

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Kondenzátory realizované na textilních substrátech

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. David PÍSAŘ**
Osobní číslo: **E17N0107P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Kondenzátory realizované na textilních substrátech**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte problematiku chytrých textilií a popište způsoby realizace kondenzátorů na textilních substrátech.
2. Navrhněte metody pro zvýšení kapacity textilních kondenzátorů.
3. Seznamte se se softwarem pro tvorbu výšivek Bernina Designer a vytvořte v tomto softwaru vhodné návrhy textilních kondenzátorů.
4. Realizujte vzorky kondenzátorů na textilních substrátech.
5. Proměřte elektrické parametry vzorků textilních kondenzátorů, proveďte zhodnocení dosažených výsledků a navrhněte další postup prací pro výzkum v této oblasti.



Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

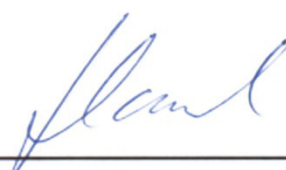
1. Mattila, H.R.: Intelligent textiles and clothing, 2006.
2. Schneegass, S.: Smart textiles – Fundamentals, Design and Interaction, 2017.
3. Hoffmann K.: Planární mikrovlnné obvody, 2007.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Tomáš Blecha, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zaměřuje na realizaci kondenzátorů na textilním substrátu převážně vyšíváním. V teoretické části je věnován prostor materiálům, metodám a technologiím výroby v oděvním průmyslu v souvislosti s e-textilem. Uvádí se zde provedení textilních kondenzátorů a jejich využití. V další části následuje návrh a realizace se zaměřením na možnosti zvýšení dielektrické konstanty, tedy i kapacity. Navržené vzorky byly změřeny a výsledné hodnoty porovnány s výpočty. V závěru jsou shrnuty dosažené poznatky a navrženy možnosti dalšího směřování.

Klíčová slova

Pasivní elektronické součástky, vyšívané elektronické součástky, textilní kondenzátor, kapacita, permitivita, textilní substráty, elektricky vodivé nitě a textilie, nositelná elektronika.

Abstract

The presented diploma thesis focuses on the realization of capacitors on a textile substrate mainly by embroidery. The theoretical part is devoted to materials, methods and technologies of production in the clothing industry in connection with e-textile. The design of textile capacitors and their use are presented here. The next part follows the design and implementation with a focus on the possibility of increasing the dielectric constant, ie capacity. The proposed samples were measured and the resulting values compared with the calculations. In the end, the achieved knowledge is summarized and the possibilities of further direction are suggested.

Key words

Passive electronic components, embroidery electronic components, textile capacitor, capacity, permittivity, textile substrates, electrically conductive threads and fabrics, wearable electronics.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

.....
podpis

V Plzni dne 18.6.2020

Bc. David Písař

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Tomášovi Blechovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 TEORETICKÁ ČÁST	12
1.1 TEXTILNÍ SUBSTRÁTY.....	14
1.1.1 <i>Textilní vlákna</i>	14
1.1.2 <i>Vodivé nitě, příze a látky</i>	15
1.1.3 <i>Rozdělení textilních substrátů podle způsobu výroby</i>	17
1.1.4 <i>3D Textilie</i>	19
1.2 MOŽNOSTI TVORBY MOTIVŮ NA TEXTILNÍ SUBSTRÁTY.....	21
1.2.1 <i>Vyšívání a obšívání</i>	22
1.2.2 <i>Nažehlování</i>	23
1.2.3 <i>Tisk</i>	24
1.3 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI KONDENZÁTORŮ.....	26
1.3.1 <i>Dielektrické materiály a jejich vlastnosti</i>	26
1.3.2 <i>Nabíjení a vybíjení kondenzátorů</i>	28
1.4 PROVEDENÍ PLANÁRNÍCH KONDENZÁTORŮ.....	28
1.4.1 <i>Oddělení elektrod pomocí dielektrika (elektrostatické)</i>	28
1.4.2 <i>Oddělení elektrod pomocí elektrolytu (elektrochemické)</i>	32
1.5 KONDENZÁTORY REALIZOVANÉ NA TEXTILNÍCH SUBSTRÁTECH.....	34
1.5.1 <i>Provedení funkčních vrstev</i>	34
1.5.2 <i>Význam a použití (relevantní možnosti aplikace)</i>	37
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST - NÁVRH A REALIZACE VZORKŮ	40
2.1 POSTUP ŘEŠENÍ.....	40
2.2 POUŽITÉ MATERIÁLY.....	42
2.3 VYŠITÉ ZKUŠEBNÍ VZORKY KONDENZÁTORŮ.....	43
2.3.1 <i>Šicí a vyšívací stroj Bernina</i>	43
2.3.2 <i>Návrh</i>	44
2.3.3 <i>Realizované zkušební vzorky</i>	46
2.4 NAŽEHLENÉ ZKUŠEBNÍ VZORKY KONDENZÁTORŮ.....	47
2.4.1 <i>Návrh</i>	47
2.4.2 <i>Příprava sendvičové struktury</i>	47
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST - TESTOVÁNÍ	48
3.1 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	48
3.2 POSTUP MĚŘENÍ.....	50
3.2.1 <i>Naměřené výsledky a zhodnocení textilních substrátů</i>	51
3.2.2 <i>Naměřené výsledky a zhodnocení kondenzátorů</i>	54
ZÁVĚR	59
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	60
PŘÍLOHY	1

Úvod

Pohodlné nositelné elektronice a inteligentnímu textilu patří 3. tisíciletí. O výzkum a vývoj moderních textilií pro elektronické aplikace, neboli e-textil, je rozsáhlý zájem a věnuje se mu velké úsilí. Podporu mají zejména oblasti jako bezpečnost a ochrana, internet věcí nebo záznam dat, ať už ve zdravotnictví, armádě a sportu. Zajímavá také může být integrace elektrických součástí a systému na textil, nebo přímo do struktury v automotive, stavebnictví, agrárním nebo herním průmyslu či bytovém textilu. Jinými slovy e-textil může v budoucnosti plnit užitečnou funkci v řadě aplikací kdekoli v běžném životě. Kondenzátory tvoří stavební kámen řady nositelných senzorů i elektronických obvodů. Klíčem k realizaci kondenzátorů na textilních substrátech je nalezení technologicky schůdných řešení a vhodných materiálů. Standardizovaný soubor metodik a komponent v současnosti neexistuje.

Hlavním cílem této práce je najít způsob, jak navýšit kapacitu kondenzátorů realizovaných na textilních substrátech. Pro praktické použití je nutno brát ohled na cenu, jednoduchost a další. U hledání dostupné dokumentace byla většina času věnována internetovým zdrojům, převážně pracím z vysokých škol a výzkumných institucí. Některým současným trendům, ale i zavedeným technikám a způsobům tvorby textilních struktur, se věnuje teoretická část. Mezi tyto metody patří vyšívání, tkaní, pletení, tisk a nažehlování. Dále jsou v této části uvedeny využívané materiály a provedení kondenzátorů.

Stěžejní částí diplomové práce je její experimentální část, zabývající se samotným návrhem a realizací kondenzátorů na textilním substrátu, přičemž je kladen důraz na flexibilitu, malé rozměry, nízkonapěťový provoz a přijatelnou funkčnost. Za pomoci návrhů pro planární technologii jsou realizovány vyšité testovací vzorky interdigitálních kondenzátorů (IDC). Také je vytvořen sendvičový typ kondenzátoru. Úsilí bylo věnováno zvýšení permitivity, tedy materiálové konstanty textilních substrátů. Ta souvisí se zvětšováním kapacity na které spolu s napětím závisí uložená energie v kondenzátoru. Součástí práce je ověření funkčních vzorků. Samotnému měření, kdy byly proměřeny elektrické parametry, je věnována poslední kapitola.

