a vyhodnocení naměřených parametrů snímačů. Dále byly zhodnoceny dosažené výsledky, provedeno jejich srovnání a navrhnut další postup.

3.2 Výroba přípravku

3.2.1 Návrh motivu

Jak již bylo popsáno v kapitole 2.4.3, na celkovou kapacitu inter-digitálního snímače hladiny mají vliv takové geometrické parametry jako počet prstů N , délka prstu L , velikost prstu W a šířka mezer G (Obrázek 8). Všechny vodivé prsty musejí mít shodnou šířku a tloušťku, také mezera by měla být ve všech místech shodná.[23] Elektrody nemají být nikde zkratované.

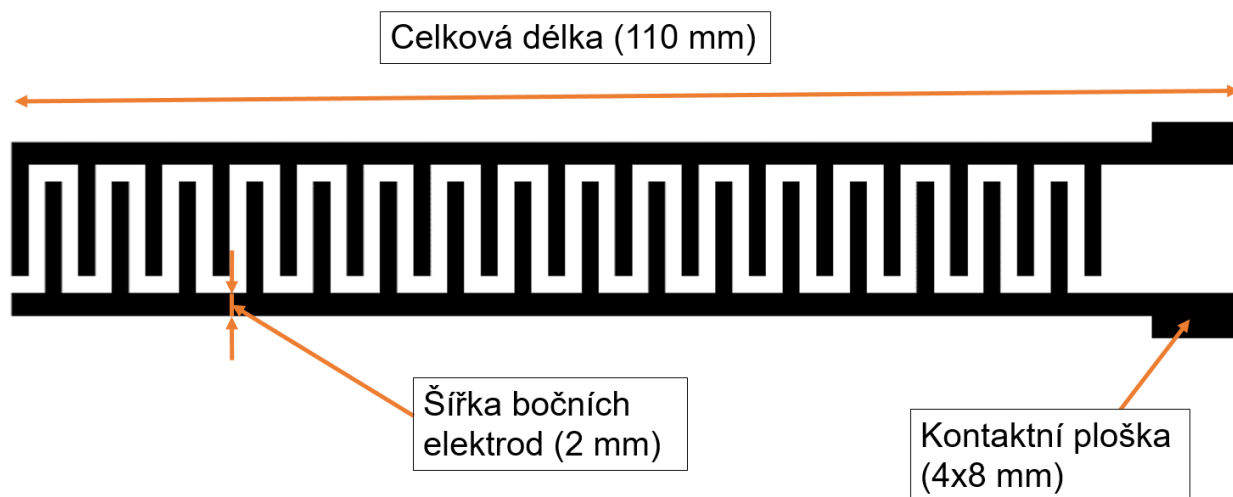


Obrázek 8: Rozměry layoutu inter-digitálního kapacitního senzoru

Snímač, který má takový tvar, je určen pro snímání hladiny elektricky vodivých sypkých hmot a tekutin. Je tvořen jen dvěma elektrodami umístěnými v jedné vrstvě na povrchu substrátu.

Praktická část

Celkem bylo navrženo 12 variant motivů snímače. Návrh motivů byl realizován v programu AutoCAD a předpřipraven pro tisk ve formátu BMP. Příklad návrhu layoutu senzoru výšky hladiny je uveden na Obrázku 9. Úplný přehled natištěných layoutu jednotlivých typu snímačů je uveden příloze 2.



Obrázek 9: Příklad navrženého v AutoCAD layoutu inter-digitálního kapacitního senzoru

Rozměry jednotlivých variant snímačů jsou uvedeny v Tab. 3. U všech typů inter-digitálních kondenzátorů byla zvolena stejná šířka bočních elektrod (2 mm), rozměry kontaktních plošek (4x8 mm) a celková délka (110 mm).

Vzorek	Šířka prstu W (mm)	Délka prstu L (mm)	Počet prstu N (-)	Plocha elektrod (mm ²)	Délka elektrod
1	0,5	5	100	125	600
2	1	5	50	125	350
3	1,5	5	33	123,75	264
4	2	5	25	125	225
5	0,5	10	100	250	1100
6	1	10	50	250	600
7	1,5	10	33	247,5	429
8	2	10	25	250	350
9	0,5	20	100	500	2100
10	1	20	50	500	1100
11	1,5	20	33	495	759
12	2	20	25	500	600

Tabulka 3: Rozměry jednotlivých variant snímačů

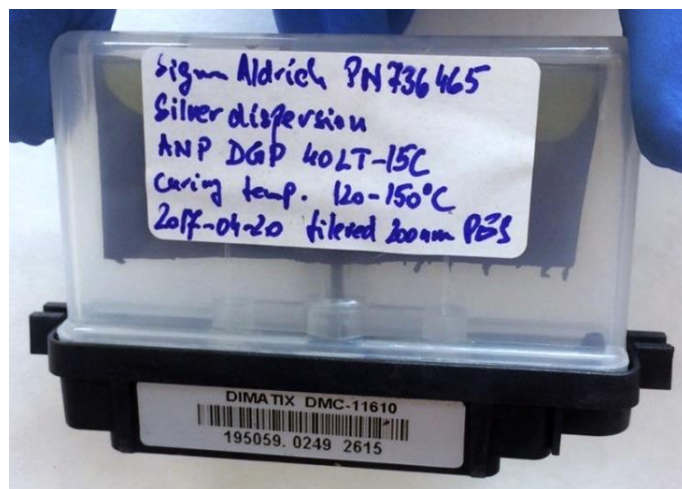
Praktická část

V dalších kapitolách bude zjištěná závislost kapacity a senzitivity na geometrických rozměrech jednotlivých layoutů.

3.2.2 Materiály použité pro tisk

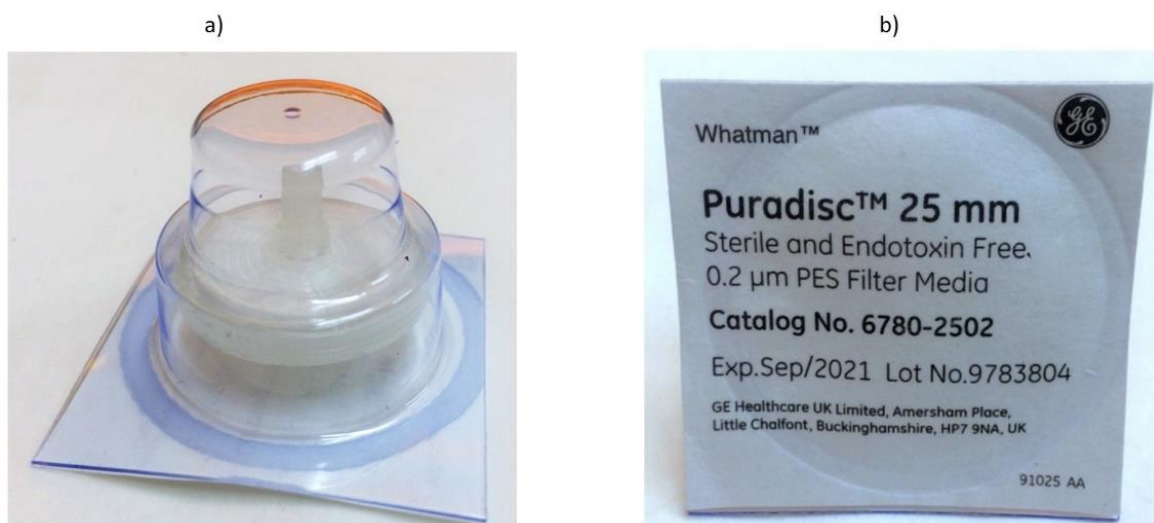
Stříbrný inkoust

Pro naše účely byl použit stříbrný nanočásticový inkoust od společnosti Sigma-Aldrich výrobní číslo PN736465 o obsahu 30–35 hm% stříbra v monomethyleterutriethylglykolu, velikosti částic mezi 70nm a 115 nm a odporu 11 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$. Teplota spékání (sintrování či slinutí) je 120 - 150°C [24] (tabulka vlastností je v příloze E).



Obrázek 10: Cartrige použitý pro tisk stříbrné vodivé vrstvy

Inkoust byl filtrován filtrem od společnosti PURADISC™ velikost pórů 0,2 μm viz Obrázek 11.



Obrázek 11: Filtr PURADISC 25mm a) pohled z boku; b) pohled zdola

Substrát

Praktická část

Vzorky byly realizovány na dvou substrátech: PET folii a fotopapíru.

Pro výrobu byla použita PET folie od výrobce Novacentrix, která má rozměr 215,9 × 279,4 mm a tloušťku 150 µm. Balení obsahuje 20 kusů folii proložených tenkým papírem. Materiál je již s povrchovou úpravou, proto nevyžaduje dodatečné čištění. PET folii jsme zvolili pro vhodné teplotně odolné vlastností, flexibilitu a nerozpustnost ve vodě.

Druhým použitým substrátem je fotopapír formátu A4, 260 g/m² od výrobce Print IT, lesklý o tloušťce 300 µm. Tento fotopapír má vhodné vlastnosti i bez dodatečné povrchové úpravy. Natištěný inkoust se na fotopapír nerozlévá a při spékání Ag vrstvy papír nemění svou barvu, nedeformuje. Na rozdíl od PET folie je však méně flexibilní a není transparentní.

V Tabulce 4 jsou porovnání vlastností PET folie a fotopapíru.

Material	Tloušťka	Flexibilní	Porézní	Transparentní	Vodivý	Dodatečně čištěno	Výrobce	Typ
Fotopapír	300 µm	A	A	N	N	N	Print IT	A4, 260 g/m ²
PET	150 µm	A	N	A	N	N	Novacentrix	Novele IJ- 220

Tabulka 4: Srovnávací tabulka vlastností substrátů Převzato z [12]

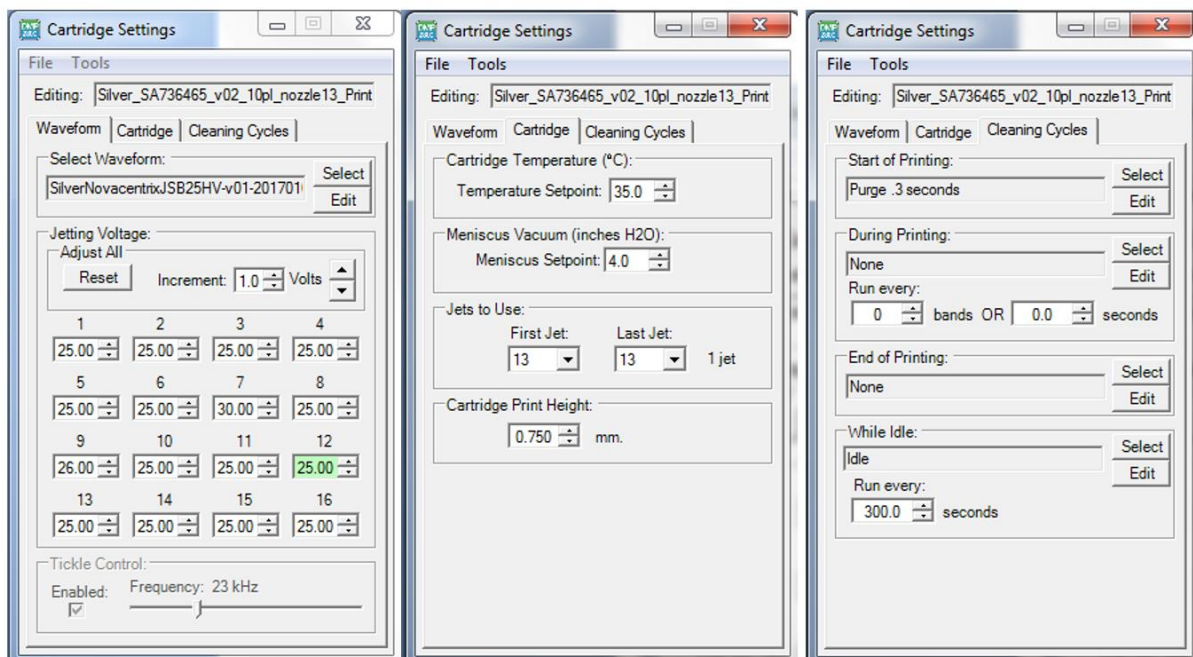
3.2.3 Příprava tiskárny

Po přípravě cartridge se stříbrným inkoustem zapneme tiskárnu. Provedeme kalibraci všech pojezdů a vložíme cartridge a substrát do tiskárny. Optimalizace tiskové metody a podmínek pro tisk byla provedena již v [11] a [12], v této práci byly tyto poznatky dále využity.

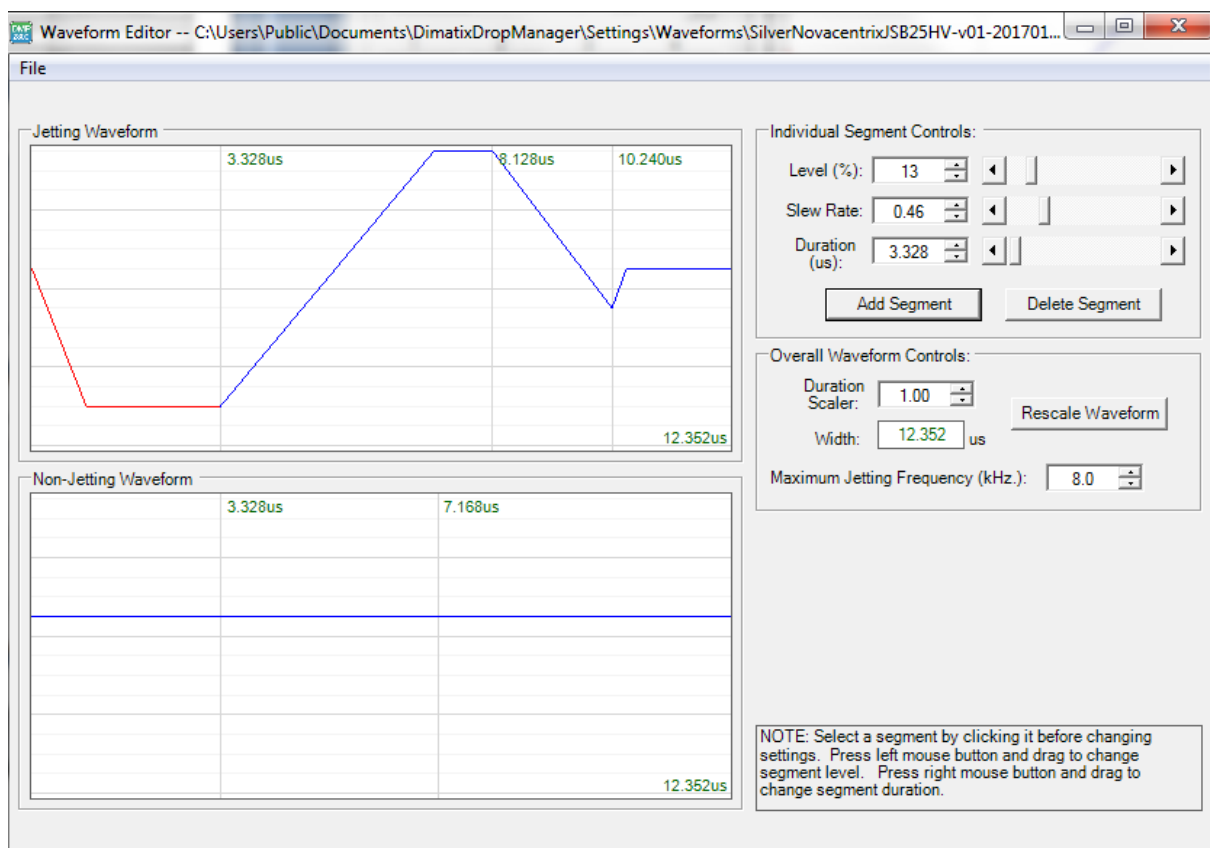
Pro výrobu všech inter-digitálního kondenzátor a s přihlédnutím na úsporu času a materiálů byl tisk proveden vždy ve dvou vrstvách. Nejdřív se tiskne první vrstva a pak, po očištění tryskové hlavy, druhá. Mezi tím substrát s tiskárny nevyjímáme, abychom zabránili chybě při sesazení. Dále jsou uvedeny nastavení tiskárny pro tisk.

K tisku elektrod pomocí stříbrného inkoustu použijeme následující nastavení: teplota cartridge s inkoustem 35 °C, teplota substrátu 45 °C, rozlišení tisku 1016 dpi. Po vložení inkoustu je vhodné provést čištění trysek a přesvědčit se, zda kapky vylétávají z trysek rovně, požadovanou rychlostí a zda mají správný tvar. Nastavení cartridge bylo pro všechny motivy tištěných struktur shodné a je znázorněno na Obrázek 12. [12]

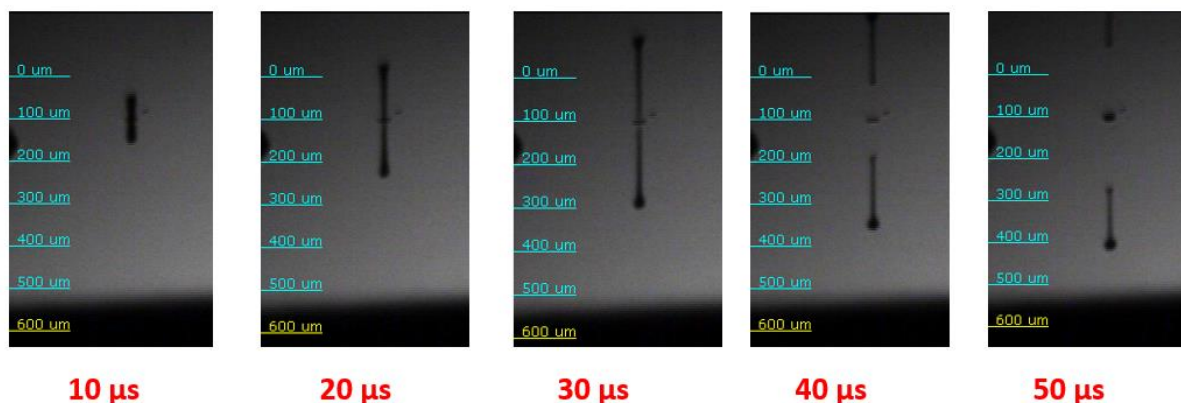
Praktická část



Obrázek 12: Podrobné nastavení inkoustu: a) Velikost napětí na jednotlivých tryskách; b) Teplota, Počet použitých trysek a výška cartridge, ve které bude tisknout; c) Typ a četnost čištění cartridge



Obrázek 13: Nastavení napěťového průběhu pro aktivaci trysek



Obrázek 14: Sledování letu kapky inkoustu

Po natištění obou vrstev je nutné provést spékání v sušárně na 120 °C po dobu dvou hodin. Poté může být na takto vytvořený kondenzátor kontaktován a může být nanášena krycí vrstva.

3.2.4 Kontaktování

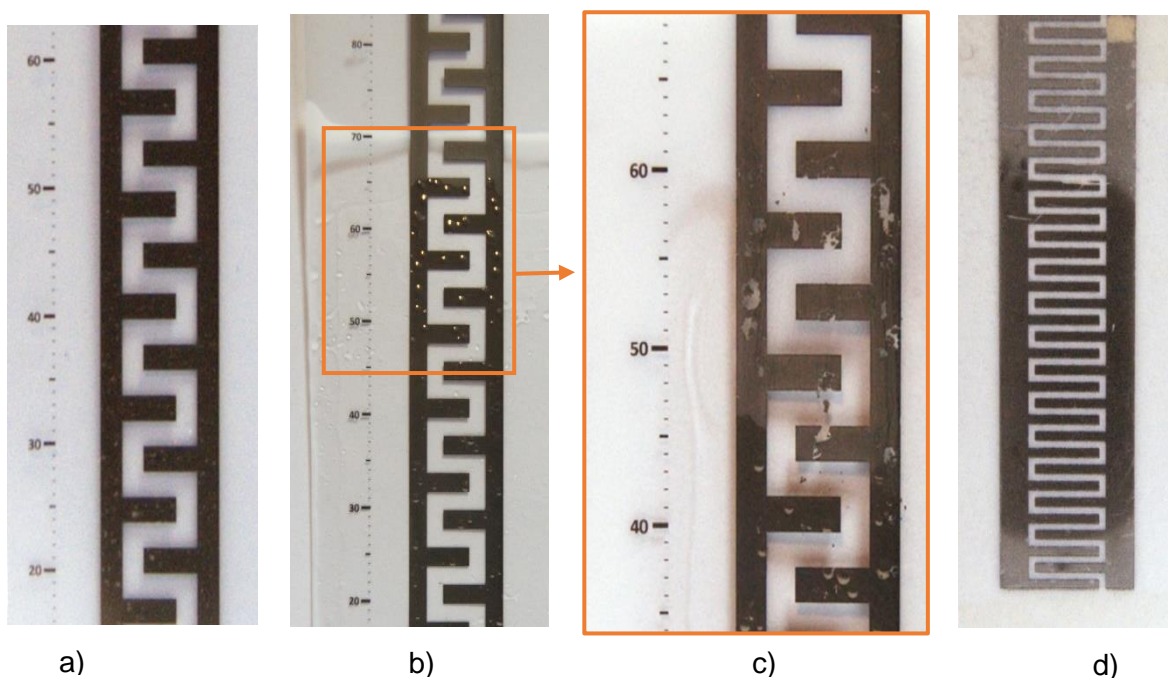
Pro vytvoření kontaktu, kterými bude struktura spojena s měřicím přístrojem, byly použity dvě měděná vlákna a stříbrná elektricky vodivá pasta 735825-Silver od výrobce Sigma-Aldrich [25]. Parametry elektricky vodivé pasty najdete v Příloze E. Po nanesení pasty na kontaktní plošky a napájení drátku (obrázek 15) vzorek necháme vytvarovat v sušárně **Memmert UN30** na dobu 120-150 °C na dobu 30-60 min nebo za pokojové teploty na několik dnů.



Obrázek 15: Elektricky vodivá pasta a nakontaktovaný vzorek

3.2.5 Vytvoření krycí vrstvy

Výběr krycí vrstvy s vhodnými vlastnostmi je velmi důležitý. Krycí vrstva má několik funkcí. Zaprvé má zabránit mechanickému poškození, degradaci a oxidaci elektrod a uchovat stejné vlastnosti kondenzátoru po dlouhou dobu. Například na obrázku 16 a), b), c) je ukázáno, že po namočení vzorku bez krycí vrstvy ve vodě se stříbrné elektrody lehce poškodí. Na obrázku 16 d) je vidět, že k degradaci elektrod dochází i při pouhém dotyku prstem.



Obrázek 16: a) senzor před namočením ve vodě; b) senzor po ponoření ve vodě; c) senzor po uplynutí 10 minut; d) degradace v důsledku doteku.

Za druhé, krycí vrstva vystupuje jako dielektrikum, aby zabránila zkratování elektrod ve vodivém prostředí. Vlivem vlhkosti se mění elektrické parametry kondenzátoru, a proto jsou parametry vzorku velmi nestabilní. Důležité je aby krycí vrstva byla voděodolná. Proniknutí vody do pórů krycího materiálu vede ke změně kapacity beze změny hladiny vody. Kromě toho krycí vrstva má být dostatečně tenká, aby se zachovala flexibilita a citlivost senzoru. Z obrázku 17 v kapitole 2.5.4 teoretické části této práce je jasné, že siločáry elektrického pole jsou umístěné blízko povrchu substrátu, nanesení tlusté krycí vrstvy vede k snížení citlivosti senzoru.

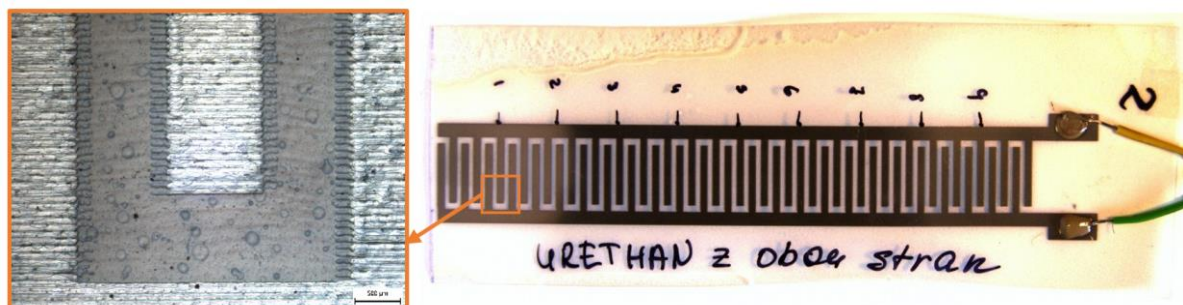
Při výběru bylo důležité porovnat několik druhů materiálu a ohodnotit jejich vhodnost jako bariérové krycí vrstvy. Seznam materiálů použitých pro zakrytí senzoru a jejich základní vlastnosti jsou uvedeny v Tabulka 6.

Krycí vrstva	Flexibilita	Ochrana vůči vodě	Časová stabilita í	Citlivost
Urethan 71	Vysoká	Ne	Ne	Vysoká
Plastik	Vysoká	Ne	Ne	Vysoká
Laminovací folie 80 μm	Nízká	Ano	Ano	Nízká
Laminovací folie 25 μm	Vysoká	Ano	Ano	Vysoká

Tabulka 3: Přehled vlastností krycích vrstev

Urethan 71

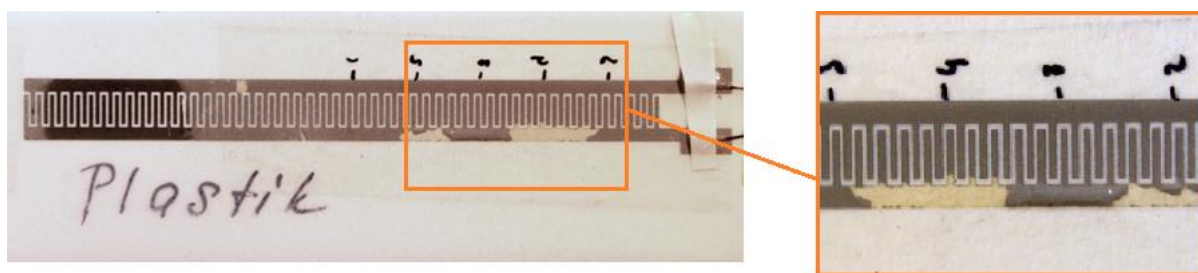
Vrstva Uretanu 71 byla nanesena metodou rozprašování ze vzdálenosti 30 cm a vysušená v sušárně na 120 °C po dobu 10 minut. Během měření vzorek vykazoval velkou časovou nestabilitu. Na Obrázku 17 je zobrazena krycí vrstva zvětšená 2x. Z obrázku je patrné, že změna elektrických vlastností je způsobena pronikáním vody vrstvou uretanu. Materiál není dokonale voděodolný, a proto je nevhodný jako krycí bariérová vrstva pro dané účely.



Obrázek 17: Vzorek pokrytý vrstvou uretanu po namočení ve vodě

Plastik

Postupně byly naneseny 3 vrstvy plastiku. Každá vrstva byla nanesena metodou rozprašování ze vzdálenosti 30 cm a vysušena za pokojové teploty během 40 minut. Během měření vzorek vykazoval velkou časovou nestabilitu. Po vytažení z vody z vody docházelo k odloupujání plastiku spolu s částí stříbrné elektrody. Materiál je tedy pro daný účel rovněž nevhodný.



Obrázek 18: Vzorek zakrytý vrstvou plastiku

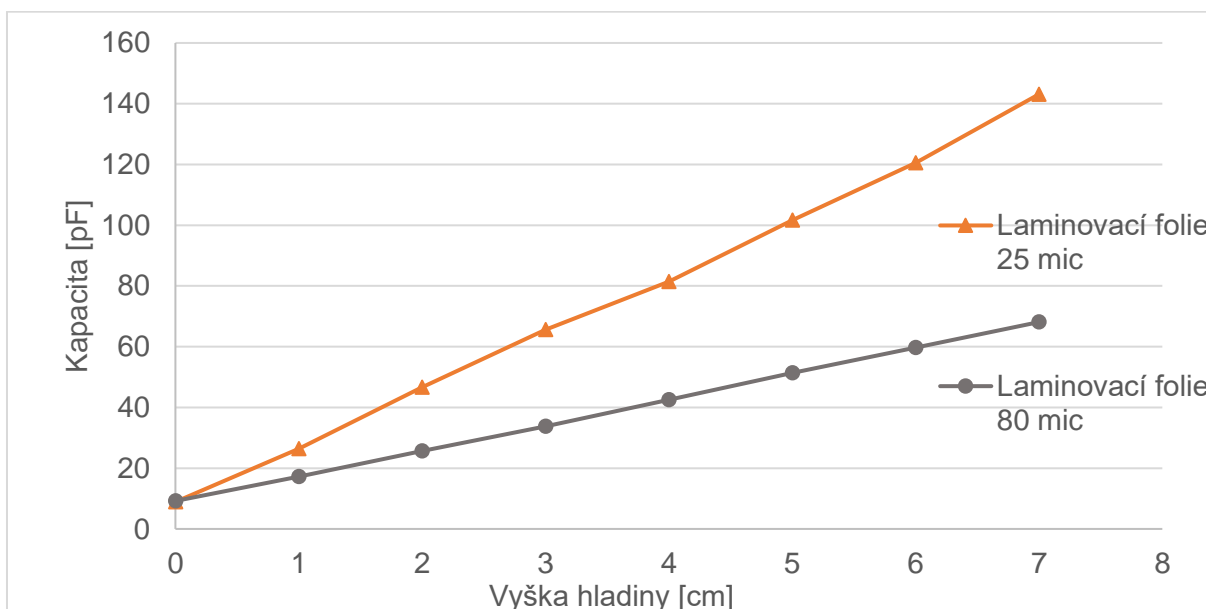
Laminovací folie

Byly vyzkoušeny dvě laminovací folie. Laminovací folie s tloušťkou 80 μm je lehce aplikovatelná pomocí laminovacího stroje. Je voděodolná, čímž zajišťuje dobrou stabilitu měření. Mezi nevýhody patří snížení flexibility senzoru a také snížení citlivosti. Vrstva je moc silná na průnik elektromagnetického pole. Pro zabránění snížení flexibility a citlivosti byla použita folie Polynex s tloušťkou 25 μm . Pro pórování citlivosti byl vybrán vzorek s parametry:

Šírka prstu (mm)	Délka prstu" (mm)	Počet prstu (-)	Plocha elektrod (mm ²)	Délka elektrod (mm)
1	5	50	250	350

Tabulka 4: Geometrické rozměry vzorku použitého pro zkoušku laminovacích folií

Změnu citlivosti je vidět na Grafu 1.

Graf 1: Závislost kapacity senzorů ($L=5\text{ mm}$, $W=1\text{ mm}$) na výšce ponoření pro různé krycí vrstvy.

Folie Polynex s tloušťkou 25 μm je velmi tenká a vyžaduje určitou manuální zručnost. Dále z důvodu nízké laminovací teploty není vhodná pro použití v kancelářském laminovacím stroji,

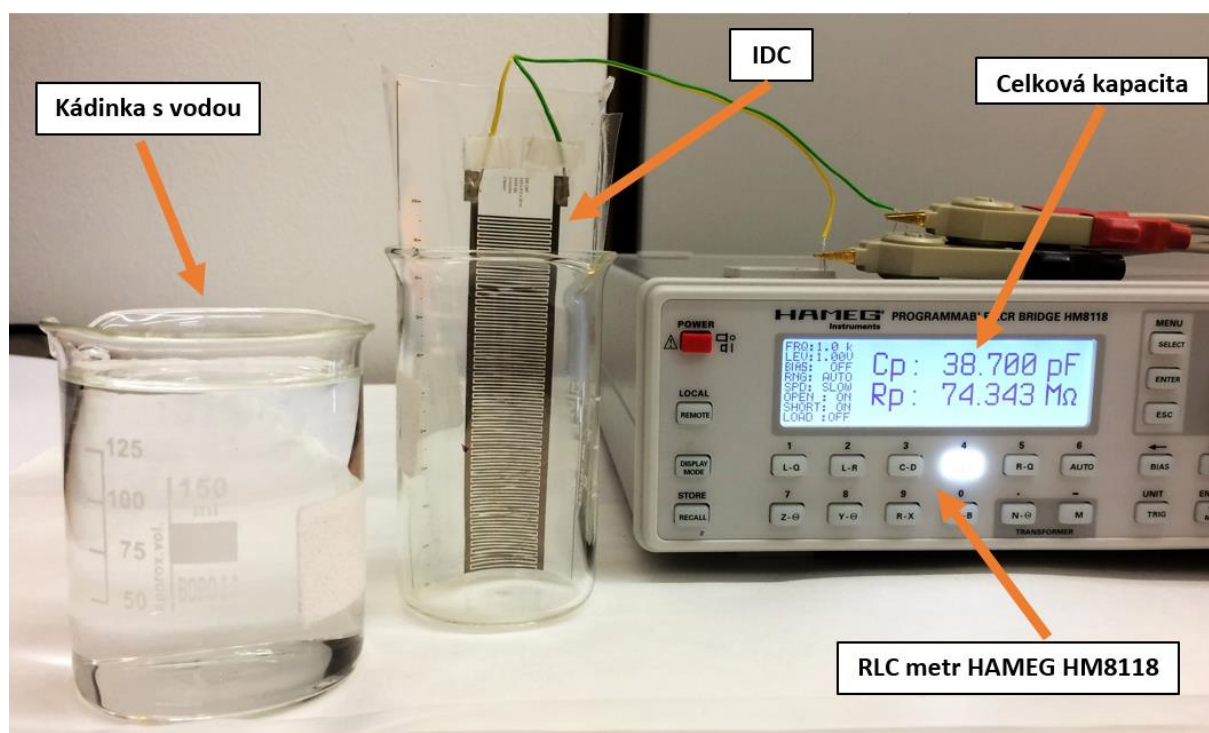
Praktická část

protože se kroutí a namotává na laminovací válec. Metodou pokus-omyl vyšlo jako nejvhodnější způsob použití této folie ve dvou výrobních krocích. Prvním krokem je laminování inter-digitálního kondenzátoru zabaleného do folie a následně vloženého mezi listy papíru. Díky této jednoduché úpravě (vlození mezi listy papíru) lze použít pro laminování i běžný kancelářský laminovací stroj. Ve druhém kroku jsme provedli opětovné laminování (jíž bez nutnosti použít papír jako ochranu před vysokou teplotou válce) čímž jsme zajistili rovnoměrné laminování po celé ploše.

3.3 Průběh a výsledky měření

3.3.1 Příprava měření

V experimentální části této práce byla zjišťována závislost kapacity vyrobených kondenzátoru na výšce hladiny vody při různých geometrických parametrech. Celkem bylo připraveno a charakterizováno 12 motivu viz Tabulka 3. Kapitola 3.2.1. Motivy byly vytištěny na PET folii a na fotopapír. Pro měření kapacity byl použit RLC metr HAMEG HM8118 v R-C režimu a frekvence 1 kHz. Pracoviště připravené pro měření je ukázáno na Obrázku 19.

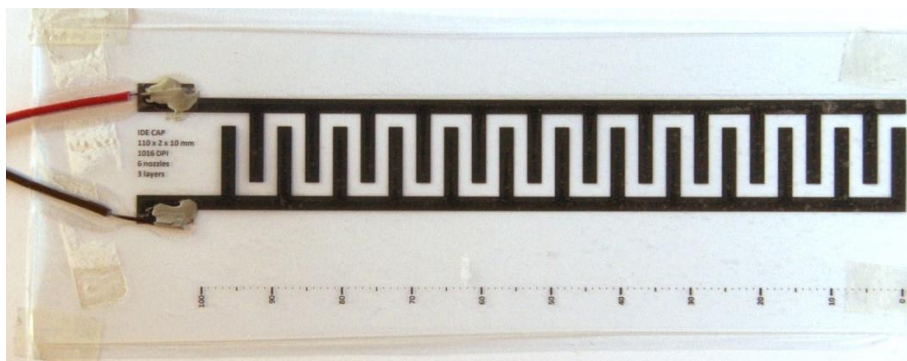


Obrázek 19: Uspořádání pracoviště pro měření celkové kapacity senzoru

Vzorek je ponořen do prázdné nádoby, do které byla postupně nalívána voda pokojové teploty (20-22 °C). Zápis naměřené kapacity se prováděl po zakrytí každých dalších 10 mm vzorku vodou. Celkovou tabulku naměřených hodnot a grafy závislosti kapacity na geometrických parametrech pro všechny vzorky obsahuje [příloha C](#). S ohledem na množství naměřených hodnot a velký počet vyrobených vzorků jsou dále popsány jen ukázkové příklady. Na základě zhodnocení výsledků byly doporučeny nejvhodnější senzory hladiny pro použití v laboratorním cvičení (související úloha je uvedena v [příloze A](#).)