Seznam symbolů a zkratk

<i>FEL</i>	Fakulta elektrotechnická
<i>KET</i>	Katedra technologií a měření
<i>ISO</i>	Mezinárodní organizace pro standardizaci
<i>ČSN</i>	Česká technická norma
<i>UV</i>	Ultrafialové
<i>3D</i>	Trojrozměrné
<i>IDC</i>	Interdigitální kondenzátor
<i>EDLC</i>	Kondenzátor s elektrickou nábojovou dvouvrstvou
<i>W</i>	Energie [J]
W_e	Hustota energie elektrického pole [J/m^3]
\vec{E}	Intenzita elektrického pole [V/m]
<i>Q</i>	Elektrický náboj [C]
φ	Elektrický potenciál [V]
<i>U</i>	Napětí [V]
U_p	Průrazné napětí [V]
E_p	Dielektrická pevnost [kV/mm]
<i>R</i>	Elektrický odpor [Ω]
R_s	Sériový elektrický odpor [Ω]
R_p	Paralelní elektrický odpor [Ω]
<i>C</i>	Kapacita [F]
C_p	Paralelní kapacita [pF]
C_s	Sériová kapacita [pF]
ϵ_r	Relativní permitivita [–]
ϵ_0	Permitivita vakua $8,85 \cdot 10^{-12}$ [pF/m]
ϵ	Materiálová konstanta (permitivita) [pF/m]
$tg \delta, D$	Ztrátový činitel (dielektrické ztráty) [–]
\vec{P}	Elektrická polarizace [C/m^2]
w, wp, s, l	Geometrické rozměry [mm^2]
<i>n</i>	Počet, množství
<i>S</i>	Obsah [mm^2]

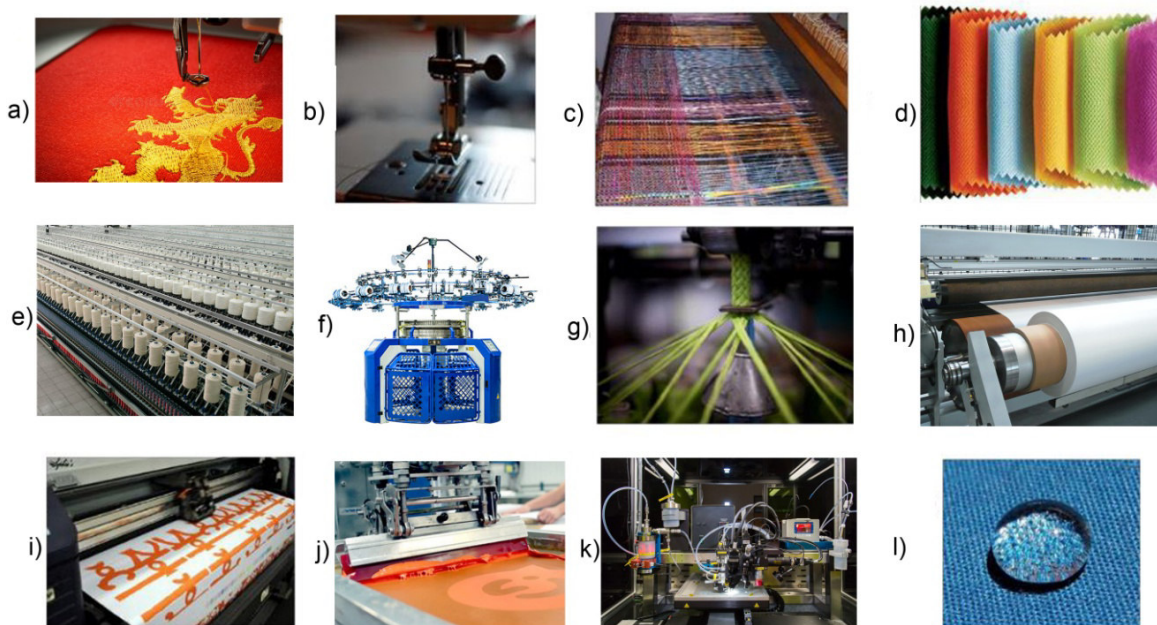
h Tloušťka dielektrika [mm^2]
 t Výška vodivé vrstvy [mm^2]
 ω Úhlová rychlost [rad/s]
 f Frekvence [Hz]
 σ Konduktivita (měrná elektrická vodivost) [S/m]

Ag Stříbro
 Au Zlato
 Ni Nikl
 Cu Měď
 Al Hliník
 Pt Platina
 PPy Polypyrrol
 $PANI$ Polyanilin
 $PEDOT$ Polyetylendioxyd-thiofen
 PSS Polystyren sulfonát
 PES Polyester
 PAD Polyamid
 $PDMS$ Polydimethyl siloxan
 $PVDF$ Polyvinyl denfluorid
 PEN Polyetylen naftalát
 PVP Polyvinyl fenol
 PVA Polyvinyl alkohol
 H_3SO_4 Kyselina sírová
 H_3PO_4 Kyselina fosforečná
 KOH Hydroxid draselný
 $NaCl$ Chlorid sodný

1 Teoretická část

Textilní průmysl se tradičně zabývá návrhem a výrobou vláken, nití, přízí, textilií a výrobků z nich, přičemž se využívá celá řada materiálů a metod. Trhu dominují hlavně bavlněné a polyesterové tkaniny. Pojem smart, tedy chytré textilie se souhrnně používá pro textilie obohacené o rozšířené vlastnosti, čili další funkcionalitu/y. V případě, kdy je textilní substrát hostitelem elektronického systému zpravidla hovoříme o elektronickém textilu, tedy e-textilu. Textilie, nebo jejich části, jsou většinou vodivé díky vetkání nebo vpletení různých vodivých vláken a přízí do textilní struktury během procesu výroby. Možnostmi jsou také tisknutelné vodivé inkousty a pasty, galvanizace nebo se uplatňuje elektronická výšivka. Vzhledem k rozsáhlosti tématu je zřejmé, že všechny části tohoto téma nemohou být popsány do stejné hloubky. [1]

Kompatibilita s tradičním textilním průmyslem je velmi atraktivní, zároveň však velkou technickou výzvou s řadou překážek. Obzvláště pokud se bere v úvahu velkovýroba. Interaktivní textilní struktury jsou konstruovány jako vícevrstvé a trojrozměrné. Výrobní postup se tak skládá z několika kroků, což bývá pracné a časově náročné. Skutečnou výzvou se tak stává přenesení ručně vyráběných prototypů do automatizovaných průmyslových procesů. [2]



Obr. 1.1 Možnosti výroby e-textilu: a) vyšívání; b) šití; c) tkaní; d) netkané textilie; e) předení; f) pletení; g) splétání; h) povlak / laminace; i) Ink-jet; j) sítotisk; k) AJP; l) chemické ošetření. [3]

U nositelné elektroniky integrované do oděvu se předpokládá, že při pohybu bude oděv ohýbán, tudíž nelze předpokládat konstantní fyzické rozměry součástek. Zajistit stabilní elektrické vlastnosti textilu je tak poměrně obtížné vzhledem k obecnému požadavku, aby integrovaná elektronika neovlivňovala samotné vlastnosti textilií. Mezi největších výzvy integrace textilu a elektroniky spadá i trvanlivost nositelného zařízení. Elektronické komponenty musí být upraveny tak, aby byly kompatibilní s lidskou kůží a vydržely opakované mechanické namáhání při ohybu, a především potom při praní. Platí, že čím jsou oděvy těsnější, tím musí být textilní součástky poddajnější. [4]–[9]

Tab. 1.1 Kvalitativní srovnání atributů výroby e-textilu. [10]

Výrobní technika e- textilu	Cena výrobního stroje	Cena materiálu	složitost procesu	Odolnost proti opotřebení při nošení
Výšivka	Vysoká	Nízká	Vysoká	Vysoká
Šití	Nízká	Nízká	Nízká	Vysoká
Tkaní	Nízká	Vysoká	Vysoká	Vysoká
Netkané textilie	Nízká	Nízká	Nízká	Nízká
Pletení	Nízká	Vysoká	Vysoká	Nízká
Předení	Nízká	Nízká	Nízká	Nízká
Breading	Nízká	Nízká	Nízká	Vysoká
Povlak	Vysoká	Nízká	Nízká	Nízká
Tisk	Vysoká	Vysoká	Nízká	Nízká

Zároveň je nutné podotknout, že ze strany spotřebitelů moderních oděvů se za jednu z nejdůležitějších vlastností oděvů považuje komfort. Rozhoduje také design, ergonomie, nebo estetika.

1.1 Textilní substráty

Textilní substráty mohou nést součástky a propojovat je. Vlastnosti substrátů rozdělujeme na *elektrické* (vnitřní a povrchová rezistivita, E_p , ε_r , $\tan \delta$), *tepelné* (tepelná vodivost atd.) a *mechanické* (rozměrová stálost, roztažnost, nehořlavost atd.). Na rozdíl od klasických materiálů je textil pružný a mechanicky velmi poddajný.

1.1.1 Textilní vlákna

Spřádáním textilních vláken o různém počtu i průměru vznikají příze a tenčí nitě ze kterých různými výrobními postupy získáváme tkaniny, pleteniny a podobně. Zpracovávaná vlákna musí být dostatečně flexibilní, kvůli opakovanému ohýbání a kroucení, jež je nezbytnou součástí této přeměny. Současně by měla být vlákna velmi lehká a jemná (< 2,4 Tex). Obvykle nemají stejnou tloušťku po celé délce. Síla potřebná k jejich přetržení je definována jako mechanická pevnost. [8] , [11]

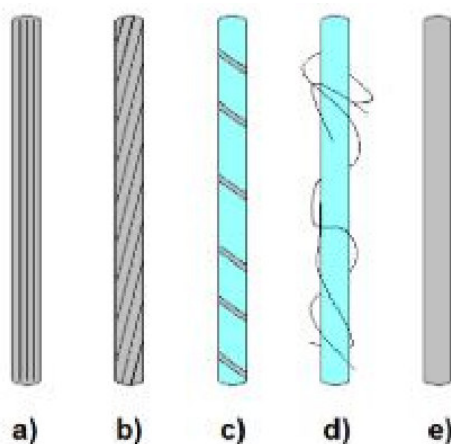
Tab. 1.2 Rozdělení textilních vláken. [12], [13]

Přírodní vlákna	
Rostlinná (na bázi celulózy)	ze semen (bavlna, kapok); ze stonků (konopí, len); z plodů a listů (kokosová, banánová)
Živočišná (na bázi bílkovin)	vlna, srst, žně; ze sekretu hmyzu (hedvábí)
Anorganická	z nerostů (azbest)
Chemická / Umělá vlákna	
z přírodních polymerů (modifikovaná celulóza)	VA - viskózová vlákna; AC - acetátová vlákna
ze syntetických polymerů	PAD - polyamid (nylon), PES - polyester (fleece, lycra), PUR - polyuretan (elastan, spandex), PAN - polyakrylnitril, PVA - polyvinylalkohol, POP - polypropylen, polyethylen
z anorganických surovin (nepolymerní)	z kovů (jednokomponentní, vícekomponentní); z nekovů (skleněná, minerální, keramická)

Přírodní vlákna jsou hydrofilní a většinou krátká (stample). Když navlhnou dojde ke zvýšení houževnatosti [11]. Nejpoužívanějším materiálem je bavlna. Syntetická vlákna jsou oproti bavlněným tenčí. V kombinaci s přírodními vlákny jsou výsledné tkaniny lehčí, méně mačkové, pevnější, trvanlivější i frekvenčně stabilnější. Většina polymerních materiálů jsou termoplastické nevodivé materiály ($\sigma < 10^{-12} \text{ Scm}^{-1}$). Jejich velkou výhodou je modifikovatelnost mechanického nebo chemického charakteru. Také se vyznačují malou navlhavostí (hydrofilní) a vysokou odolností vůči světlu. [4], [6], [9], [12], [14]–[16]

1.1.2 Vodivé nitě, příze a látky

Vodivé nitě (příze) se mohou tvořit různými strukturami z jednoho nebo více druhů vláken. Využívá se jak čistých kovových vodičů tak kompozitů kovů a textilu. V této kapitole jsou nastíněny tři základní principy k ovlivnění elektrických vlastností textilních vláken: plnění vláken uhlíkem nebo kovem; přirozeně vodivá vlákna nebo speciální úpravy nanesení vrstvy vodivých polymerů či kovů na vlákno. Liší se jak elektrickými vlastnostmi, tak spolehlivostí a mírou vhodnosti pro použití na oděvu. Kombinací se vyrábějí hybridní vodivé nitě, jejichž seznam výrobců je uveden v příloze A. [5], [17]



Obr. 1.2 Kategorie vodivých vláken: a) kovová příze; b) příze s kovovým povlakem; c) příze s kovovým vláknem ve struktuře; d) příze složená z kovových multivláken; e) potažené kovové vlákno. (převzato z [5])

1.1.2.1 Použití přirozeně vodivých vláken

Existuje celá řada přízí, od velmi jemných kovových vláken ovinutých kolem nevodivých, až po vlákna s kovovým jádrem pokrytým nevodivými nitěmi. K výrobě se používají slitiny železa, nerezová ocel, zlato, mosaz, nikl, titan, hliník, měď či stříbro a uhlík. Speciálními postupy lze vyrobit velmi tenký průměr v rozmezí 5 μm až 0,15 μm [7]. Pokud vodivé nitě obsahují kovy nebo jejich slitiny jsou pevnější, ale také méně roztahitelné a poddajné, což stěžuje zpracování. Zlepšení zpracovatelnosti lze dosáhnout kombinací kovových drátků s nevodivými vlákny (bavlna, PES, PAD). Na druhou stranu tím má finální příze vyšší elektrický odpor. V principu se rozlišují dva technologické postupy. Jednodušším je výroba, kdy se vodivé vlákno stočí s přírodním nevodivým vláknem v poměru 1:1. Druhou variantou je potom struktura, která vzniká spirálováním jedné součásti kolem druhé, přičemž nevodivé vlákno může být použito jednak jako plášť nebo jako jádro. Kovová vlákna můžou, ale nemusí být izolována. [4], [6], [11], [12], [15],

1.1.2.2 Vlákna speciálně upravena

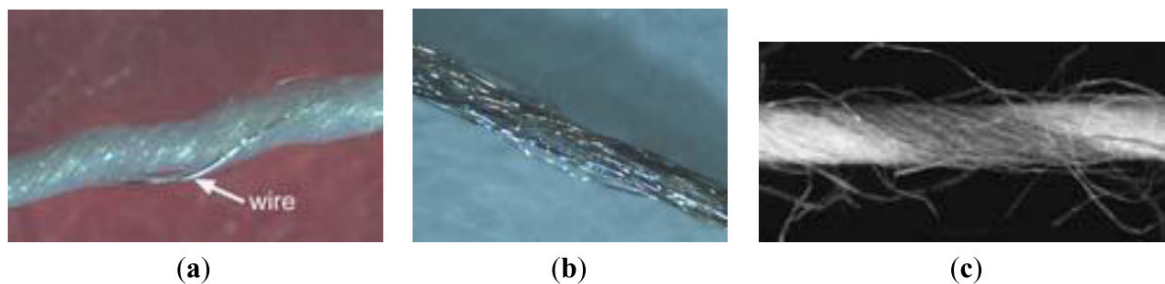
Zde jsou uvedeny typicky využívané materiály u speciálních úprav. Výsledná kombinace může ovlivňovat tuhost, roztažnost nebo jiné podobně jako u kovových vláken.

- *vlákna s vodivým povlakem*

Materiály rozlišujeme na organické (uhlíkové) a anorganické (kovové). Vodivý povlak lze na obyčejné nitě aplikovat technikou chemického (případně i galvanického) pokovování nebo vakuovým naprašováním [6]. Touto technikou se vyrábějí jak vlákna s potahováním solemi kovů (Cu, Al, Ni, Ag, Au), tak ta s uhlíkovou vrstvou. Na trhu jsou již několik let k dostání vodivé nitě na bázi umělých vláken potažených stříbrem. Tyto vodivé nitě mají lepší elektrické vlastnosti než hybridní vodivé nitě, ale jejich mechanická odolnost je nízká, neboť při namáhání dochází k obrušování stříbrných destiček. Tuto nevýhodu lze částečně ošetřit krycí vrstvou. [4], [12], [17].