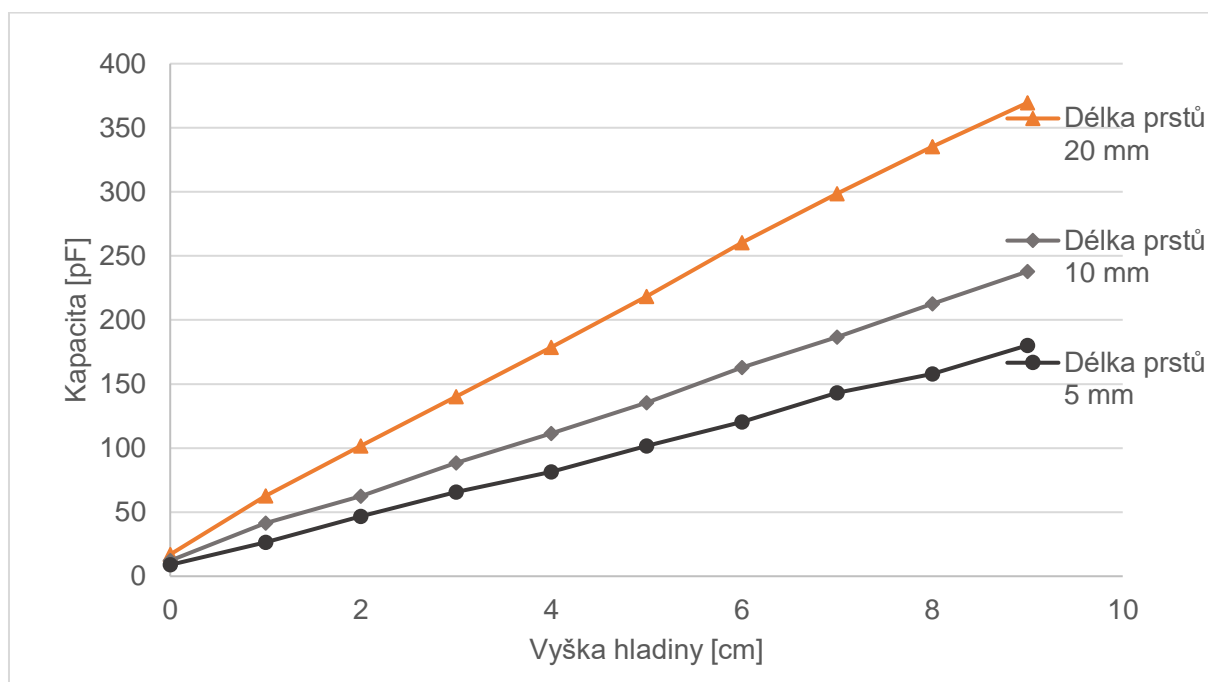
3.3.2 Charakterizace vzorku natisknutých na PET folii

Na obrázku 20 je znázorněn příklad připraveného kapacitního senzoru natištěného na PET folie a zakrytého laminovací folii 25 μm . Vzorek je průhledný a flexibilní.



Obrázek 20: Kapacitní senzor vyrobený na PET folii (šířka prstů 2 mm a délka prstů 10 mm)

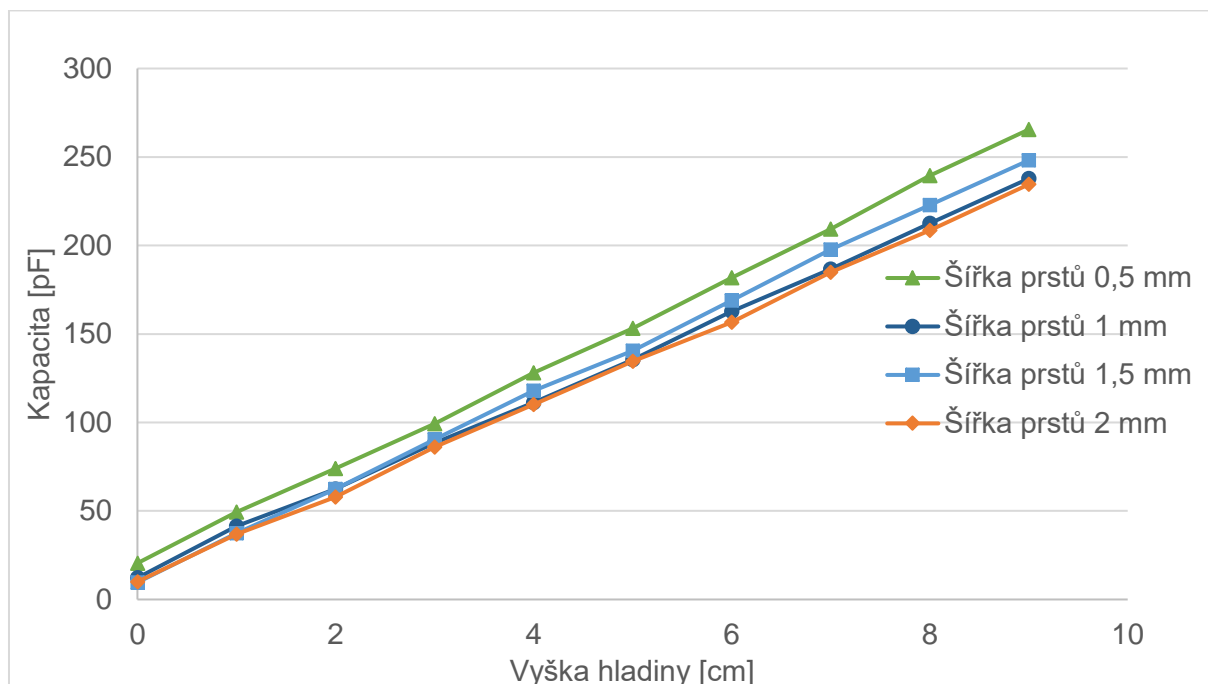
V průběhu měření byla zjištěna závislost celkové kapacity na délce prstů hladinových senzorů natištěných na PET folie. Graf 2 znázorňuje závislost celkové kapacity na výšce hladiny kapaliny při použití senzorů s různou délkou prstů (5 / 10 / 20 mm) a se stejnou šířkou prstů (1 mm). Nejvyšší kapacity bylo dosaženo u vzorku s délkou prstu 20 mm a tento výsledek zároveň odpovídá vztahu (4) uvedenému v kapitole č 2.5.4 teoretické části.



Graf 2: Závislost celkové kapacity na výšce hladiny vody u vzorků senzorů s různou délkou prstů a vyrobených na PET folii

Praktická část

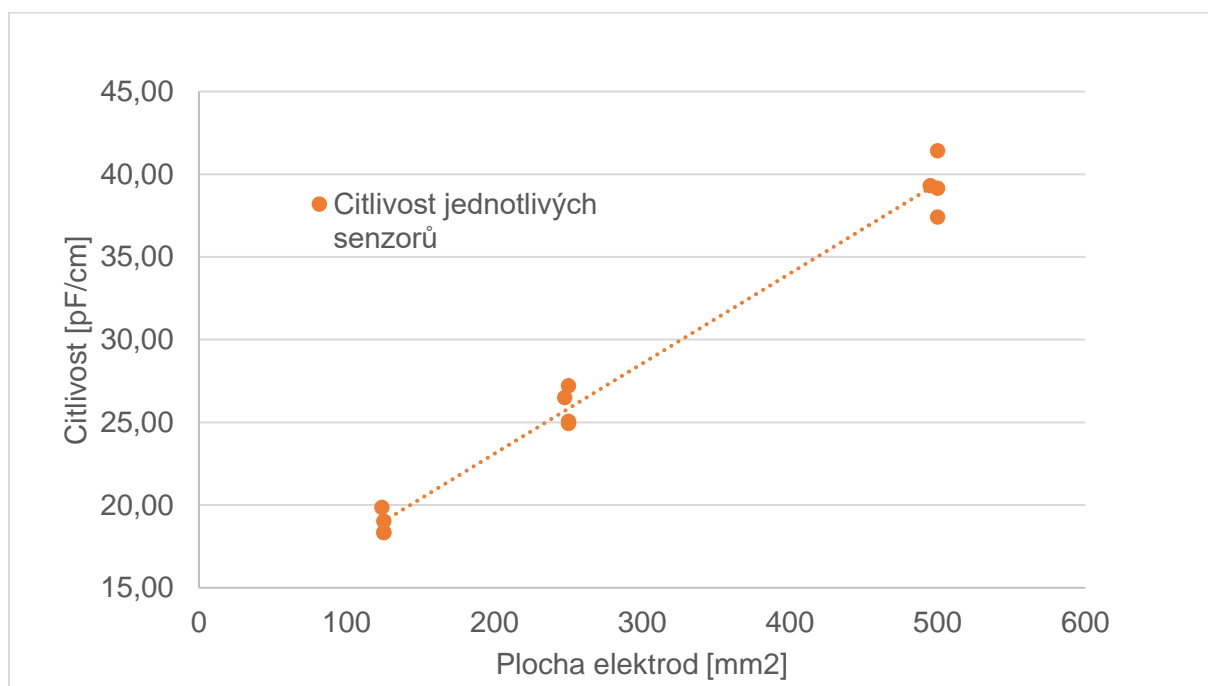
Na Grafu č 3 je znázorněna závislost kapacity na výšce hladiny vody u vzorku s konstantní délkou prstu (10 mm) a různou šířkou elektrod (0,5 / 1 / 1,5 / 2 mm).



Graf 3: : Závislost celkové kapacity na výšce hladině vody u vzorků senzorů s různou šířkou prstů a vyrobených na PET folii

Z Graf 3 je patrné, že změna kapacity se změnou šířky prstů je téměř zanedbatelná.

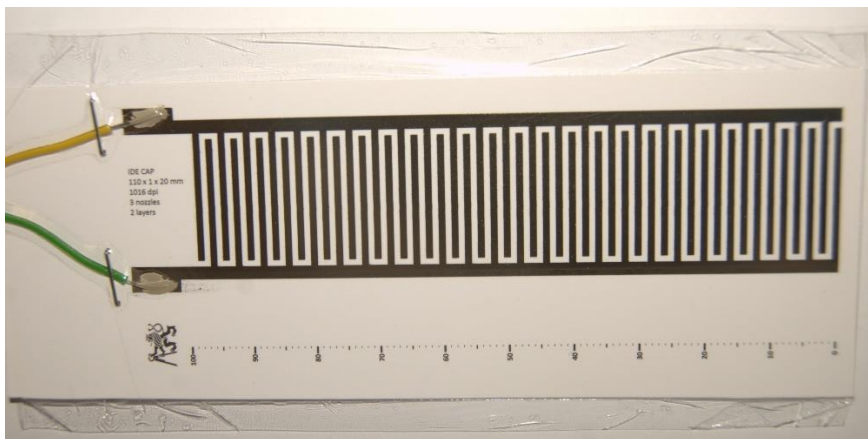
Z předchozího grafu a porovnání geometrických rozměru vyšla závislost citlivosti senzorů na ploše elektrod. Výsledek je zpracován do Graf 4.



Graf 4: Závislost citlivosti senzorů na ploše elektrod u vzorků senzorů vyrobených na PET folii

3.3.3 Charakterizace vzorků natisknutých na Fotopapír

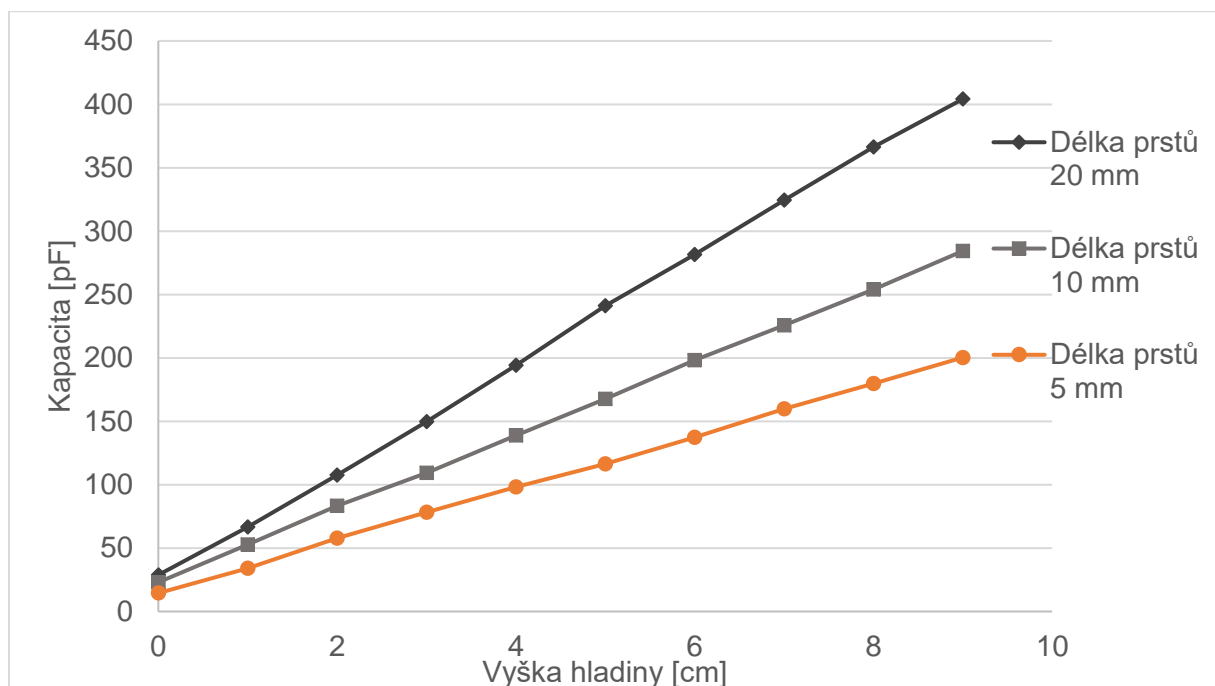
Na Obrázek 21 je znázorněn příklad senzoru vytisknutého na fotopapír. Výroba takového senzoru je jednodušší oproti výrobě foliového senzoru díky menší ohebnosti a tedy snadnější manipulaci. Senzor není průhledný a je méně flexibilní než foliový.



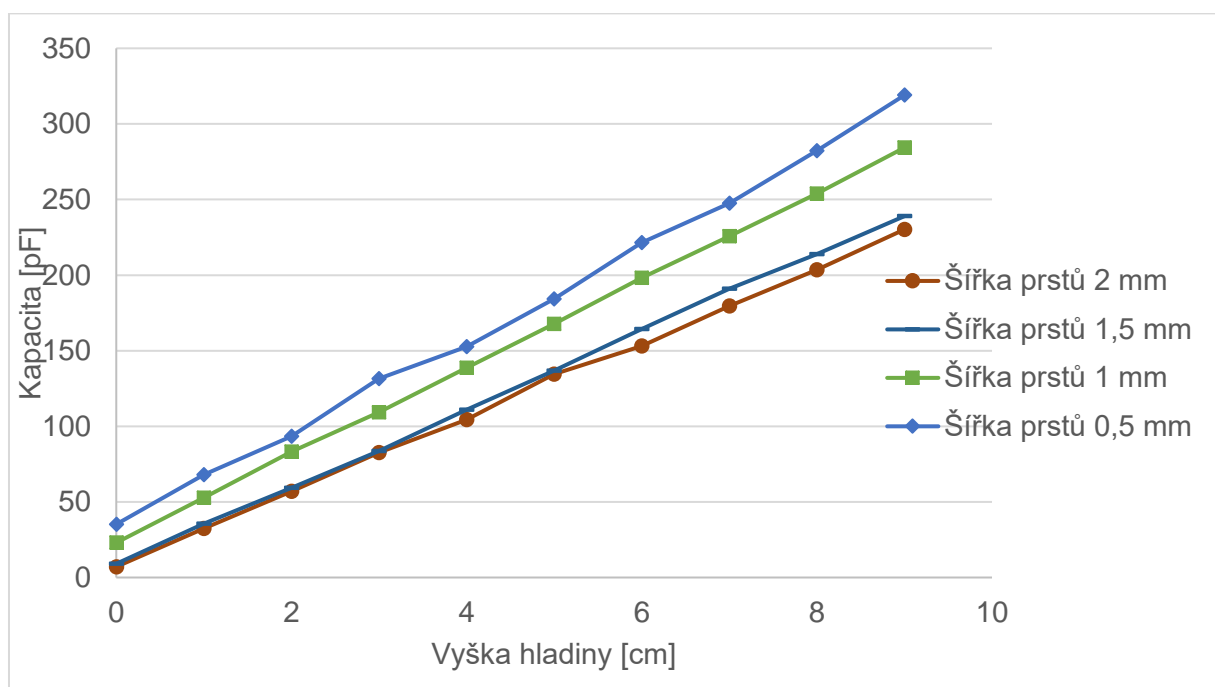
Obrázek 21: Kapacitní senzor vyraběný na fotopapíru ze (šířka prstů 1mm a délka prstů 20 mm)

Sada kapacitních senzorů vytisknutých na fotopapír vykazuje stejnou závislost celkové kapacity na geometrických parametrech jako senzory vytisknuté na PET folie. Graf 5 znázorňuje závislost celkové kapacity na výšce hladiny kapaliny při použití senzorů s různou délkou prstů (5 / 10 / 20 mm) a se stejnou šířkou prstů (1 mm). Na Grafu č 6 je znázorněna závislost kapacity na výšce hladiny vody u vzorku s konstantní délkou prstu (10 mm) a různou šířkou elektrod (0,5 / 1 / 1,5 / 2 mm). Graf 7 znázorňuje závislost citlivosti na ploše elektrod.