- *použití vodivých polymerů*

Textilní substráty mohou být pro dosažení vodivosti pokryty polymery na bázi PPy, PANI, PEDOT, polyacetyleny, polythiophenu a dalších polymerů obsahující velké množství vodivých částic ve formě pevných sloučenin a kapalných disperzí nebo roztoků. Dramatické zvýšení vodivosti je u polymerů dosaženo za pomoci dopování příměsí typu P (akceptory) nebo N (donory). Lze vytvořit i elektronovou vodivost, ale převážně se využívá děrová. Vodivé anorganické tenké polymerní vrstvy mohou být nanесeny na textilní vlákno jednak již při jeho výrobě, tak až po zapracování do textilie. Aby se dosáhlo požadovaných vlastností lze před polymerací textilní substrát impregnovat monomery. [6], [8], [9], [12], [18], [19]



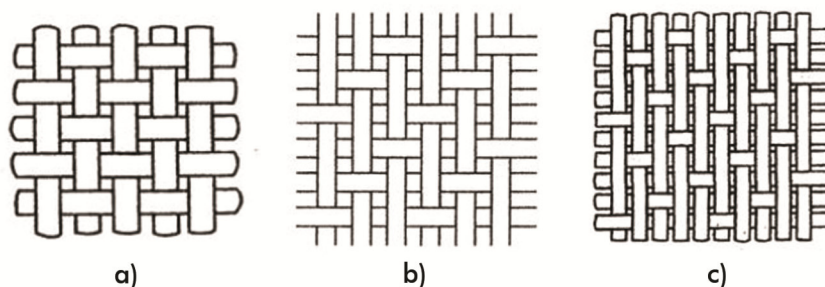
Obr. 1.3 a) kovové vlákno s přízí z polymeru; b) polymerní příze potažená tenkou kovovou vrstvou; c) vodivá příze složená z kovových multivláken. (převzato z [20])

1.1.3 Rozdělení textilních substrátů podle způsobu výroby

Většina textilních materiálů se vyrábí jako jednotlivé archy, jejichž vzhled a vlastnosti udává jejich konstrukce, struktura a tloušťka příze [8]. Gramáž textilie vypovídá o pevnosti a hustotě vazby [21]. Zpravidla se rozlišují 3 kategorie: tkaniny, netkané textilie a pleteniny. Ostatní typy látek tvoří kompozitní materiály. V případě vodivých textilií je důležitý povrchový odpor.

1.1.3.1 Tkaniny

Tkaním lze dosáhnout velice pravidelných a přesných struktur s relativně nízkou roztažností. Vazba u tkaných textilií je tvořena soustavou osnovních (svislé nebo podélné) a útkových (vertikální nebo příčné), tedy dvou na sebe kolmých nití. Při tkaní se natažená vlákna na rámu (tzv. osnova) provazují dalším vláknem, jež prochází celou šířkou osnovy bez přerušení. Plátňová vazba je nejjednodušší, zároveň však nejpevnější a nejhustější. Keprová vazba je měkčí a pružnější. Atlasová vazba vytváří hladký (lesklý) povrch a je volná, pružná, poddajná, dobře zadržuje tělesné teplo, ale také méně trvanlivá. Nejvíce používaná textilie pro výrobu oděvů tkanina PES/bavlna 65/35. [21]–[23]



Obr. 1.4 Typy základních vazeb tkanin: a) plátňová; b) keprová; c) atlasová.

Tkaniny mohou poskytovat komplexní síť kombinující čtené elektricky vodivé a nevodivé složky. Zhotoveny mohou být tak, aby měly více vrstev s vodivými vlákny napříč strukturou. Hodí se především pro tvorbu větších ploch. Problém může nastat u menších motivů, kdy je nutná úprava stříhem a podobně, jelikož jsou vodivá vlákna vedena celou šířkou tkaniny. Na okraji textilie může docházet k samovolnému páření a změně elektrických vlastností [5]. Taktéž je možné vodivou tkaninu zhotovit pomocí povrchové úpravy, kde existují dvě možnosti: tisk a galvanizace (Au, Pt, Cu, Ni, Zn). Vodivost substrátu galvanizací může být zvýšena galvanizací o dva až tři řády [11]. Funkcí těchto textilií bývá ochrana před elektrostatickým nábojem a elektromagnetickým rušením. [20]

1.1.3.1 Netkané textilie

Základem je vlákenné rouno, které se různými způsoby pojí. Rozlišujeme vázané mechanicky nebo pojené chemicky tekutými pojivy, termoplasty, postříkem, tiskem či speciálním způsobem napodobující výrobu papíru. Výroba netkaných textilií není tolik náročná na kvalitu vláken a technologii výroby, čímž je ekonomicky výhodná. [21] Pro výrobu moderních nanovláken se v současnosti jedná o nejvyužívanější technologii [6]. Netkané textilie jsou vhodnější pro potisk než tkaniny, jelikož jsou méně porézní. Pro tisk vodivého inkoustu figurovali například materiály jako Evolon® nebo Tyvek®. [24]

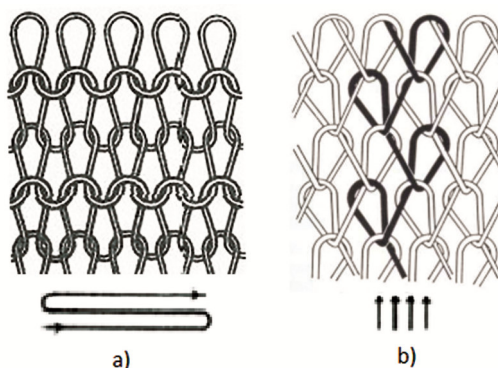
1.1.3.2 Vrstvené a laminované textilie (kompozity)

Kompozitní materiály z principu tvoří dvě nebo více různých vrstev. Rozeznáváme vrchový, výplňový a podšívkový materiál. Vrstvené textilie jsou prošité ve více vrstvách, laminované utváří například tkanina/plenina + polyuretan (PUR). [21]

Polymerní kompozity jsou heterogenní materiály se širokou řadou kombinací. Za určitých podmínek lze integrovat elektrovedné plnivo do polymerní matrice. Kromě kovových prášků na bázi různých modifikací uhlíku jako jsou částice grafitu a další formy alotropů uhlíku, uhlíkové saze, fullereny, uhlíkové nanotrubičky či grafenové nanodestičky nebo vodivé polymery (PANI, PPy). Za lehčený materiál je obecně považován ten obsahující dutinky (póry) nejrůznějších velikostí a tvarů, jež snižují hustotu původní hmoty. Lehčené polymerní hmoty se vyrábějí nejčastěji způsobem tzv. napěňování. Podle vlastností a charakterů pórů rozlišujeme měkké lehčené hmoty mechové a houbové, nebo tuhé lehčené hmoty pěnové a pórovité. K výrobě moderních multifunkčních lehčených materiálů je možné použít funkčních mikrorozměrových plniv i nanorozměrových. Přítomnost nanoplňiv může vést ve srovnání s neplněnými materiály k větší isotropii lehčené hmoty, ke vzniku pórů menších rozměrů a jejich větší hustotě. Plniva rovněž lze použít k dodání elektrické vodivosti. [25]

1.1.3.3 Pleteniny

Pletací příze jsou odolnější než vyšivací. Pleteniny se tvoří jednou soustavou nití uloženou vodorovně nebo svisle a očky, která se navzájem proplétají různým způsobem. Tažnost a pružnost souvisí převážně s velikostí ok a použitou vazbou. [6], [26] Pletené textilie jsou pružnější než tkaniny. Během pletení se může manipulovat s jednotlivými částmi vazeb na úrovni řádků i samotných oček, čímž je možné dosáhnout nepravidelných struktur. Různé vzory a možnosti jako vypuštěná vazba jsou podrobně popsány v [27].



Obr. 1.5 a) pletenina zátažná; b) pletenina osnovní

Pleteniny se rozdělují na dvě základní skupiny. Pleteniny zátažné oproti osnovním umožňují pouštění oček a paratelnost. Vznikají z vodorovné soustavy, osnovní vznikají ze svislé soustavy.[21] Pleteniny se obvykle vyznačují poměrně vysokou porozitou. Ta definuje podíl vzduchových mezer v pletenině. Pro zajímavost pleteniny pouze z konopí mají vyšší objemovou hustotu, nižší porozitu než v kombinaci s bavlnou [14]. Pletené textilie byly studovány za účelem vývoje druhů elektronických textilií, jako jsou snímače napětí, elektrody a roztažitelné propojení. Manipulace s konečnou vodivostí textilu může být prováděna změnou struktury úpletu. Hustější úpletová struktura bude vykazovat vyšší elektrickou vodivost. [7]

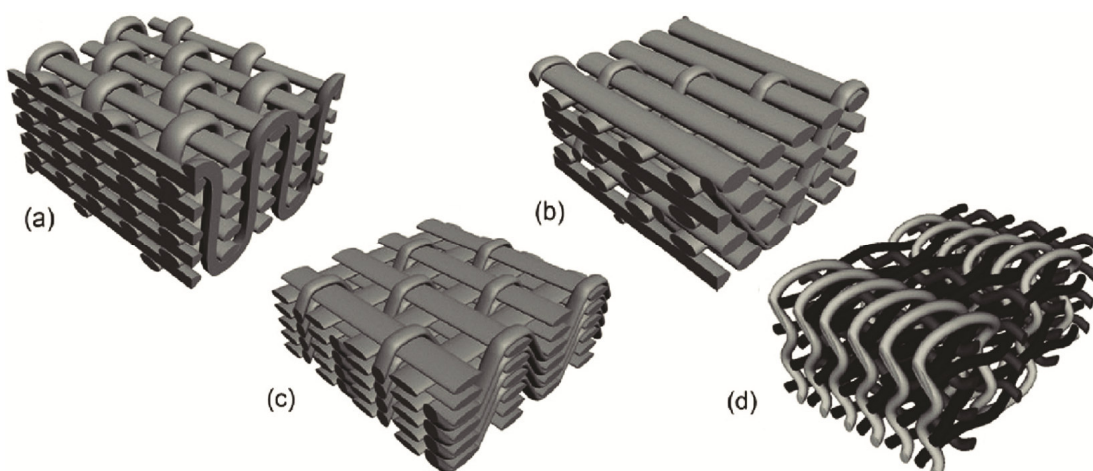
1.1.4 3D Textilie

3D textilní struktury disponují řadou vlastností. Označení 3D se používá pro trojrozměrné textilie s prostorovou orientací vláken nebo nití. Spodní a horní vrstvu tvoří textilie, které jsou propojeny navzájem. Mezi nitěmi se vyskytují vzduchové mezery, díky čemuž jsou tyto materiály vzdušné a velmi lehké, snadno tvárné a ohebné.