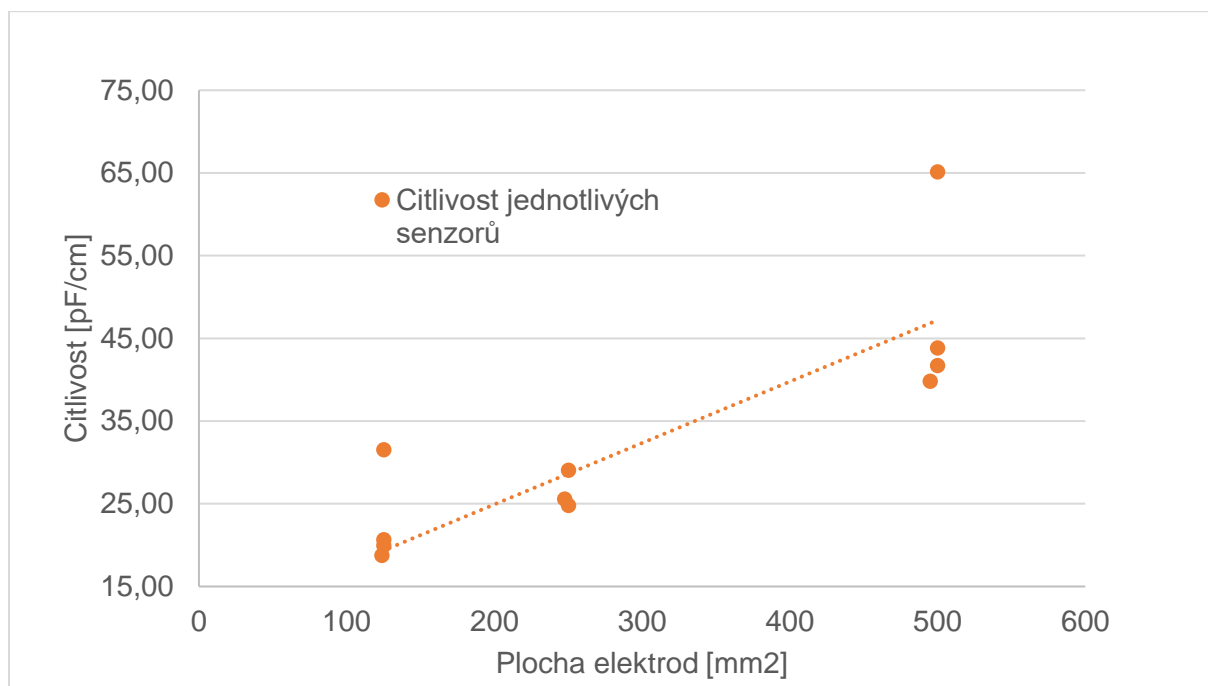
Praktická část



Graf 5: Závislost celkové kapacity na výšce hladině vody u vzorků senzorů s různou délkou prstů a vyrobených na fotopapíru



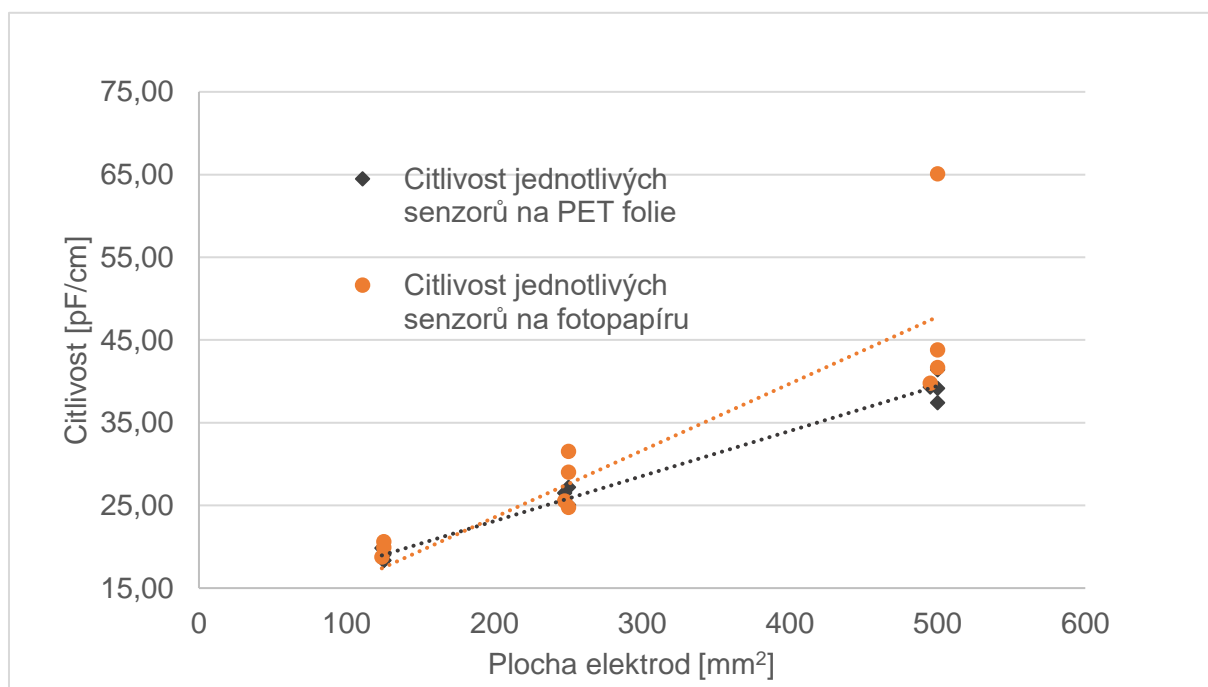
Graf 6: Závislost celkové kapacity na výšce hladině vody u vzorků senzorů s různou šířkou prstů a vyrobených na fotopapíru



Graf 7: Závislost citlivosti senzorů na ploše elektrod u vzorků senzorů vyrobených na fotopapíru

3.3.4 Porovnání charakteristik vzorku natisknutých na PET folii a na fotopapíru

Jak je vidět z Grafu 8 vzorky natištěné na fotopapíru mají vyšší citlivost než vzorky natištěné na PET folie (za podmínky že geometrické parametry použitých vzorků jsou stejné) Z toho můžeme odvodit logický závěr, že citlivost je ovlivněna materiálem substrátu (podle vzorce (3))



Graf 8: Porovnání citlivosti vzorků vytisknutých na různých substrátech

3.3.5 Shrnutí a závěry měření

Výroba inter-digitálního senzoru probíhá v několika krocích:

1. Tisk stříbrných elektrod na substrát pomocí materiálové tiskárny.
2. Kontaktování pomocí elektricky vodivé pasty
3. Laminování

Materiálový tisk jak na PET folie tak i na fotopapír je bezproblémový. Oba substráty mají dobré povrchové vlastnosti, jsou povrchové upraveny z výroby, a proto nevyžadují žádnou další úpravu před tiskem. Tisknout se dá i několika tryskami. Při tisku více tryskami může nastat situace, kdy některá z trysek není v optimálním stavu, ale tento faktor má poměrně nízký vliv na elektrické vlastnosti kapacitního senzoru.

Jak již bylo řečeno v kapitole 3.2.5, pro krycí vrstvu bylo vyzkoušeno několik materiálů, ale jen laminovací folie s tloušťkou 25 μm zachovává veškeré vlastnosti senzoru (citlivost, flexibilita, odolnost). Tloušťka této folie komplikuje laminování v běžném kancelářském laminovacím stroji u vzorku natisknutých na PET substrát, proto laminování provedeme ve dvou krocích. Prvním krokem je laminování inter-digitálního kondenzátoru zabaleného do folie a následně vloženého mezi listy papíru. Ve druhém kroku jsme provedli opětovné laminování čímž jsme zajistili rovnoměrné zatavení po celé ploše.

Celkově výroba kapacitních senzorů na fotopapíru je méně náročná a vyrobené senzory mají vyšší mechanickou odolnost.

Během měření byla změřená celková kapacita senzorů s různými geometrickými parametry. Bylo zjištěno, že vliv má velikost plochy elektrod. Kapacitní senzory se stejnou plochou elektrod mají přibližně stejnou citlivost. Nejcitlivější senzor má následující parametry: délka prstů $L=20$ mm, šířka prstů $W=0,5$ mm, plocha elektrod 500 mm², délka elektrod 2100 mm.

Na kapacitu má vliv i tloušťka krycí vrstvy. S růstem hodnoty dielektrické konstanty folii senzitivita výrazně klesá. Stejná závislost se projevuje i u substrátů. Naměřené hodnoty a závislosti odpovídají teoretickým vztahům. Průběhy jsou lineární.

Na základě technologického postupu a provedeného měření mohou být pro použití ve výuce doporučeny inter-digitální senzory hladiny vyrobeny na fotopapíru. Takové senzory mají lepší charakteristiky a dají se snadněji vyrobit. Pro lepší názornost doporučuji využít vzorky s délkou prstu 5 mm, 10 mm a 20 mm, a šířkou prstů 1 mm.

4 Závěr

Během řešení své bakalářské práce jsem se seznámila s principy činnosti a způsoby technologické realizace organických elektronických součástek. Zjistila jsem, jaké moderní technologie tisku se používají v současné době. Nastudovala jsem dostupnou literaturu zabývající se výrobou tištěných elektronických struktur. Technologii tisku, materiály používané pro přípravu organických elektronických součástek a principy činnosti kapacitních snímačů jsou popsány v teoretické části mé bakalářské práce.

Pro realizace v praktické části jsem vybrala planární kapacitní kondenzátor. Tuto součástku jsem dále používala jako senzor hladiny. Naučila jsem se obsluhovat materiálůvou tiskárna Fujifilm Dimatix DMP 2831, kterou jsem poté použila k realizaci sady navržených struktur senzorů hladiny na PET folie a na fotopapír. Celkem jsem vytvořila 50 vzorků s různými parametry (viz. příloha B).

V průběhu měření jsem ověřila závislost celkové kapacity na geometrických parametrech a taky na permitivitě substrátu. Citlivost vzorku závisí na velikosti plochy elektrod. Největší citlivost mají vzorky s délkou prstů 20 mm a plochou elektrod 500 mm². Závislost je lineární pro všechny vzorky. Výsledky všech provedených měření jsem zanesla do grafů a popsala v kapitole 3.3.

Na základě výsledků praktické části byla sepsaná laboratorní úloha pro použití ve výuce (viz. Příloha A).

5. Použitá literatura a zdroje

- [1] EHLICH, Jiří. Příprava organických elektrochemických tranzistorů pro biosenzoriku [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická, 2015 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/38985>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. Ústav fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí práce Ota Salyk. BOYES, W.: Instrumentation Reference Book. Elsevier, 2010.
- [2] LIAO, Caizhi a Feng YAN. Organic Semiconductors in Organic Thin-Film TransistorBased Chemical and Biological Sensors. Polymer Reviews. 2013-07-03, vol. 53, issue 3, s. 352-406. DOI: 10.1080/15583724.2013.808665.
- [3] „No Title“ [Online]. Dostupné z: <http://delbipromotions.co.za/what-is-screen-printing>
- [4] „No Title“ [Online]. Dostupné z: <http://plasticphotovoltaics.org/lc/lc-fabrication/lc-coating/lc-slotdie.html>
- [5] WENGLER, L., PETERS, K., SCHMITT, M. et al. J Coat Technol Res (2014) 11: 65. doi:10.1007/s11998-013-9483-5
- [6] „Gravure printing“ [Online]. Dostupné z: <https://www.iggesund.com/en/knowledge/knowledge-publications/the-reference-manual/printing-and-converting-performance/gravure-printing/>
- [7] GUO JAZ, L. Nanoimprinting lithography: Methods and material requirements. Department of Electrical Engineering and Computer Science. The University of Michigan. [cit. 2017-04-12].
- [8] *Organic Electronics Volume 8, Issue 4, Pages 293-464 (August 2007)* Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/15661199/8/4> [cit. 2017-04-15].
- [9] „No Title“ [Online]. Dostupné z: <http://www.dp3project.org/technologies/digital-printing/inkjet> [cit. 2017-04-27]
- [10] KLAUK, Hagen. Organic Electronics: Materials, Manufacturing and Applications. 2006. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- [11] ZÁVESKÝ, Marek, *Příprava a charakterizace tištěných elektronických struktur Preparation and characterisation of printed electronic structures*. 2016.
- [12] POVOLNÝ Vojtěch, *Příprava organických a tištěných elektronických součástek Preparation of organic and printed electronic devices*. 2017
- [13] WICHTERLE, Kamil, Povrchové/mezifázové napětí v hydrostatice a hydrodynamice. Praha: Procesní inženýrství, 1997. MAPRINT : manuál procesního inženýrství a technologie. ISBN 80-86059-24-3.

Použitá literatura a zdroje

- [14] EHLICH, Jiří. Optimalizace tiskových metod přípravy organických polovodivých vrstev [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/65040>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. Ústav fyzikální a spotřební chemie. Vedoucí práce Ota Salyk
- [15] WONG, William S.; SALLESO, Alberto. Flexible Electronics: Materials and Applications. 2009. Stanford University. Department of Materials Science & Engineering. [cit. 2017-05-12].
- [16] MELICHAR, Bohuslav. Výrobní technologie pro tištěnou a flexibilní elektroniku [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://theses.cz/id/35pxy5/>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Silvan Pretl.
- [17] A. S. Abu-Abed and R. G. Lindquist, "Capacitive interdigital sensor with inhomogeneous nematic liquid crystal film," Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 7, 75-87, 2008. DOI:10.2528/PIERB08022901 Dostupné z: <http://www.jpier.org/pierb/pier.php?paper=08022901>
- [18] DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky - 1. díl: základy, ideální a reálné prvky: rezistor, kondenzátor, cívka. Praha: BEN - technická literatura, 2005, s. 220-240. ISBN 80-7300-146-2.
- [19] „No Title“ [Online]. Dostupné z: <http://www.ajptech.cz/produkty/prumyslava-automatizace/baumer-senzory/snimace/kapacitni-snimace/>. [cit. 2017-04-24]
- [20] „No Title“ [online]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/pravidla-pro-konstrukci-kapacitnich-dotykovych-tlacitek-mtouch>
- [21] ZORIC, Nenad; IAVORSCHI, Anatoli; SIRETEANU, Mariana; VIZITEU, Georgian; CIOBANU, Romeo. "Design and Simulations of IDC Sensor Using COMSOL Multiphysics and Dielectric Spectroscopy of LTCC Materials", Buletinul AGIR nr. 3/2013, iulie-septembrie, pp. 63-69, 2013.
- [22] David Wang. FDC1004: Basics of Capacitive Sensing and Applications [online]. Application Report: SNOA927. Dallas, Texas, UAS: Texas Instruments; December 2014. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/snoa927/snoa927.pdf>
- [23] BOONKIRDRAM, Sarawoot a Worawat SA-NGIAMVIBOOL. A Novel Planar Interdigital Capacitor Level Sensor. □Przeglad Elektrotechniczny [online]. 2015, (1(8):93-97). DOI: 10.15199/48.2015.08.23. Dostupné z: <http://pe.org.pl/articles/2015/8/23.pdf> [cit. 2017-04-21]
- [24] "Sigma-Aldrich," 735825 ALDRICH. [Online]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/735825?lang=en®ion=CZ>

Použitá literatura a zdroje

- [25] "Sigma-Aldrich," 483095 ALDRICH. [Online]. Dostupné z:
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/429252?lang=en®ion=CZ>
- [26] SUGANUMA, K. Introduction to Printed Electronics, ISBN 978-1461496250, Springer 2014.
- [27] FRANKY, So. Organic Electronics: Materials, Processing, Devices and Applications. CRC Press, 2009. ISBN 978-1420072907.
- [28] BÍLÝ Ondřej, *Měření vodivosti organických vodivých sloučenin, Conductivity measurement of electroactive organic compounds* 2014

6. Přílohy

A Laboratorní úloha

Inter-digitální kapacitní senzor hladiny

Úvod

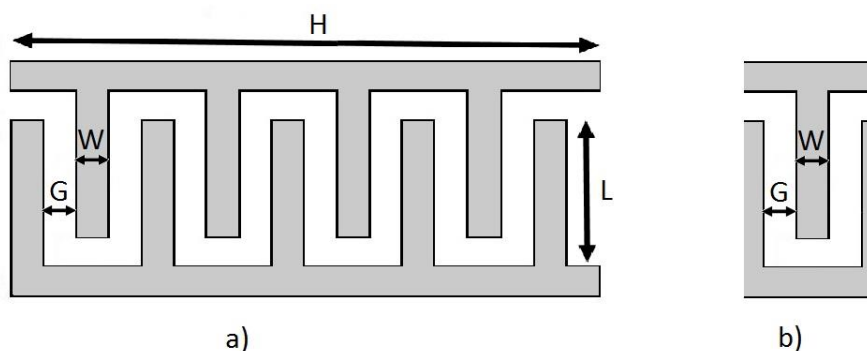
Úloha se zabývá měřením hladiny vody pomocí inter-digitálního kapacitního senzoru. Pro měření je využito principu změny permitivity prostředí v té části senzoru, která je ponořena do vody.

Cíl úlohy

Seznamte se s principy činnosti inter-digitálního kapacitního snímače hladiny. Zjistěte závislost celkové kapacity na geometrických parametrech senzorů a na materiálech, ze kterých je senzor vyroben.

Teoretický rozbor

Vzorem pro inter-digitální kapacitní senzor je elektronická struktura nazývaná inter-digitální kondenzátor (IDC). Jak je znázorněno na obrázku 1 a), IDC je tvořen vodivými elektrodami umístěnými v jediné vrstvě na povrchu základní podložky. Každá elektroda se skládá z N prstů. Každý prst má šířku W . Šířka mezery mezi dvěma prsty G má být stejná jako šířka prstu W . Jednotková buňka je definována jako vzdálenost mezi osami přilehlých prstů patřících k téže elektrodě (obrázek 1 b)).



Obrázek 1: a) rozložení inter-digitálního kapacitního senzoru; b) rozměry jednotlivé buňky

Kapacitu jednotkové buňky lze vypočítat podle rovnice 1.

$$C_{uc} = \varepsilon_0(\varepsilon_r + \varepsilon_k) \frac{K\left(\sqrt{1 - \left(\frac{W}{G}\right)^2}\right)}{K\left(\frac{W}{G}\right)} + 2\varepsilon_0\varepsilon_k \frac{t}{W} \quad (1)$$

Přílohy

C_{uc} (F).....	Kapacitu jednotkové buňky
W (m).....	Šířka prstů elektrody
G (m).....	Vzdálenost mezi sousedními prsty elektrod
ε_0 (F m ⁻¹).....	Dielektrická konstanta prostředí ($\varepsilon_{0_vzduch} = 1,00054$, $\varepsilon_{0_voda} = 80$, $\varepsilon_{0_vakuum} = 8,854$)
ε_r (F m ⁻¹).....	Dielektrická konstanta substrátu
ε_k (F m ⁻¹).....	Dielektrická konstanta krycí vrstvy
t (m).....	Tloušťka elektrody
$K(\cdot)$	Úplný eliptický integrál první řady

Plným využitím symetrie a zanedbáváním kapacit hran, se vypočítá celková kapacita IDC podle vztahu 2:

$$C_{celkova} = C_{cu}(N - 1)L \quad (2)$$

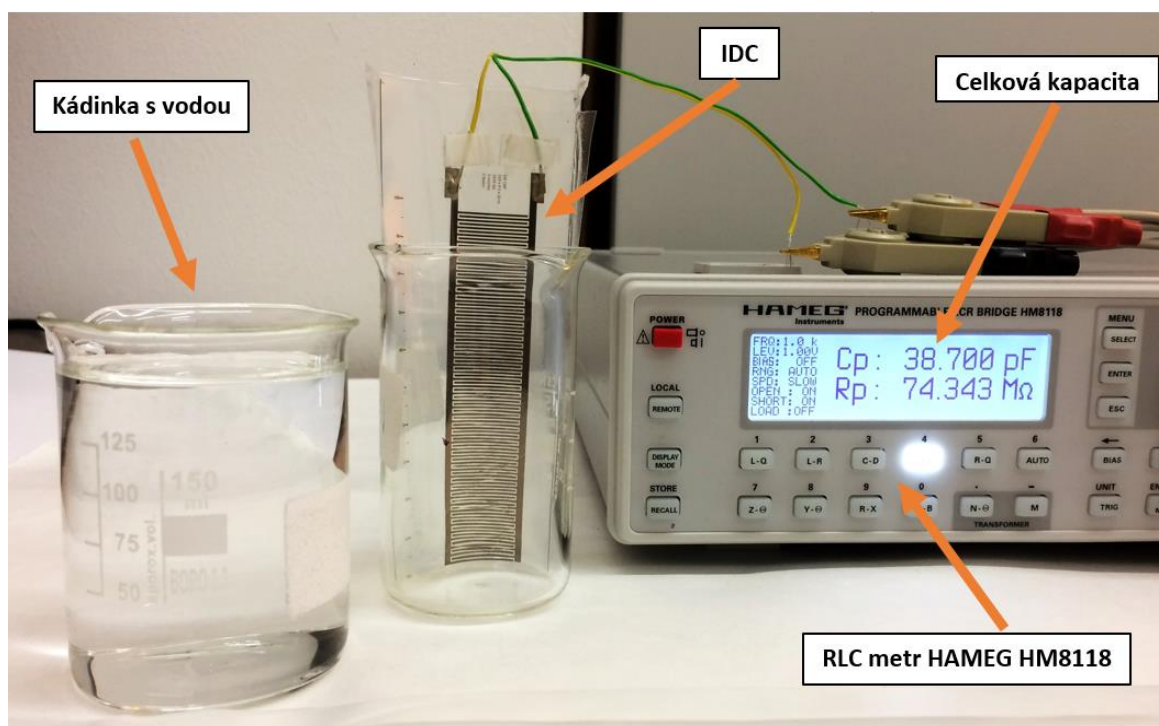
$C_{celkova}$ (F).....	Celková kapacita senzoru
C_{cu} (F).....	Kapacitu jednotkové buňky
N (kus).....	Počet prstů elektrody
L (kus).....	Deka prstů

Citlivost senzoru K je poměr změny vstupní veličiny x a odpovídající změny snímané veličiny y (vzorec (4)). Citlivost je definovaná sklonem charakteristické přímky a v případě ideálního tvaru charakteristické přímky je rovna konstantě:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (4)$$

Příprava pracoviště

Změna kapacity se dá vyhodnotit pomocí RLC metru v R-C režimu. Uspořádání pracoviště pro měření výšky hladiny je zobrazeno na obrázku 2.