Výhodami 3D-textilu je, že lépe udrží tvar, a po stlačení nebo ohybu má tendenci vracet se do původního tvaru. Tyto vlastnosti spolu s proměnnou kapacitou kondenzátoru, která s tím souvisí, se jeví jako slibné řešení zabudovaných kapacitních senzorů v oděvech a matracích. Uplatnění lze očekávat především tam, kde nebude součástka tolik namáhána. [28], [29]

1.1.4.1 3D Tkaniny

3D tkaniny sestávají většinou z několika (4 až 80) vrstev nad sebou. Jednotlivé vrstvy se protkávají kolmo nebo příčně až třemi různými systémy vazných nití. Standardní tkací stroje se dají použít jen pro některé jednodušší typy.



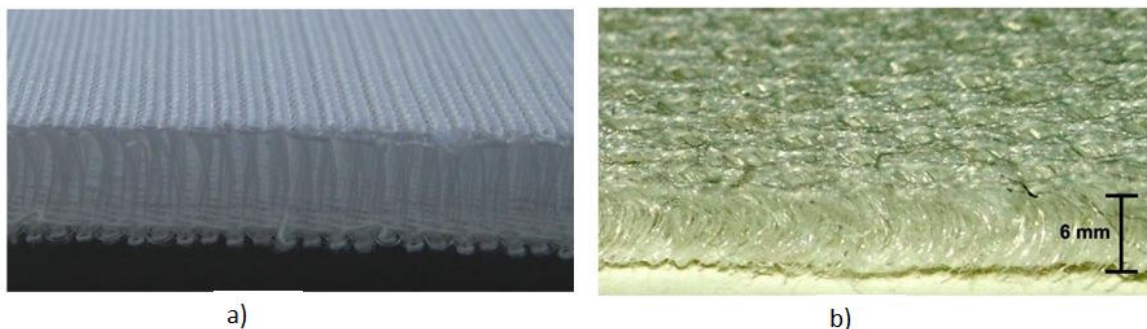
1.6 3D tkaniny: a) ortogonální; b) s prostorovou orientací vláken nebo nití; c) vícevrstvý princip; d) plně prokládané. [30]

3D tkaniny mohou být vyrobeny několika metodami. U *vícevrstvého principu* je struktura složena z několika tkanin spojených nitěmi s vysokou pevností. *Ortogonální princip* sestává ze tří systémů nití, které k sobě navzájem stojí kolmo, takže vytváří prostorový útvar. Další druhem jsou *tkaniny s vypuklinami*, které se buďto lisují do formy nebo sešívají z patřičně nastříhaných dílů. *Distanční tkanina* sestává ze dvou tkanin spojených vázanými osnovními nitěmi. Výztuž kompozitů je většinou tkána z ultra pevných filamentů. *Záhybová 3D tkanina* vzniká ve tvaru smyček, nebo spojnic dvou vrstev tkaniny, které se dají zpracovat do různých tvarů.

1.1.4.2 Pletené a splétané 3D textilie

Trojrozměrné textilie se vyrábí také pletené a splétané [31]. 3D pleteniny je možné vyrábět na běžném typu pletacího stroje, který se používá k výrobě konvenčních pletacích struktur, což umožňuje využití stávajícího zařízení bez nutnosti úprav. Ještě důležitější je, že zahrnutí vodivého prvku do konstrukce tkaniny odstraňuje potřebu dalších kroků jako je lepení nebo šití. 3D pletené textilie sestávají ze dvou vrstev, které jsou spojeny vrstvou obvykle syntetických monofilních vláken. [28]

3D textilie v nestlačeném stavu sestávají hlavně ze vzduchu. Objem materiálu tvoří jednotky procent (cca 5%). 3D pletenina na obr 1.7 vpravo se hodí pro snímače stlačení silou o rozsahu v jednotkách Newtonů. Takový tlak je vyvíjen například v oblasti pánevní kosti. Textilní pletenina s označením 3D043 se v některých případech používá jako čalounění v automobilu, v autosedačkách nebo nemocničním lůžku. [32]



Obr. 1.8 a) 3D043; b) 3D pletenina z PES přízí o stlačitelnosti 50% při 2,3 N [32].

1.2 Možnosti tvorby motivů na textilní substráty

K vytvoření elektricky vodivých motivů na textilních substrátech se využívá několik druhů technik od nanášení vodivých vrstev přímo na textil, vyšívání vodivých nití, nebo tkaní či pletení vodivých vláken spolu s nevodivými. V této kapitole jsou nastíněny cesty pro integraci elektronických zařízení, senzorů a propojení na textilní substráty nebo předem vyrobené oděvy.

1.2.1 Vyšívání a obšívání

Vodivé nitě (příze) se pro vytváření textilních, elektrických obvodů se přímo nabízí, díky snadné implementaci jednoduchých i složitějších motivů přímo na substrát [4]. Vyšíváním lze dosáhnout menších a flexibilnějších motivů než při tkaní. Výhodou je také absence lepidla, používaného u tisku nebo nažehlování, což přispívá k větší dlouhodobé odolnosti vůči vnějším vlivům a opotřebením. [5] Strojní šicí jehly se vyrábí ze železa, oceli, chromu, tvrdokovu, nitridu titanu nebo technického diamantu, přičemž na materiálu závisí tvrdost jehly (HV). Jehly k vyšívání mají oproti těm k šití větší ouško [16]. Špice jehel bývá různě tvarovaná a dlouhá. Taktéž je podstatná správná volba povrchové úpravy jehly. Jehly s ostrým hrotem jsou vhodné pro všechny druhy tkanin. Zakulacené a kulaté se používají u pletenin a syntetických materiálů. Nicméně syntetické materiály přes všechny své výhody jsou pro vyšívání nejhorší volba, neboť jejich vlastnosti nejsou příliš vhodné pro kvalitní udržení stehů. [12], [33], [34]

K dispozici je řada různých druhů stehů, které rozděluje norma ISO 4915 do několika tříd podle počtu nití a jehel, jenž jsou zapotřebí viz *příloha D*. Stehy mohou být vytvořeny buď *skrz* materiál, *na* něm nebo *uvnitř*. Motivy je možné vytvořit jednoduše až po nastříhání plátna a to v podstatě v libovolném tvaru bez ohledu na cestu příze v textilním substrátu. Problém také může nastat u vyšívání vodivými nitěmi pnutím na nit, které běžně vede k jejímu přetržení. V textilním průmyslu to nehraje roli, ale u e-textilu ano, protože větší spotřeba sebou nese vyšší elektrickou rezistivitu. U vyšitých motivů se hodnota elektrického odporu zvyšuje se šířkou struktury. To může být způsobeno vzájemným propletením vodivých a nevodivých vláken textilního substrátu zvláště u plných struktur. Mezi nejpodstatnější parametry tak při zhotovení výšivek vodivými nitěmi patří směr vyšívání. Bylo zjištěno, že vyšívání ve směrech $-y / x$ je výhodnější oproti směrům y / x . Na to je potřeba brát ohled především při vyšívání motivů s delší trajektorií. Někjaká manipulace s konečnou vodivostí textilu může být prováděna také změnou délky stehu. [6], [7], [9], [12]

Další technikou šití je metoda **obšívání**, kdy je vodič k textilnímu substrátu pouze přiložen a přišit pomocí obyčejných nití. Při této metodě sice nedochází k takovému namáhání vodivých vláken jako u vyšívání, avšak možnosti integrace jsou omezenější. [9]

1.2.2 Nažehlování

Dosažení optimálního výsledku při nažehlování na textilie závisí na správně nastavené teplotě, čase a tlaku s ohledem na použitou fólii. Důležité je rovnoměrné rozložení tlaku, obzvláště v místech záhybů, švů, kapes apod. Nastavení tlaku je potřeba přizpůsobit tloušťce textilie. Obvykle se postupuje metodou pokus omyl. Po několika pokusech nabyté zkušenosti umožní správně nastavit tlak pro různé materiály. Před zažehlováním je potřeba nahřát tepelný lis (termolis) po dobu 30 vteřin sklopením horní výhřevné desky a nechat jej zavřený. Doporučuje se také potiskovaný textil předžehlit po dobu asi 10 s. Během zažehlování se překryje motiv pečicím papírem nebo teflonovým archem. Po zažehlení se materiál lehce roztáhneme, aby se dobře nosil, nechá materiál vychladnout a teprve poté se sundá nosná podložka fólie, pokud je potřeba.