Obrázek 2: Uspořádání pracoviště pro měření celkové kapacity senzoru

Vzorek, který chcete změřit, dejte do prázdné nádoby a připojte k RLC metru. Postupně lijte vodu. Po vzestupu hladiny vody o každé další 10 mm odečtěte hodnotu celkové kapacity (C_p) snímačů a zaznamenejte jí do tabulky.

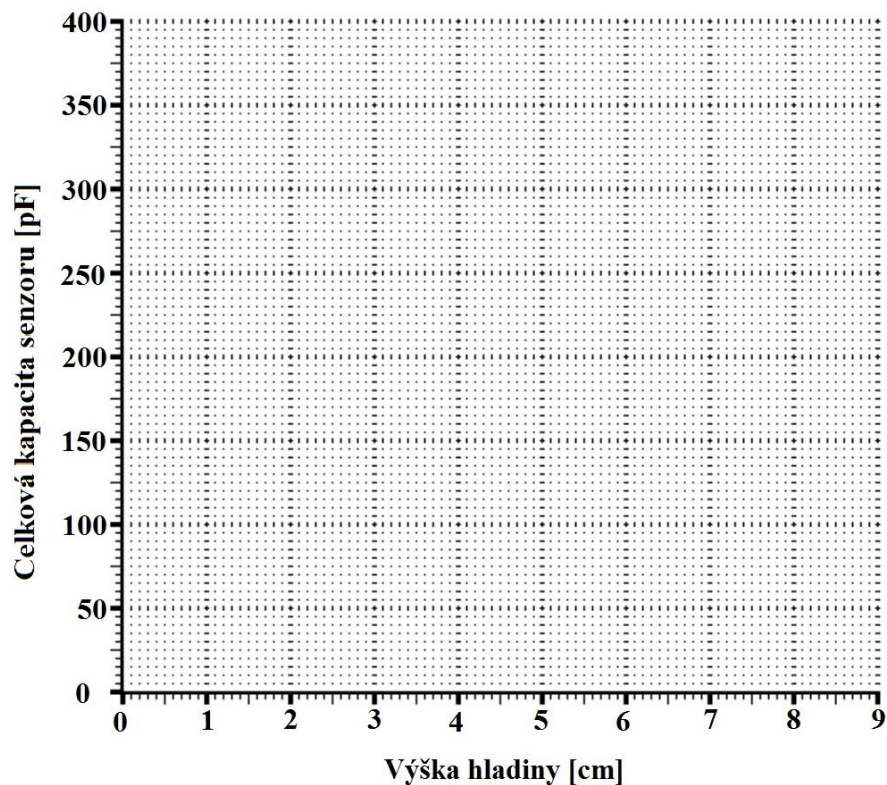
Úkol měření

- Změřte závislost kapacity inter-digitálního snímače na hladině vody. Pro měření použijte tři vzorky s různou délkou prstů (5 / 10 / 20 mm) a stejnou šířkou prstů (1 mm) vyrobených na fotopapír.

a. Změřené hodnoty запиšte do tabulky. Vypočítejte citlivost jednotlivých senzorů.

Výška hladiny [cm]	Kapacita snímače s délkou prstu 5 mm	Kapacita snímače s délkou prstu 10 mm	Kapacita snímače s délkou prstu 20 mm
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
Citlivost			

b. Závislost kapacity senzorů na hladině zanesete do jednoho grafu.



c. Zhodnoťte výsledky. Senzor s jakou délkou prstů je nejcitlivější?

2. Porovnejte citlivost snímačů vyrobených na PET folii a na fotopapíru.

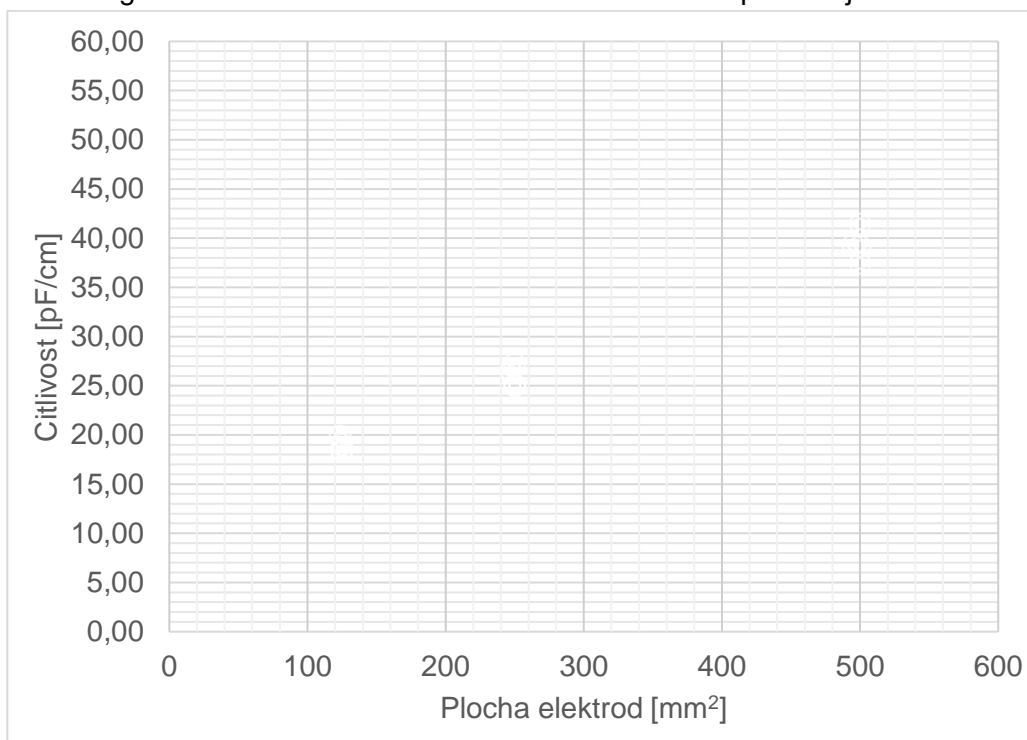
Změřte závislost kapacity inter-digitálního snímače na hladině vody. Pro měření použijte tři vzorky s různou délkou prstů (5 / 10 / 20 mm) a stejnou šířkou prstů (1 mm) vyrobených na PET folii

a. Změřené hodnoty zapište do tabulky. Vypočítejte citlivost senzorů.

Výška hladiny [cm]	Kapacita snímače s délkou prstu 5 mm	Kapacita snímače s délkou prstu 10 mm	Kapacita snímače s délkou prstu 20 mm
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
Citlivost			

Přílohy

- b. Vypočítanou citlivost vyrobených na PET folii a na fotopapíru zanesete do grafu. Plochu elektrod senzorů s různou délkou prstů najdete na konci úlohy.



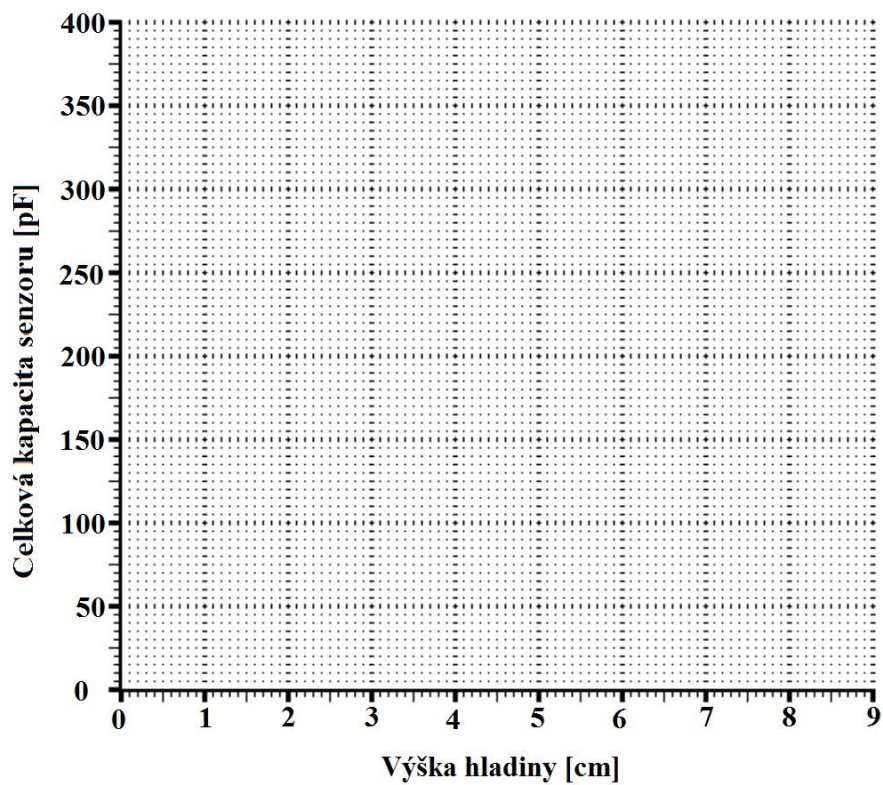
- c. Jaký senzor je nejcitlivější? Proč?

3. Porovnejte citlivost snímačů s krycími vrstvami různé tloušťky. Pro měření použijte snímače, které mají stejné parametry (délnu prstu, šířku prstu a šířku mezer).

- a. Změřené hodnoty zapište do tabulky.

Výška hladiny [cm]	Kapacita snímače s laminovací folii 125 μm [pF]	Kapacita snímače s laminovací folii 80 μm [pF]	Kapacita snímače s laminovací folii 25 μm [pF]
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			

b. Závislost kapacity senzorů na hladině zanesete do jednoho grafu

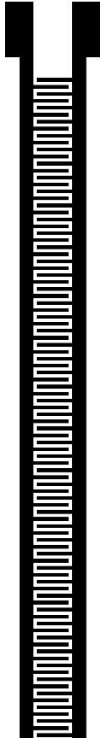
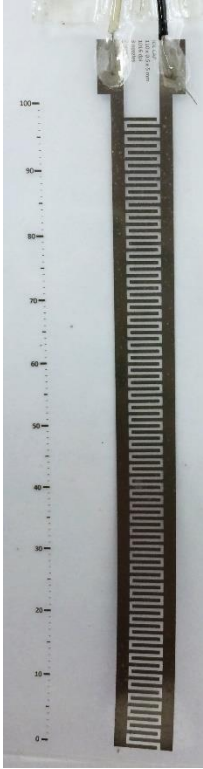
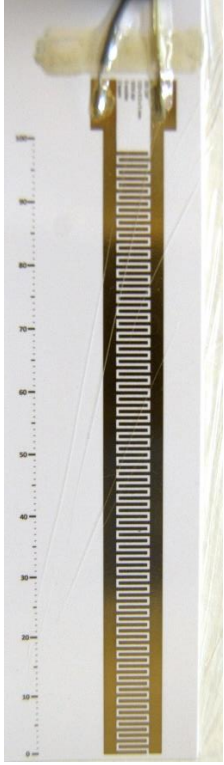

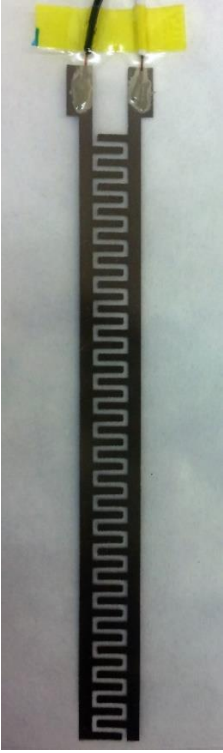



c. Jaký senzor je nejcitlivější? Proč?


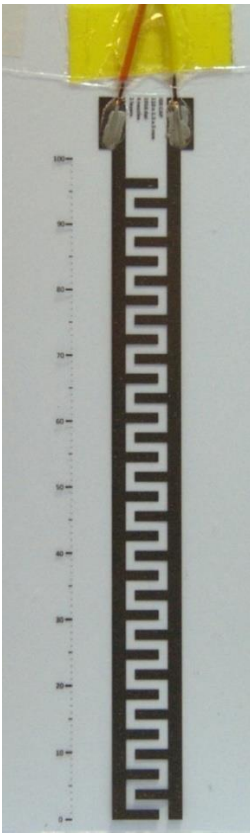
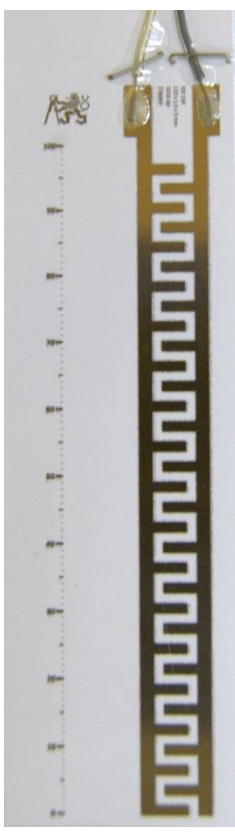

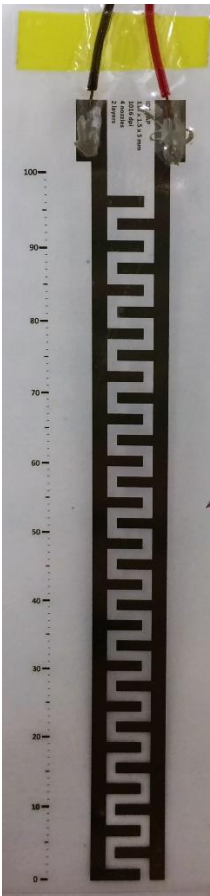
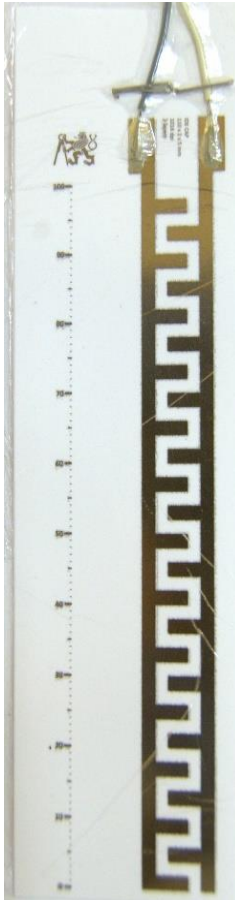
Plochy elektrod senzorů s různou délkou prstů.

Délka prstů (mm)	5	10	20
Plocha elektrod (mm ²)	125	250	500

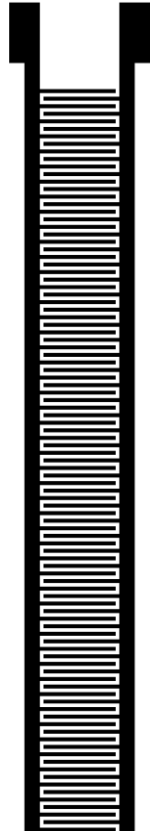
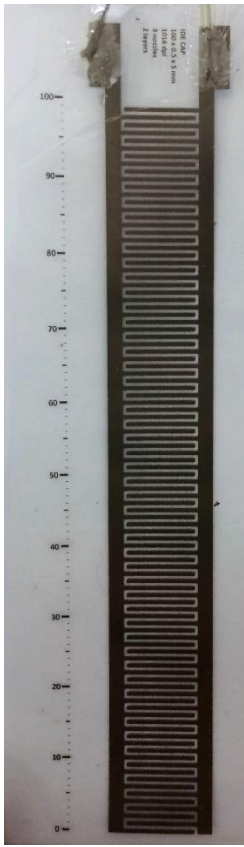
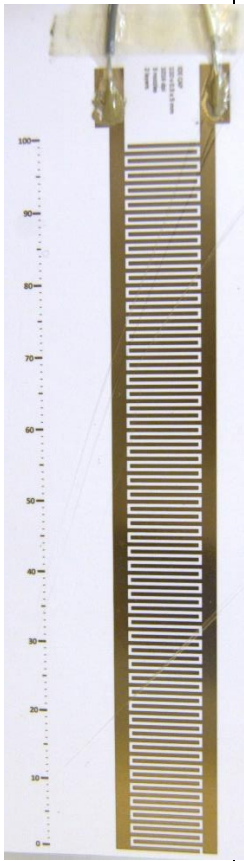
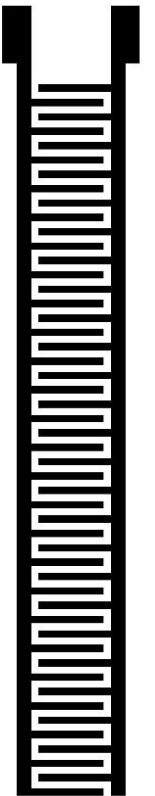
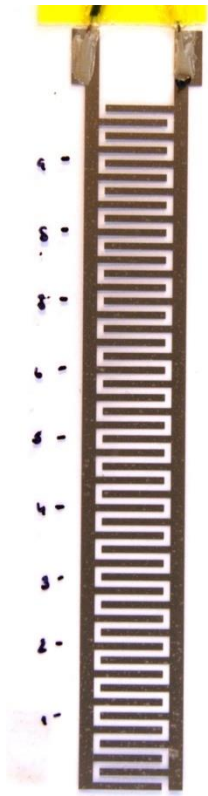
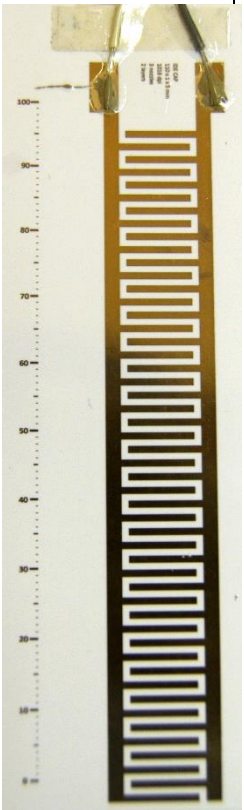
B Seznam vyrobených vzorků

Parametry motivu	Velikost	Navržený motiv	Motiv natisknutý na PET folie	Motiv natisknutý na fotopapír
Šírka prstů Délka prstů Počet prstů Plocha elektrod Délka elektrod	5 mm 5mm 100 250 mm ² 600 mm			
Šírka prstů Délka prstů Počet prstů Plocha elektrod Délka elektrod	1 mm 5mm 50 250 mm ² 350 mm			

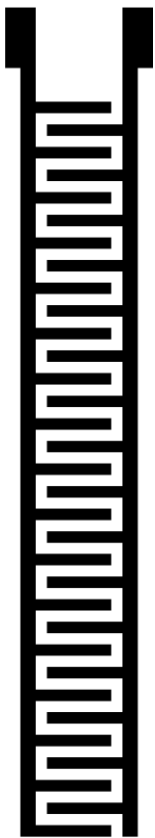
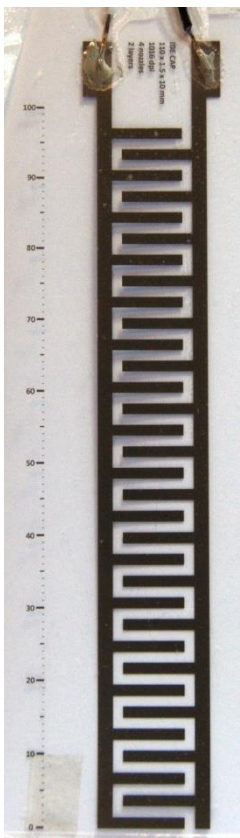
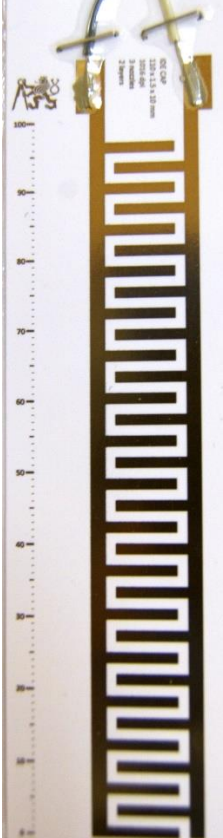

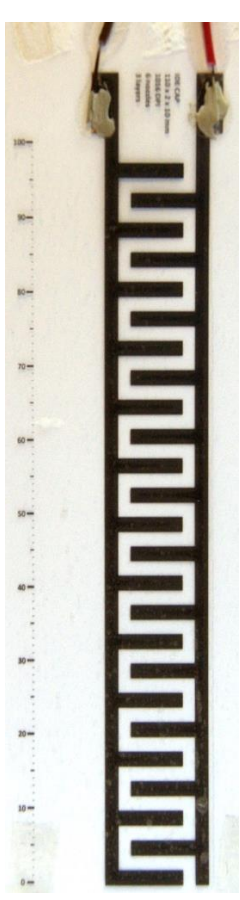
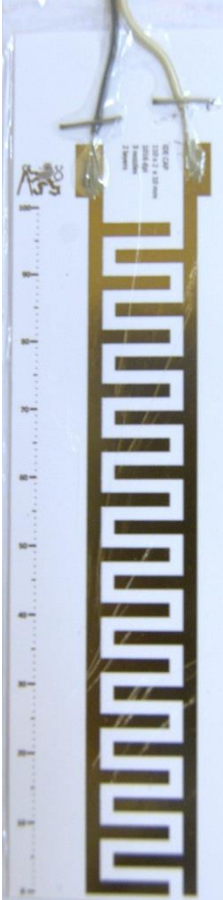
Přílohy

<p>Šírka prstů 1,5 mm</p> <p>Délka prstů 5 mm</p> <p>Počet prstů 33</p> <p>Plocha elektrod 248 mm²</p> <p>Délka elektrod 264 mm</p>				
<p>Šírka prstů 2 mm</p> <p>Délka prstů 5 mm</p> <p>Počet prstů 25</p> <p>Plocha elektrod 250 mm²</p> <p>Délka elektrod 225 mm</p>				

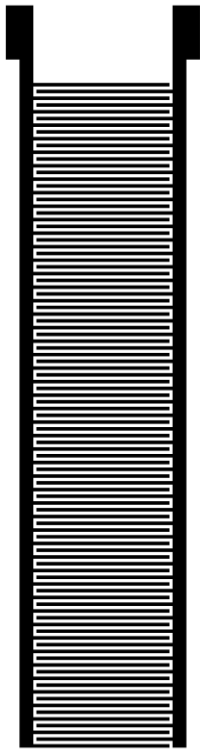
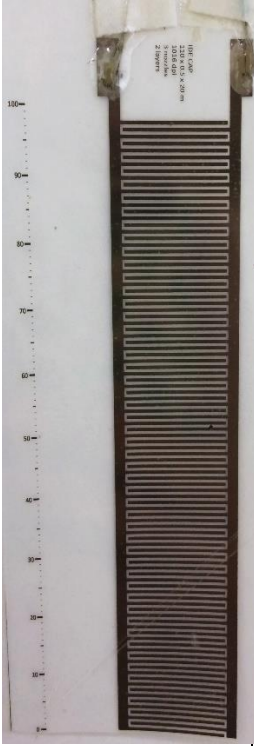
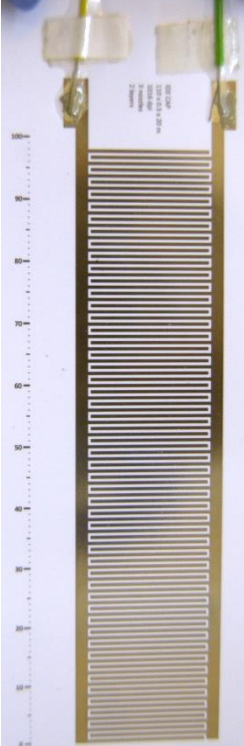
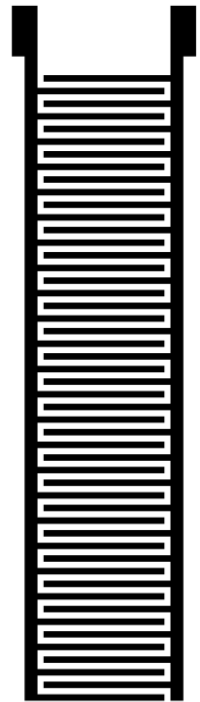
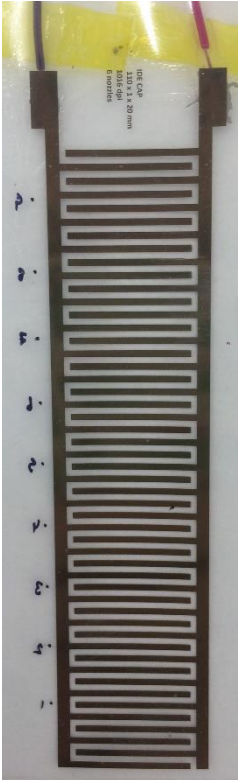
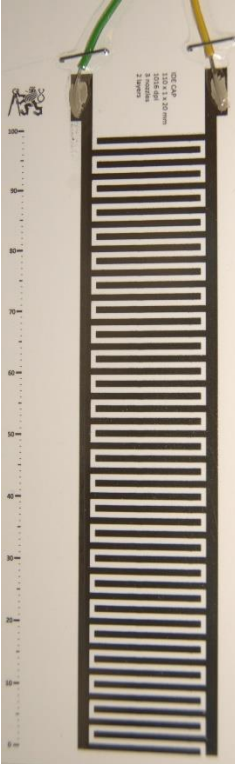
Přílohy

<p>Šírka prstů Délka prstů Počet prstů Plocha elektrod Délka elektrod</p>	<p>0,5 mm 10 mm 100 500 mm² 1100 mm</p>			
<p>Šírka prstů Délka prstů Počet prstů Plocha elektrod Délka elektrod</p>	<p>1 mm 10 mm 50 500 mm² 600 mm</p>			

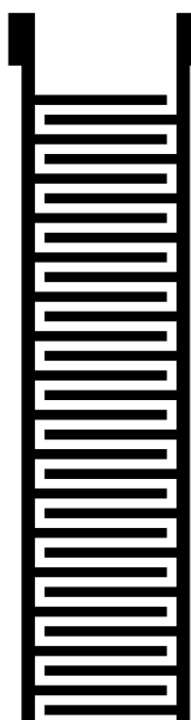
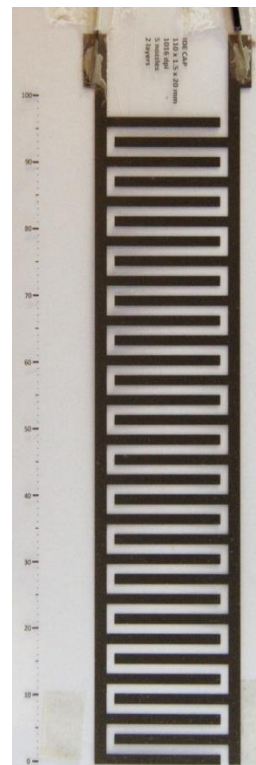
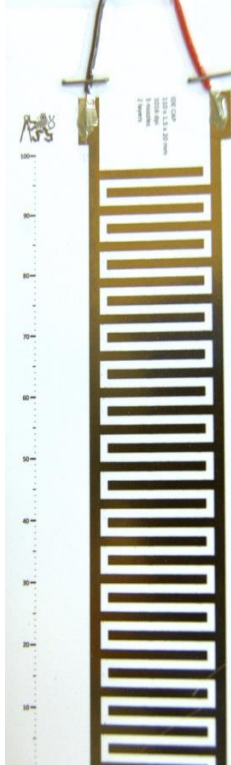
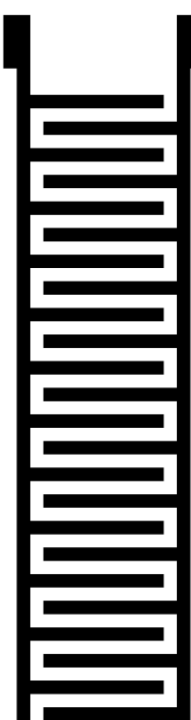
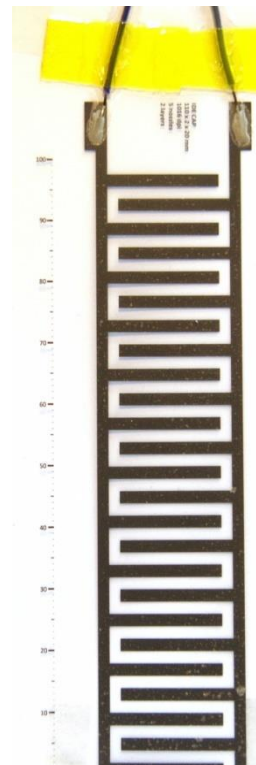
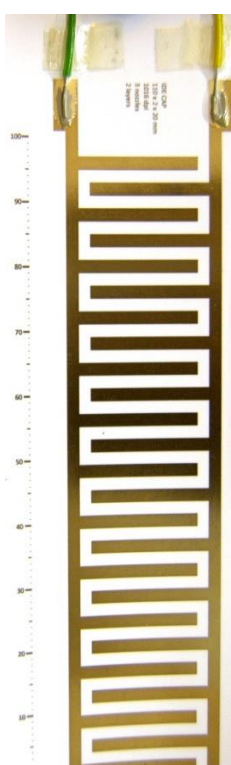
Přílohy

<p>Šírka prstů</p> <p>Délka prstů</p> <p>Počet prstů</p> <p>Plocha elektrod</p> <p>Délka elektrod</p>	<p>1,5 mm</p> <p>10 mm</p> <p>33</p> <p>495 mm²</p> <p>429 mm</p>			
<p>Šírka prstů</p> <p>Délka prstů</p> <p>Počet prstů</p> <p>Plocha elektrod</p> <p>Délka elektrod</p>	<p>2 mm</p> <p>10 mm</p> <p>25</p> <p>500 mm²</p> <p>350 mm</p>			

Přílohy

<p>Šírka prstů</p> <p>Délka prstů</p> <p>Počet prstů</p> <p>Plocha elektrod</p> <p>Délka elektrod</p>	<p>0,5 mm</p> <p>20 mm</p> <p>100</p> <p>1000 mm²</p> <p>2100 mm</p>			
<p>Šírka prstů</p> <p>Délka prstů</p> <p>Počet prstů</p> <p>Plocha elektrod</p> <p>Délka elektrod</p>	<p>1 mm</p> <p>20 mm</p> <p>50</p> <p>1000 mm²</p> <p>1100 mm</p>			

Přílohy

<p>Šírka prstů 1,5 mm</p> <p>Délka prstů 20 mm</p> <p>Počet prstů 33</p> <p>Plocha elektrod 990 mm²</p> <p>Délka elektrod 759 mm</p>				
<p>Šírka prstů 2 mm</p> <p>Délka prstů 20 mm</p> <p>Počet prstů 25</p> <p>Plocha elektrod 1000 mm²</p> <p>Délka elektrod 600 mm</p>				

C Tabulky a grafy s naměřenými hodnotami

Délka prstů	5 mm				10 mm				20 mm			
Šířka prstů	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm
Výška hladiny [cm]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]
0	11,9	8,9	7,34	8,8	20,5	12,2	9,6	10	42,2	17	13,5	9,9
1	33,4	26,4	25	28,1	49,3	41,4	37,4	36,9	88,3	62,7	58	48,8
2	50,8	46,6	45,5	45,3	73,9	62,4	62,4	57,8	131,9	101,6	95,8	88
3	68,3	65,6	65,1	64,7	99,2	88,5	90,4	86	168,5	140,2	134,4	126,7
4	84,8	81,4	86,4	82,8	128	111,3	117,9	110,2	208,3	178,7	172,6	163,9
5	102,4	101,6	106,7	102,4	153,2	135,5	140,5	134,5	250,6	218,3	212,4	194,5
6	121,3	120,5	125,5	119,2	181,7	162,8	169	156,6	289,2	260,3	248,2	237,7
7	141,2	143,1	147,3	140,1	209,3	186,7	197,6	184,8	334,5	298,6	294,3	270,7
8	158,6	158	165,7	156,8	239,4	212,6	222,9	208,5	380	335,3	330,5	300,2
9	177	180,2	186,2	174,1	265,5	237,8	248,1	234,5	415	369,5	367,3	346,7
Citlivost (pF/cm)	18,34	19,03	19,87	18,37	27,22	25,07	26,50	24,94	41,42	39,17	39,31	37,42

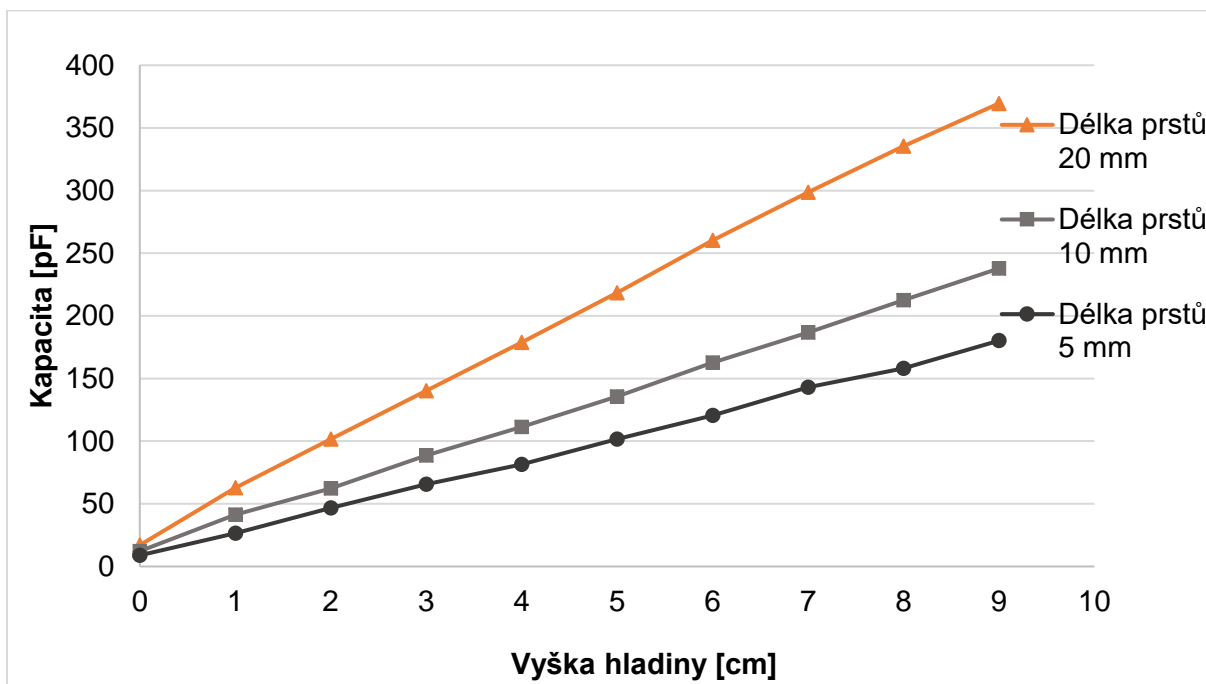
Tabulka naměřených hodnot senzorů vytisknutých na PET folii