Mezi běžně dostupné fólie, které se využívají v textilním průmyslu, patří gumové materiály Flex a materiály s jemným semišovým povrchem Flock viz *příloha B*. Flexové fólie nepotřebují přenosovou fólii a směr řezu je zrcadlově. Potisknutelné flockové fólie také obvykle nepotřebují přenosovou fólii, ale směr tisku a řezu je většinou pozitivně. Přenosová fólie se aplikuje v případě potisknutelných flexových fólií na vytištěné motivy. Nutno podotknout, že potištěný textil se doporučuje prát max na 40°C bez použití agresivních pracích prášků. Problémem bývá dále sublimace, již sou některé textilie barvené. Vysoká teplota při zažehlování způsobí uvolnění sublimační barvy a její proniknutí do potisku tzn. zbarvení fólie barvou textilu, na který se nažehluje. Tomu zabrání použití fólie typu Blockout. Nelze však zabránit zbarvení fólie shora, proto se textil se sublimací nesmí skládat nebo pokládat na sebe ihned po zažehlení. Jednotlivé vrstvy je nutné oddělit listem papíru. Výsledný obvod lze typicky nažehlit v libovolné poloze. Při nažehlování dojde k určitému seškvaření u textilií z umělých vláken, což má zásadní vliv na dielektrické vlastnosti. Pro zlepšení vlastností textilního substrátu bylo experimentováno s impregnačními vrstvami polyuretanu vytvrzovanými UV světlem před a po nanesení elektricky vodivého motivu. Termoplastická fólie nejen zapouzdřuje inkoust, chrání jej před mechanickým poškozením. U textilií impregnovaných proti vlhkosti se stává, že lepidlo řádně nepronikne do látky. Zpravidla nevhodné bývají textilie s posilikonovaným povrchem. [7], [9], [18], [35], [36]

1.2.3 Tisk

Tisk, bez ohledu na oblast průmyslu, může být levný a velmi výkonný proces. Pro rozvoj nízkonákladové flexibilní elektroniky a masivní rozšíření nositelných zařízení se tak jedná o rozhodující technologii pokrývající širokou škálu řešení od široce rozšířeného sítotisku přes velkoplošné, vysokorychlostní metody jako hlubotisk a ofset, až po varianty selektivních bezdotykových depozičních procesů. Společným jmenovatelem je využití nové generace funkčních organických, anorganických i hybridních materiálů, které mohou být rozpustné v běžných rozpouštědlech a efektivně nanášeny. Tisknout lze vodivé i nevodivé barvy. Mezi požadavky na tiskové formulace patří nízkoteplotní zpracování, chemická stabilita a cena. Správná volba viskozity je zásadní a umožňuje potisknout různé substráty včetně textilií. [29] Malá hustota tisku vede k nespojitostem motivu. Naopak příliš velká hustota způsobuje špatné zachytávání a její následné rozmazání nebo rozpětí barvy. Kromě viskozity [Pa·S] je vhodné se pozastavit nad povrchovým napětím [nN/m] a přilnavostí tištěné vrstvy. [5], [9] Tyto parametry určují do jaké míry se barva vstřebá do tkaniny. Při tisku funkční pasty na tkaniny představuje komplikaci hrubý povrch. Z tohoto důvodu se typicky tiskne propojovací vrstva. Mimo dosažení hladkého povrchu je při dalším tisku drahých inkoustů možné spotřebovat jejich menší množství. Pro natištěné motivy o tloušťce do 200 μm se očekává, že budou vhodné pro většinu aplikací založených na tkaninách. Většina tištěných dielektrik (BaTiO_3 , PVP) se používá k zapouzdření, izolaci nebo jako funkční vrstva kondenzátoru. Vodivé barvy lze rozdělit do dvou kategorií: barvy s příměsí kovových pilin (Ag, Au, Ni, uhlík) nebo využití vodivých polymerů [6]. Často se využívá stříbrná pasta nanášená sítotiskem. K nejznámějším organickým materiálům pro praktické využití patří vodou ředitelný vodivý polymer PEDOT:PSS. [24], [37]–[39]

1.2.3.1 Sítotisk a šablonový tisk

Postup sítotisku se skládá z nanesení pasty, sušení a výpalu. Pasta se pomocí třerky protlačuje oky síťoviny (síta) nebo předem vytvořené šablony. Pro zajištění kvalitního tisku je zásadní rovnoměrné napnutí síta v rámu po celé ploše za pomoci pneumatického nebo mechanického zařízení. Nanáší se obvykle dvě vrstvy s mezifází, kdy dojde k zafixování první vrstvy. Opakovaným přetiskem lze vytvářet tlusté vrstvy (cca 1-300 μm). Plusem sítotisku je rozsah viskozit past (1 ÷ 150 Pa·s). [18] Nevýhodou může být náročnější příprava motivu na síto u šablonového tisku. Během *přímého* způsobu se obrazec přenáší pomocí světelné expozice. V zatemněných prostorech se nanese fotocitlivá

emulze (fotorezist) na síto a následným osvětlením (UV) dojde k vytvrzení míst nebo narušení míst. Délka doby osvětlení závisí na výkonu lampy a výšce vrstvy emulze. U *nepřímé* metody se na kovovou fólii pomocí laseru nebo vyleptání vytvoří požadovaný motiv. Problém spojený s fotolitografií vězí v použití leptacího prostředku, neboť dochází k nerovnostem při leptání. [5], [40]

1.2.3.2 Tiskové metody pro laboratorní účely

Bezkontaktní aditivní technika s přímým zápisem ink-jet významně snižuje počet kroků, spotřebovanou energii a generovaný odpad oproti subtraktivní procesům [23]. U inkoustových tiskáren rozlišujeme dva základní typy. Při *kontinuálním* tisku jsou kapičky inkoustu vystřelovány a na substrát dopadnou pouze ty elektricky nabitě, které nebyly vychýleny pomocí vychylovací elektrody. U *Drop-on-demand* jsou kapičky vystřelovány pouze tehdy, pokud mají být natisknuty. U materiálů s vysokou viskozitou jako jsou organická dielektrika nebo inkousty z anorganických kovů dochází k potížím způsobeným ucpáním trysek. [7] Speciálně při aplikaci na textilní substráty existují nevýhody. Natištěná vrstva může být velmi tenká v mikronovém nebo submikronovém rozmezí, ale tak malé rozměry obvykle vyžadují vytvrzovací teploty nad limit většiny tkanin ($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Tenkost vrstvy ztěžuje překonání drsnosti povrchu textilií, jež vyžadují kontinuální vodivé motivy. [24] Bylo použito několik materiálů jako nanočástice kovů, vodivé polymery, uhlíkaté materiály. Jako substrát se používá například PEN. [38]

- ***Aerosol Jet Printing (AJP)***

AJP využívá aerodynamického proudu nosného plynu pro soustředění aerosolu deponovaného materiálu na přesně definovanou plochu substrátu. Velkou předností je schopnost vytvářet velmi jemné motivy (od $8\text{ }\mu\text{m}$). K výhodám patří též malé vstupní množství inkoustu, jeho nízká spotřeba a bezkontaktní průchod inkoustu tryskou, čímž nedochází k ucpávání trysky. Zařízení dovede bez problémů nanášet materiál i na velmi hrubé a flexibilní substráty či miniaturní 3D struktury. Rozdíl výšky při tisku mezi nejnižším a nevyšším bodem bývá cca 1 cm. Laser blízko tiskové hlavy slouží k selektivnímu vytvrzování inkoustů a pracuje v kontinuálním režimu. Celá sestava systému je z důvodů zajištění vysoké stability a odolnosti proti vibracím fixována na podkladové granitové desce. V zařízení je také integrován kamerový systém s možností měření a online kontroly. Možné je použít široké spektrum viskozit inkoustů jako například uhlíkové nanotrubičky nebo bioaktivní materiály. [41]

1.3 Charakteristické vlastnosti kondenzátorů

Kondenzátory jsou základní pasivní elektronické „součástky“ různých tvarů a konstrukcí. V elektrotechnickém průmyslu se kondenzátory využívají ke zpoždění napěťových změn při spojení s rezistorem, k filtraci nechtěných frekvencí, při vytváření rezonančních obvodů, při výrobě frekvenčně závislých i nezávislých napěťových děličů nebo jako dočasný zdroj napětí. Hlavní funkcí je akumulovat energii v podobě elektrického náboje. Schopnost uchovávat elektrický náboj se definuje jako kapacita a typicky se u běžně používaných kondenzátorů pohybuje od jednotek pF do mF. Podle provedení se rozlišují na pevné (s neproměnnou kapacitou) a proměnné (ladicí a doladovací). V principu se kondenzátory skládají ze dvou navzájem izolovaných vodivých desek (elektrod). Struktura tedy vyžaduje dva funkční materiály: vodič a dielektrikum. Každé dielektrikum je izolant, ale ne každý izolant je dielektrikum. [9], [23]



Obr. 1.9 Schematická značka kondenzátoru.

Ideální kondenzátor má nekonečný paralelní elektrický odpor a nulový sériový. Paralelní souvisí s vodivostí dielektrika, kdy může vzniknout svodový proud mezi elektrodami. Sériový odpor R_s je určen odporem elektrody a $\tan \delta$ dielektrika. Pro každý reálný kondenzátor platí, že má odpor a vlastní parazitní indukčnost. Ta snižuje vlastní rezonanční frekvenci součástky a omezuje frekvenční rozsah. Na povrchovém odporu je závislý faktor kvality. Tyto parametry do jisté míry závisí na konstrukci kondenzátoru. [42]–[44]

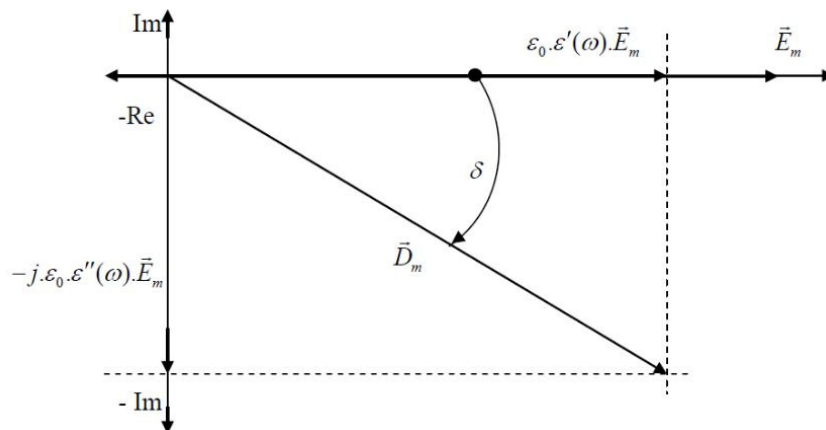
1.3.1 Dielektrické materiály a jejich vlastnosti

Jsou-li dielektrika vloženy mezi elektrody na které je přivedeno elektrické napětí disponují schopností se polarizovat a tvořit vlastní elektrické pole. Dielektrikum nedovolí, aby se částice s nábojem opačné polarity na elektrodách, které se vzájemně přitahují elektrickou silou, dostaly do kontaktu, čímž by došlo k neutralizaci, tedy vybití elektrických nábojů. Polarizace představuje elektrickou orientaci atomů (iontů). Jev, kdy dochází k posuvu elektronů proti směru vnějšího pole a protonů po směru. Dielektrika jsou materiály s definovanou relativní permitivitou ϵ_r . Ta se spočte jako poměr kapacity

kondenzátoru s dielektrikem C_x a kondenzátoru s vakuem C_0 . Udává, kolikrát vzroste kapacita kondenzátoru, pokud dielektrikum tvoří daný materiál. Do hodnoty 2,5 se jedná o nepolární izolační materiály. [45]

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (1.1)$$

Vlastnosti dielektrik ve střídavém elektrickém poli se vyjadřují pomocí komplexní permitivity. Ta se skládá ze dvou složek: reálné a imaginární. Reálná složka je mírou kapacitního charakteru dielektrika, známá právě pod pojmem relativní permitivita. Imaginární složka komplexní permitivity se nazývá ztrátovým číslem a je úměrná dielektrickým ztrátám. Dielektrickými ztrátami rozumíme přeměnu části elektrické energie na teplo. Veličina, která tento jev popisuje a udává míru ztrát, se označuje ztrátový činitel $\tan \delta$. Jinak řečeno čím menší jsou ztráty, tím je vyšší efektivita dielektrika. Zároveň čím vyšší je $\tan \delta$, tím větší výkon je přeměněný na teplo a tím větší je i teplota dielektrika. [46]



Obr. 1.10 Grafické vyjádření komplexní permitivity. (převzato z [46])

- **Dielektrická pevnost**

Dielektrická pevnost je definována jako odolnost vůči elektrickému poli. Ideální dielektrikum neobsahuje žádné volné nosiče náboje a nemělo by tedy dojít k elektrickému průrazu na rozdíl od reality. Průrazné napětí závisí na vzájemném uspořádání dielektrika a elektrod a na rychlosti růstu napětí na elektrodách. Skutečná dielektrická pevnost bývá daleko nižší než teoretická, jelikož dielektrikum vždy obsahuje mikroskopické defekty. V případě tenkých vrstev bývá vyšší než u silnějších téhož materiálu. [47]

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (1.2)$$

1.3.2 Nabíjení a vybíjení kondenzátorů

Množství uložené energie se rovná práci vynaložené na nabití kondenzátoru [44]. Náhlé nabíjení nebo vybíjení může být pro kondenzátory škodlivé. Při větší kapacitě teče kondenzátorem větší proud. Intenzita proudu při nabíjení vybitého kondenzátoru nejprve okamžitě vzroste, pak pomalu klesá. Také vybíjení nejprve probíhá rychle, později pomalu. Za časovou konstantu τ je kondenzátor nabit zhruba z 63%, na maximum potom za 5τ . Po nabití kondenzátor přerušuje stejnosměrný obvod. Po čase 5τ , jak při vybíjení tak nabíjení, prakticky teče pouze proud, který lze zanedbat. Liší se směr. Vybíjecí proud má po čase τ velikost cca 37%. [48] Základní vztah:

$$\tau = R \cdot C \quad (1.3)$$

1.4 Provedení planárních kondenzátorů

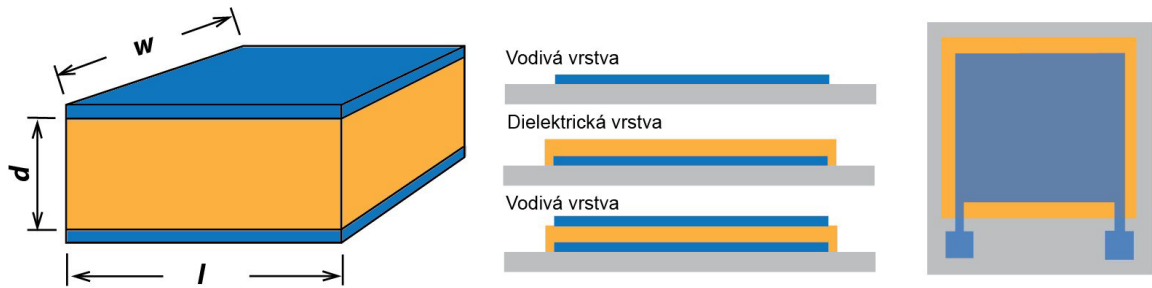
Planární součástky se vyznačují malou profilovou výškou podobně jako textilie. Podle způsobu fyzického oddělení elektrod kondenzátoru, lze rozlišit dvě hlavní koncepce: oddělení pomocí dielektrika, nebo pomocí elektrolytu.