Přílohy

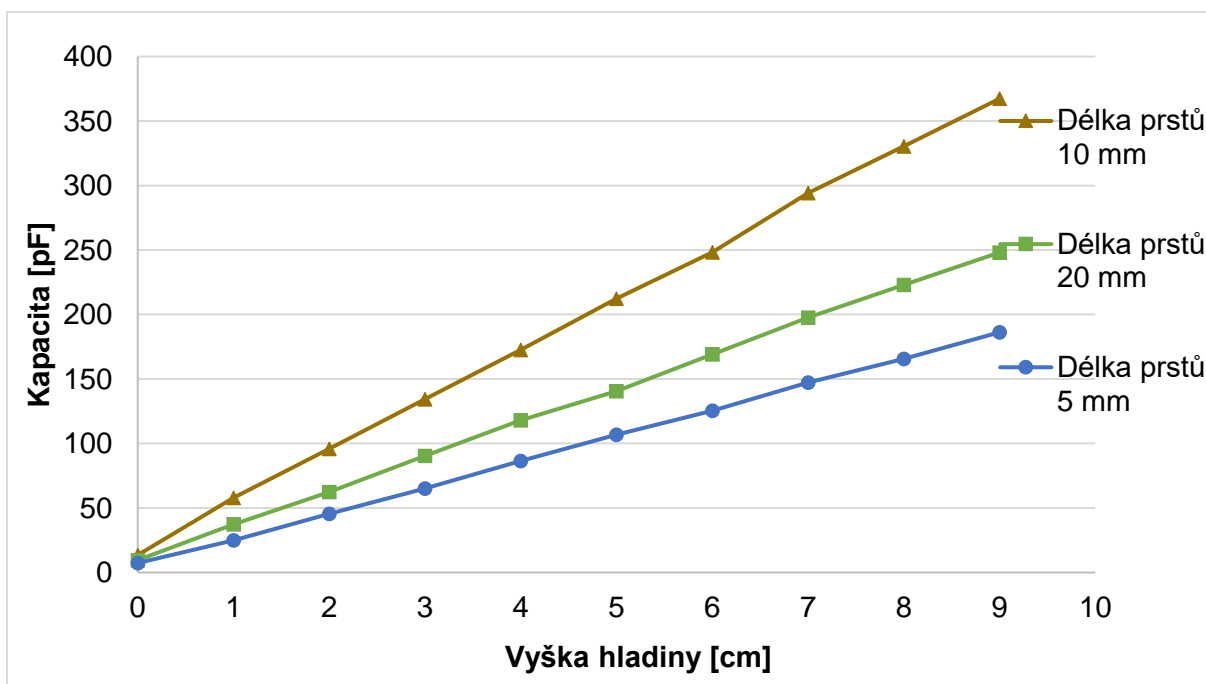
Délka prstů	5 mm				10 mm				20 mm			
Šířka prstů	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm	0,5 mm	1 mm	1,5 mm	2 mm
Výška hladiny [cm]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]	Celková kapacita Cp [pF]
0	30,6	14,5	8,2	7,3	35,2	23	9,1	7,1	106,5	28,8	14,9	33,6
1	50,8	34,1	29,3	15,9	67,9	52,8	35,5	32,4	153,2	66,7	55,6	114,3
2	70	57,7	46,6	26,1	93,5	83,3	59,3	56,9	197,6	107,5	98,1	185,1
3	89,2	78,3	64,8	37,1	131,5	109,2	83,6	82,5	243,7	149,8	137	262,6
4	110,2	98,2	82,5	46,9	152,6	138,8	110,9	104,5	281,4	194,2	179	333,1
5	130,5	116,3	102,1	57	184,3	167,7	136,9	134,4	322,2	241,1	215,9	396,7
6	150	137,2	120,2	67,1	221,5	198,1	164,3	153,05	367,5	281,5	251,7	461,9
7	170	159,7	140,7	78	247,6	225,8	191	179,6	412,3	324,3	295,7	519,5
8	190,8	179,8	157,2	87,8	282,3	253,9	213,8	203,4	457,9	366,4	334,4	566
9	210	200,3	177	98,7	319	284,3	239	230,2	500,9	404,1	373,1	619,6
Citlivost (pF/cm)	19,93	20,64	18,76	10,16	31,53	29,03	25,54	24,79	43,82	41,70	39,80	65,11

Tabulka naměřených hodnot senzorů vytisknutých na fotopapíru

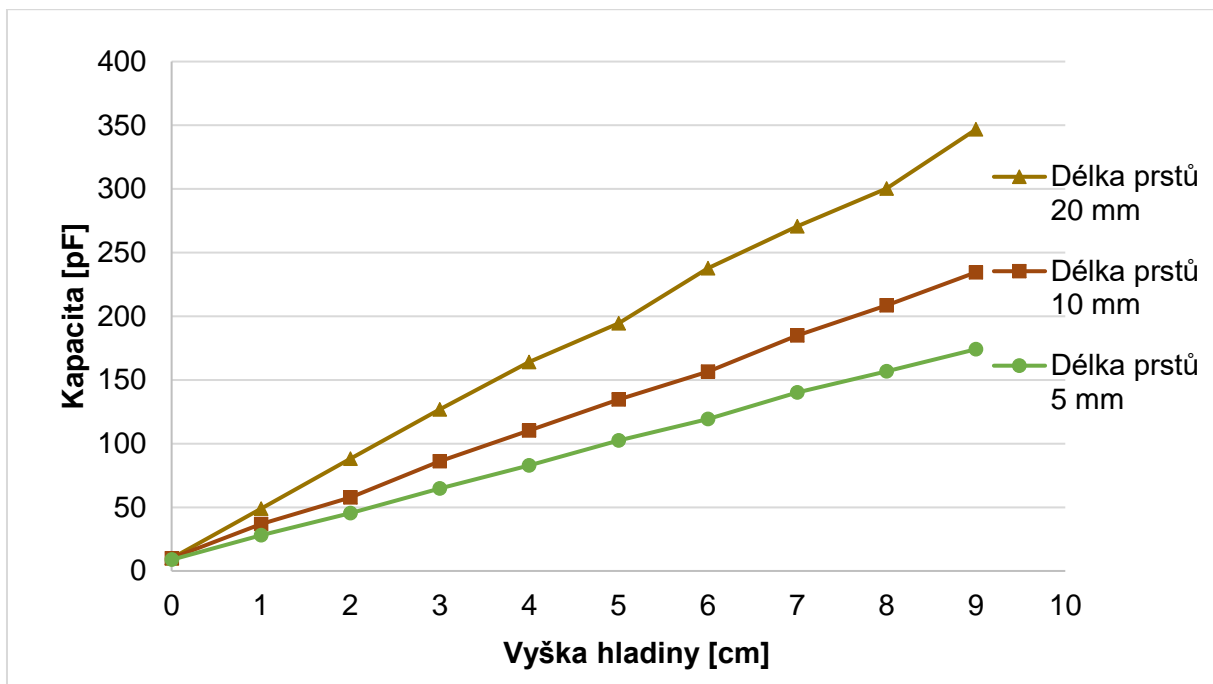
Grafy závislosti kapacity na výšce hladiny senzorů vyrobených na PET folii s různými geometrickými parametry.



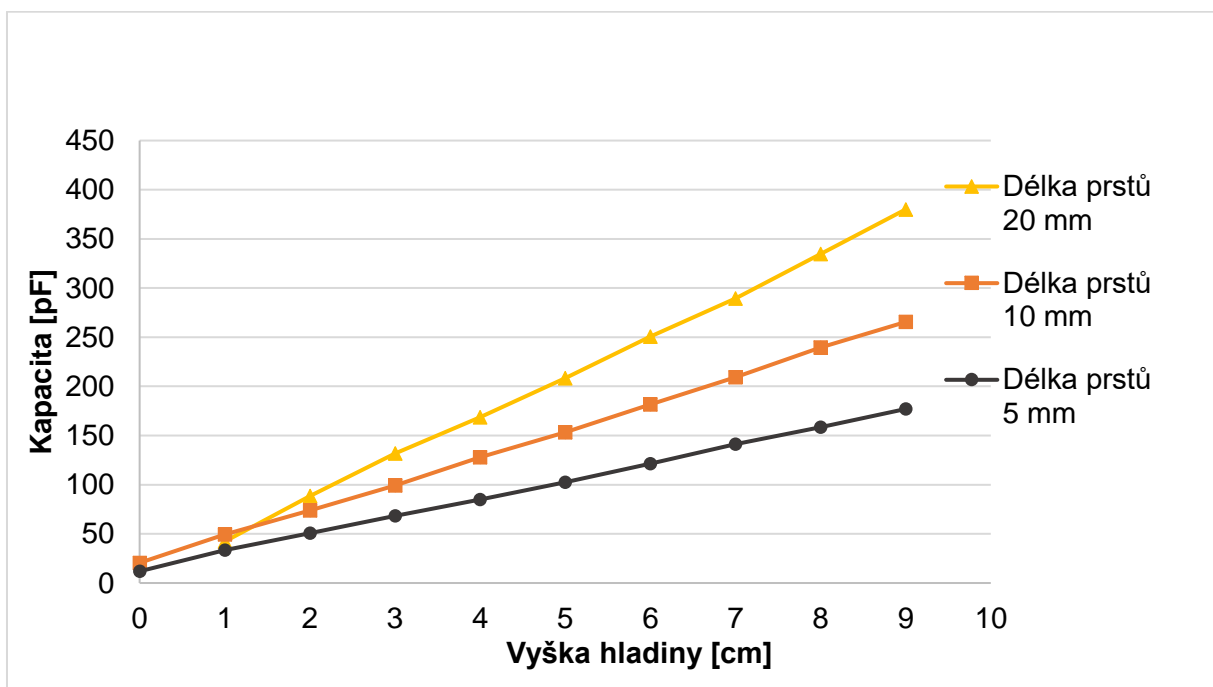
Závislost kapacity na výšce hladiny u vzorku s různou délkou prstů a s šířkou prstů (W) 0,5 mm



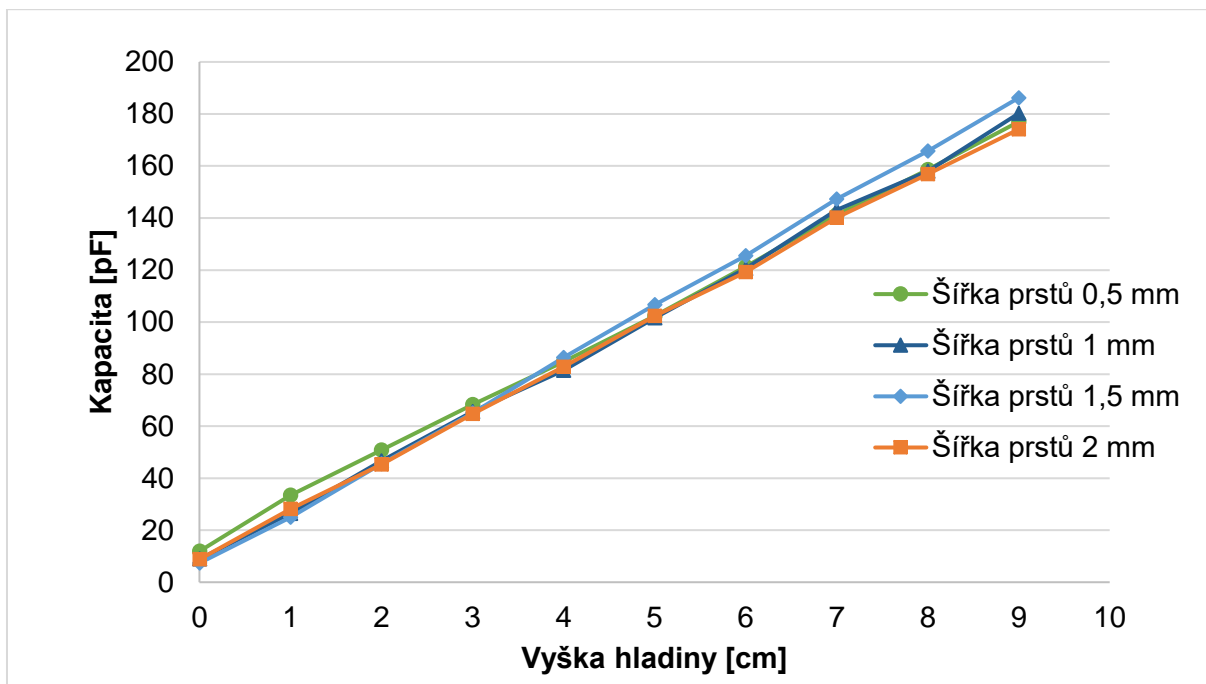
Závislost kapacity na výšce hladiny u vzorku s různou délkou prstů a s šířkou prstů (W) 1 mm



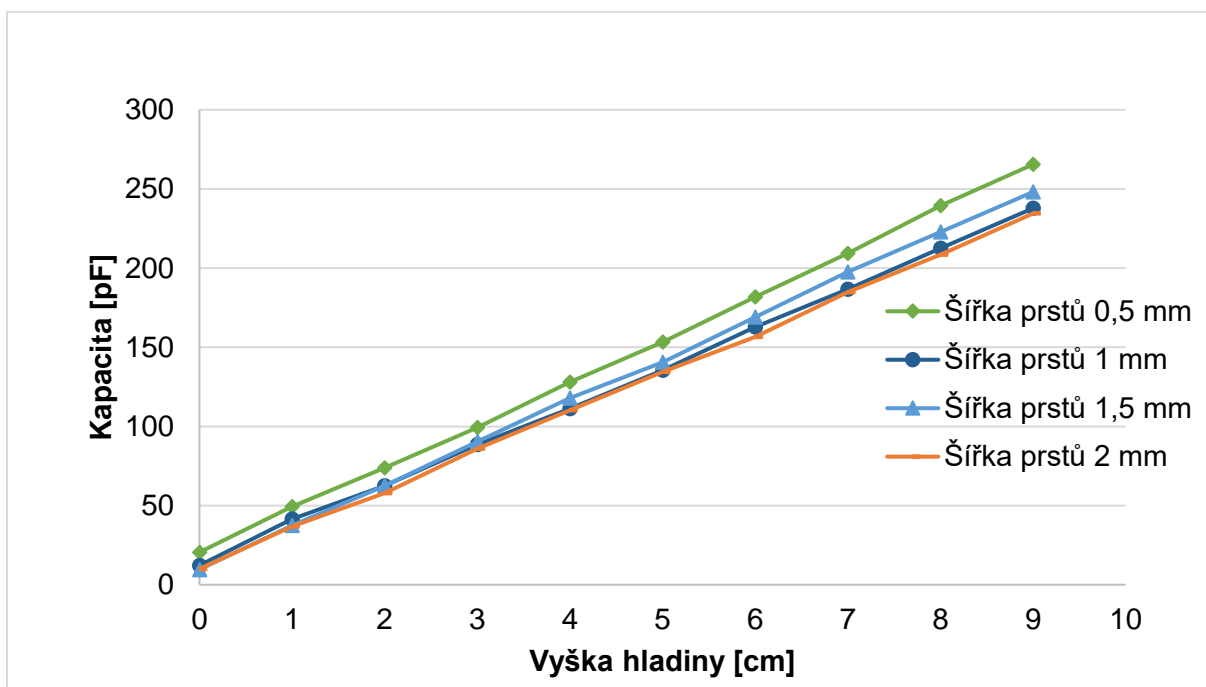
Závislost kapacity na výšce hladiny u vzorku s různou délkou prstů a s šířkou prstů (W) 1,5 mm



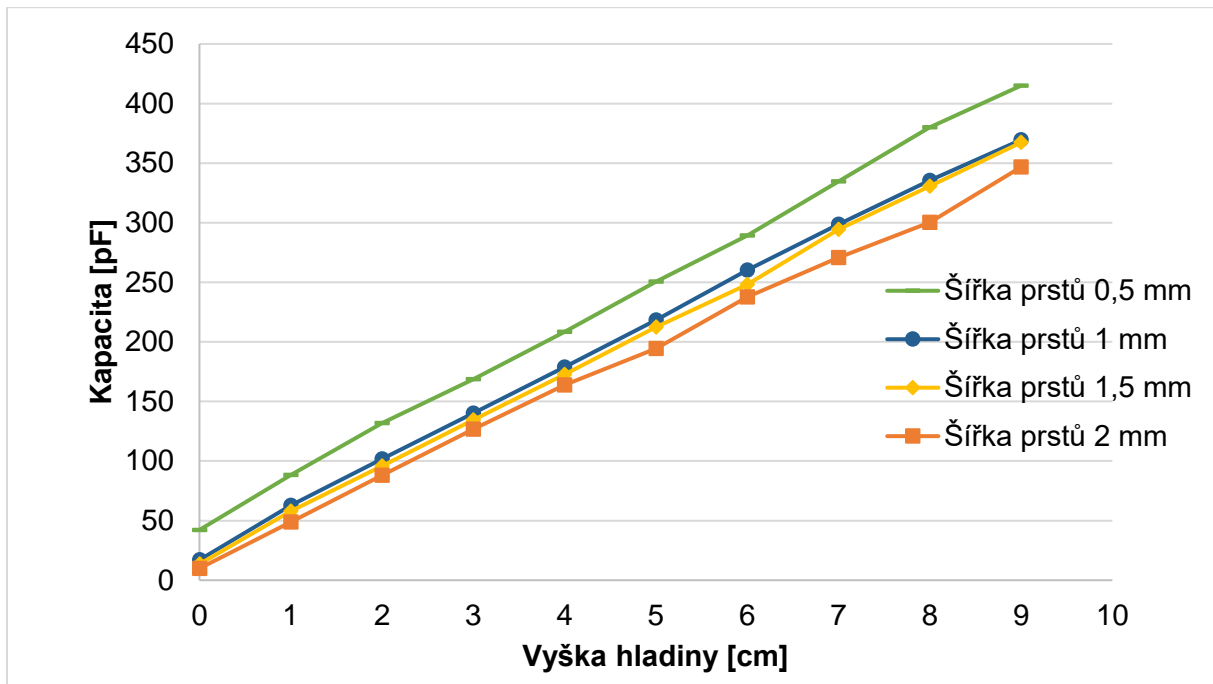
Závislost kapacity na výšce hladiny u vzorku s různou délkou prstů a s šířkou prstů (W) 2 mm



Závislost kapacity na výšce hladiny u vzorků s délkou prstů (L) 5 mm a různou šířkou prstů

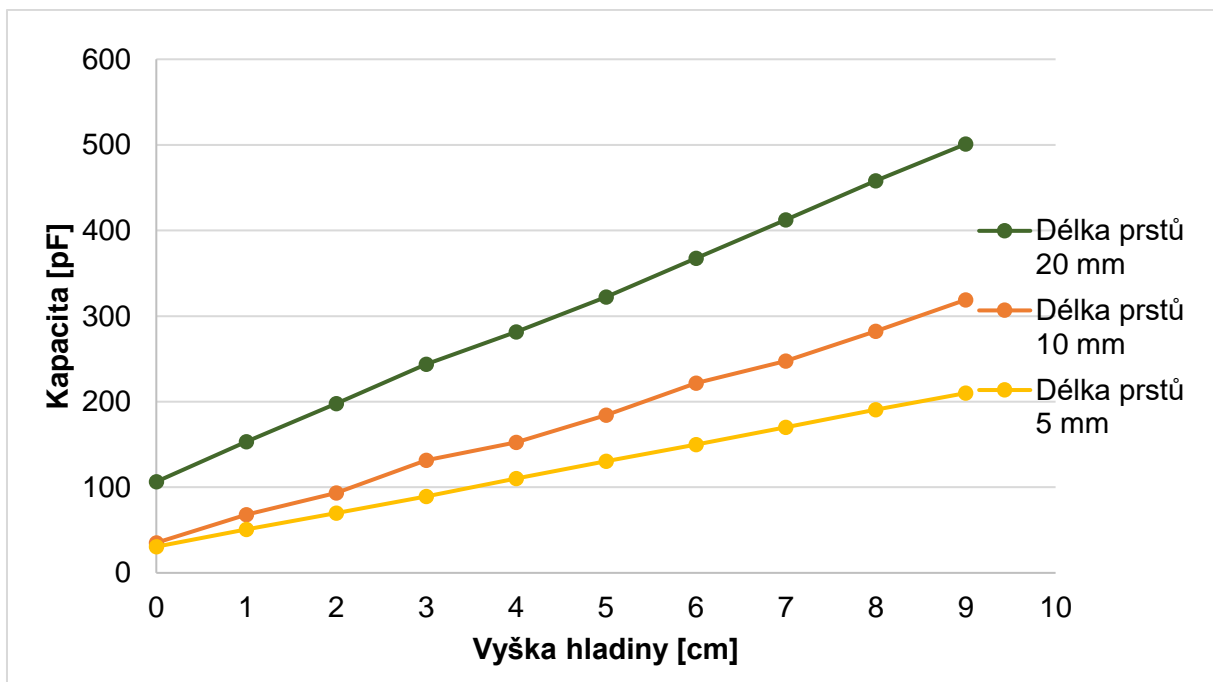


Závislost kapacity na výšce hladiny u vzorků s délkou prstů (L) 10 mm a různou šířkou prstů

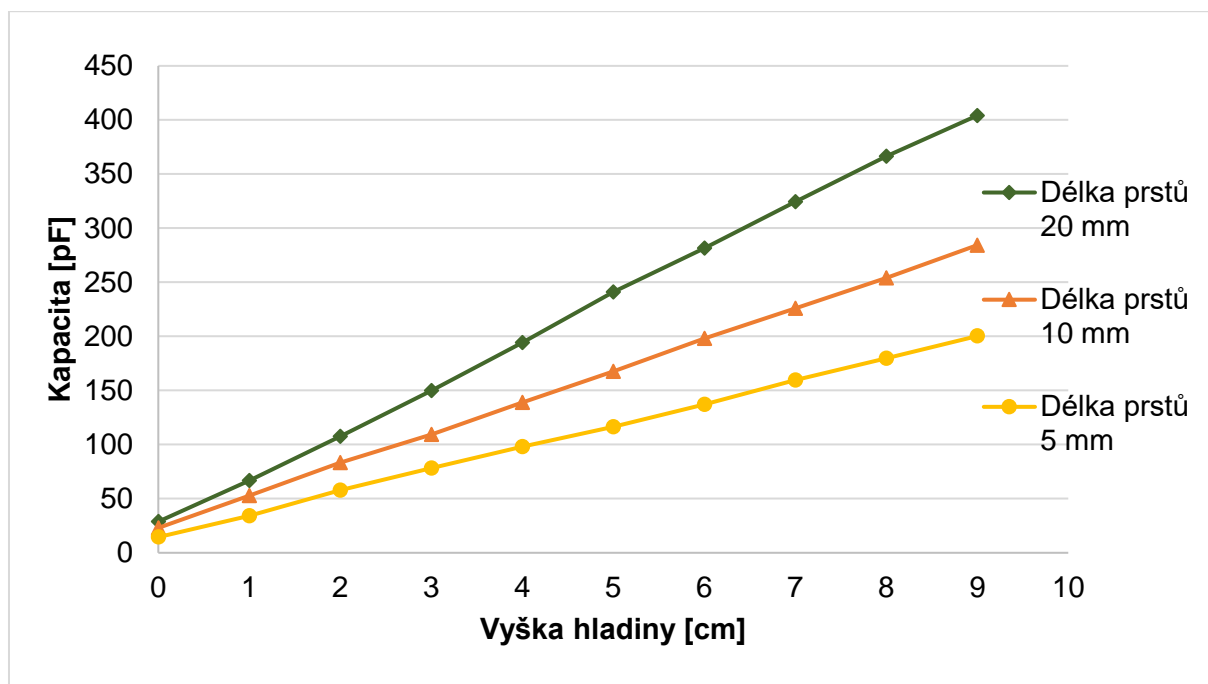


Závislost kapacity na výšce hladiny u vzorků s délkou prstů (L) 20 mm a různou šířkou prstů

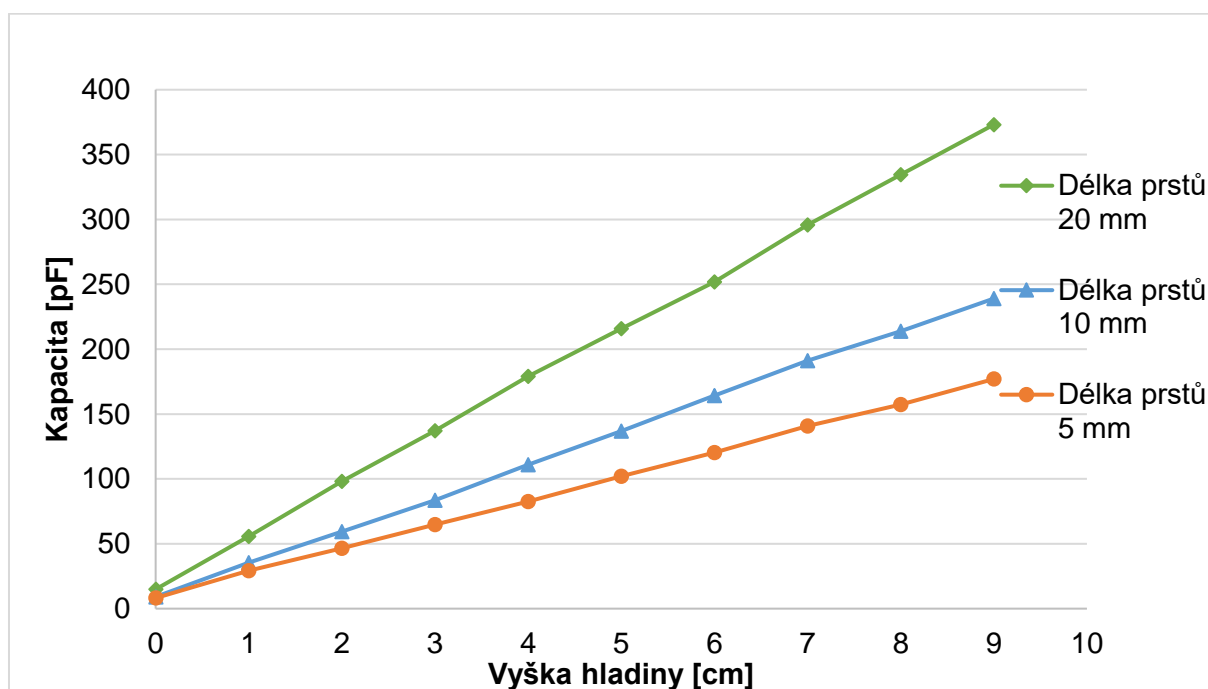
Grafy závislostí kapacity na výšce hladiny senzorů vyrobených na fotopapíru s různými geometrickými parametry.



Závislost kapacity na výšce hladiny u vzorku s různou délkou prstů a s šířkou prstů (W) 0,5 mm

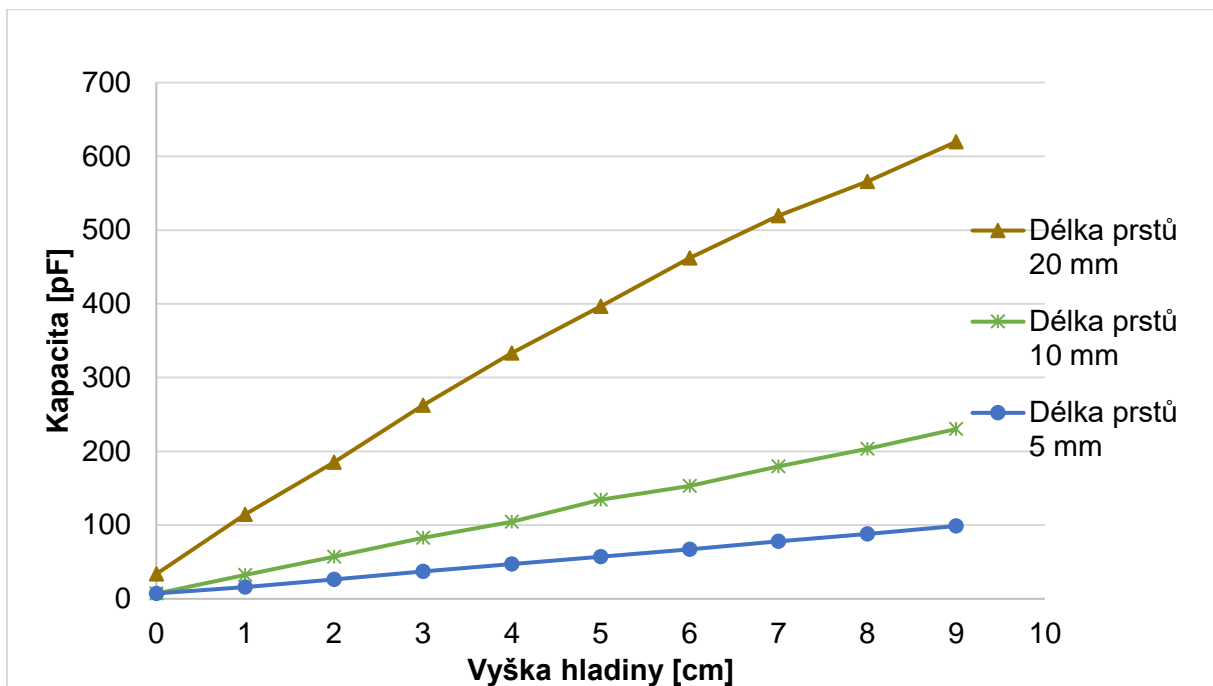


Závislost kapacity na výšce hladiny u vzorku s různou délkou prstů a s šířkou prstů (W) 1 mm

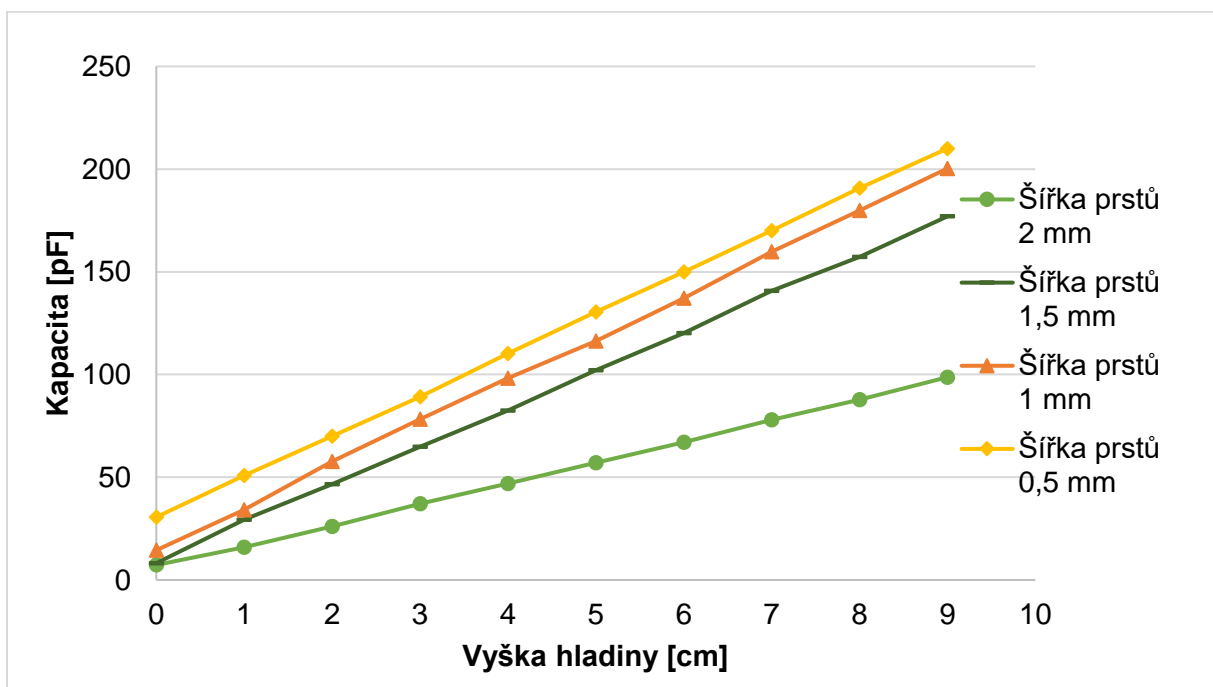


Závislost kapacity na výšce hladiny u vzorku s různou délkou prstů a s šířkou prstů (W) 1,5 mm

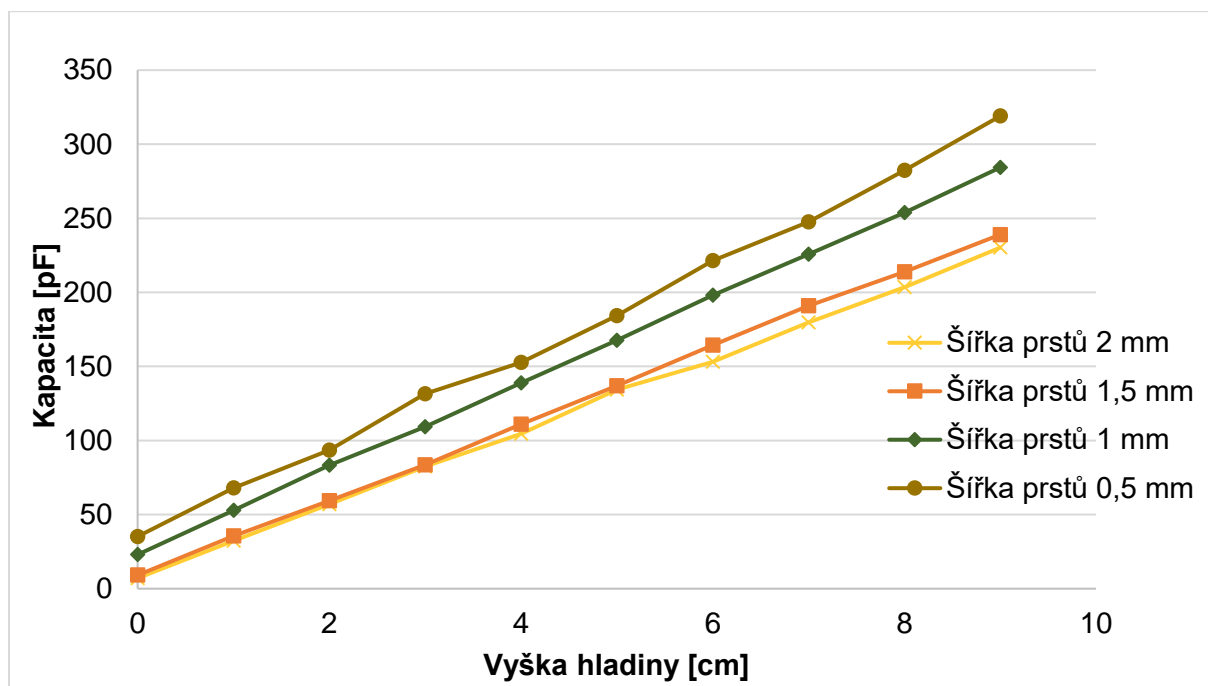
Přílohy



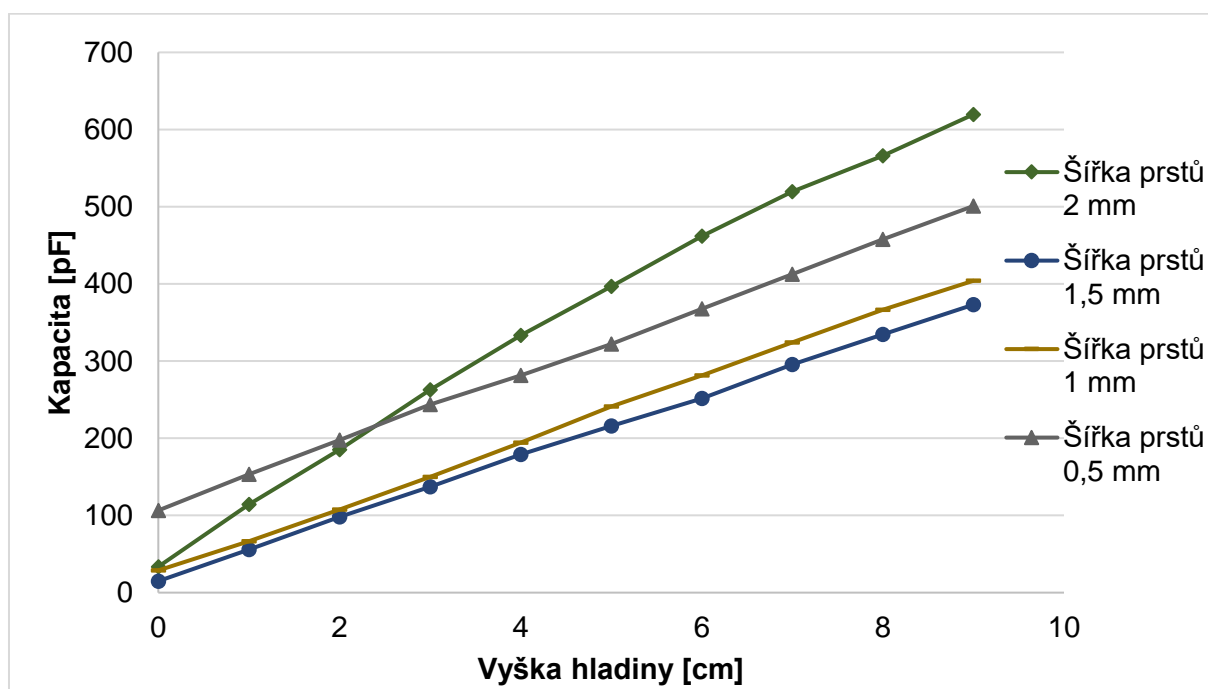
Závislost kapacity na výšce hladiny u vzorku s různou délkou prstů a s šířkou prstů (W) 2mm



Závislost kapacity na výšce hladiny u vzorků s délkou prstů (L) 5 mm a různou šířkou prstů



Závislost kapacity na výšce hladiny u vzorků s délkou prstů (L) 10 mm a různou šířkou prstů



Závislost kapacity na výšce hladiny u vzorků s délkou prstů (L) 20 mm a různou šířkou prstů

D Seznam použitých zařízení:

1. Tiskárna:



Materiálová tiskárna Fujifilm Dimatix DMP 2831

2. Sušárna:



Sušárna Metmert UN30

Přílohy

3. Mikroskop:



Mikroskop Olympus BX60

4. Laminovací stroj:



Laminovací stroj SIGMA EL 142 PLUS

Přílohy

5. RLC metr:



Měřicí RLC můstek Hameg LCR HM 8118

E Tabulky vlastností použitých materiálů

Stříbrný inkoust PN 736465 od Sigma ALDRICH	
Forma	Disperze Nanočástice
Koncentrace	30 až 35 wt.% v triethylenglykolmonomethyletheru
Odpor	11 $\mu\Omega$ -cm
Povrchové napětí	0,035-0,040 N/m
Velikost částic	≤ 50 nm
Viskozita	10-18 cP
Hustota	1,45 g / ml \pm 0,05 g / ml při 25 °C
Skladovací teplota	2-8 °C

Vlastností stříbrného inkoustu PN 736465 uvedené na stránkách výrobce

Vodivá pasta 735825-Silver od Sigma ALDRICH	
Forma	Pasta (mikročástice)
Koncentrace	$\geq 75\%$
Teplota vytvrzování	120-150 °C / 30-60 min
Odpor	1-3 $\cdot 10^{-5}$ Ω -cm (vodivá pasta) 1,59 $\mu\Omega$ -cm, 20 °C
Velikost částic	200 nm (80%) <5 nm (20%)
Viskozita	100 000 až 300 000 cP
Bod varu	2212 °C
Bod tání	960 °C
Hustota	10,49 g / cm ³
Skladovací teplota	2-8 °C

Vlastností vodivé pasty 735825-Silver uvedené na stránkách výrobce