1.4.1 Oddělení elektrod pomocí dielektrika (elektrostatické)

Elektrostatické pole existuje v okolí elektrického náboje, který je konstantní v závislosti na čase. Elektrostatické pole je tedy, na čase nezávislé, představuje určitý ustálený stav a může být pouze v prostředích, kde neexistují volné, pohyblivé elektrické náboje tj. v izolantech. Vložením nenabitého tělesa do vnějšího elektrostatického pole, dochází k vytvoření vázaného náboje (vlivem polarizace), který má dvojitý účinek. Jednak mění velikost původního pole uvnitř tělesa i v jeho okolí, jednak deformuje siločáry a ekvipotenciály. [45] Nosným strukturním prvkem v případě oddělení elektrod pomocí dielektrika je interdigitální uspořádání nebo třívrstvé s rovnoběžnými deskami. Pro stejnou hodnotu kapacity mají IDC oproti sendvičovému typu větší velikost. Vlastnosti, čímž i výkon, významně ovlivní v obou případech tloušťka, topologie a materiál. Do jisté míry na konstrukci závisí i další nežádoucí parametr, vlastní parazitní indukčnost. Kondenzátory vyžadují nízkou teplotní zpracovatelnost základní dielektrické vrstvy [24]. Typicky jsou dosahovány kapacity v řádu $\sim 10^{-7} \text{ Fcm}^{-2}$, s hustotou náboje $\sim 10^{-13} \text{ Fcm}^{-2}$. V dielektriku je potenciálový gradient v celé vrstvě konstantní a dochází k lineárnímu poklesu. [18]

1.4.1.1 Tří a vícevrstvé uspořádání s paralelními deskami

Tří a vícevrstvé uspořádání s paralelními deskami označuje tzv. sendvičové kondenzátory. Pro dosažení požadované kapacity může být při návrhu měněna plocha a tloušťka dielektrické vrstvy. [24]



Obr. 1.11 Překryvné uspořádání kondenzátoru. [26], [49]

Je-li dielektrikum lineární, pak pro energii elektrického pole akumulovanou v nabitém kondenzátoru platí: [44], [48], [50]

$$W = \frac{Q^2}{2 \cdot U} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (1.4)$$

Kapacita, neboli schopnost kondenzátoru ukládat energii v podobě elektrického náboje, se definuje se s ohledem na použité napětí: [44]

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1.5)$$

Pokud se mění kapacita s napětím, lze přepsat takto:

$$C = \frac{dQ}{dU} \quad (1.6)$$

Napětí na celé součástce lze vypočítat: [50]

$$U = \frac{Q \cdot d}{\varepsilon \cdot S} \quad (1.7)$$

Což vede k základnímu vztahu pro teoretickou elektrostatickou dvouvrstvou kapacitu, která platí pro deskový kondenzátor [6], [48]:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d} = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \quad (1.8)$$

Čím větší je relativní materiálová permitivita dielektrika, plocha elektrod a menší tloušťka dielektrika, tím větší je kapacita. Uvedený vztah je použit pouze pro představu.

Napětí na nabitém kondenzátoru je stejné, jako je napětí zdroje. Jinými slovy, je stejné jak mezi elektrodami, tak na vodiči, kterým bychom jej spojili zvenčí. Můžeme ho také vyjádřit jako rozdíl elektrostatických potenciálů obou elektrod [50]:

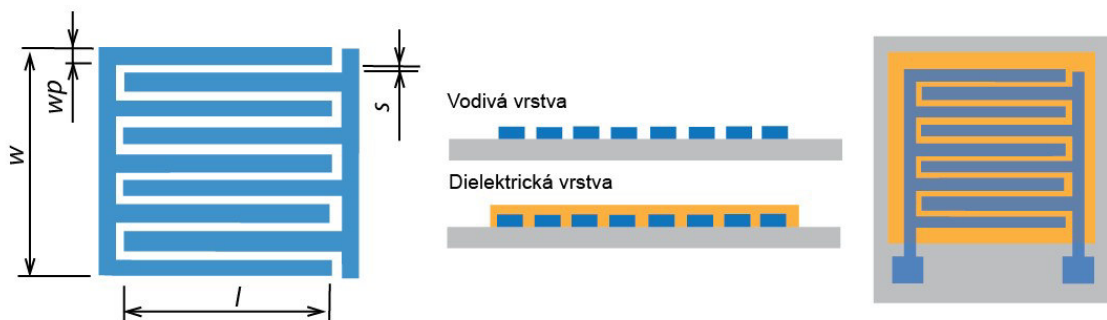
$$U = \int E \cdot dl = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (1.9)$$

Při řešení RLC obvodů pomocí diferenciálních rovnic se využívá následujícího vztahu [50]: Ve střídavém obvodu proud na kondenzátoru předbíhá napětí o 90°.

$$i_c = C \cdot \frac{du_c}{dt} \quad (1.10)$$

1.4.1.2 Interdigitální uspořádání

Interdigitální kondenzátory (IDC) využívají kapacitu vyskytující se v mezeře mezi vodiči, mají pravidelnou strukturu a obecně se umísťují na povrch, ale mohou být zabudovány i ve vícevrstvé struktuře. Typicky dosažitelné hodnoty kapacity jsou v řádu jednotek až stovek pF, přičemž závisí na konstrukci a výrobní technologii kondenzátoru.



Obr. 1.12 Interdigitálně strukturovaný kondenzátor. [9], [24]

Mimořádně důležitá je tolerance výrobního procesu, vysoká vodivost elektrod a aby dielektrikum bylo rovnoměrné a izotropní. Pro dosažení požadované kapacity může být při návrhu měněna mezera a délka elektrod. Toto uspořádání vyžaduje pouze dvě vrstvy namísto tří při porovnání s deskovou strukturou, proto je IDC v zásadě snazší aplikovat. [24] Toto řešení, vykazuje vyšší spolehlivost. Nemůžou však konkurovat výkonem, kvůli menší plošné hustotě náboje [39].

Mezery jsou v podstatě velmi dlouhé, úzké, složeny tak, aby využívali malou plochu. Zmenšení mezer(y) umožňuje získat silnější elektrické pole a tím pádem vyšší akumulaci náboje, určující kapacitu. Dále může být kapacita zvětšena počtem prstů, jejich velikostí nebo nahrazení dielektrického substrátu za jiný, který má větší materiálovou konstantu. Pokud jako elektrody slouží dva vodiče vedle sebe vznikají parazitní kapacity. [6], [49]

Vztah pro výpočet kapacity, kde t je tloušťka / výška vodivé vrstvy, n počet prstů, wp šířka prstů, s mezera mezi nimi, w šířka a l délka [9] :

$$C_s = \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\epsilon_r + 1}{2}}{\ln\left(\frac{\pi \cdot s}{wp + t} + 1\right)} \cdot l \cdot \frac{n}{2} \quad (1.11)$$

Výpočet činitele kvality pro kapacitor [9]:

$$Q = \frac{1}{tg\delta} \quad (1.12)$$

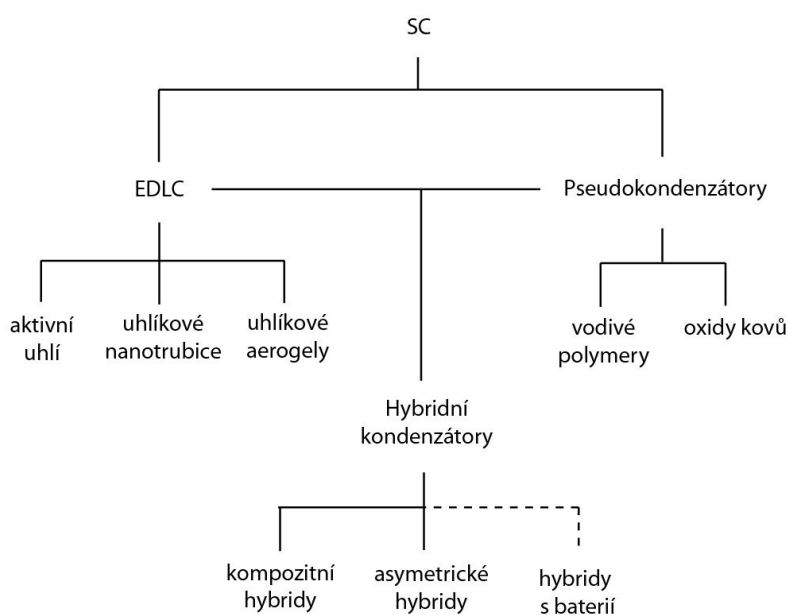
$$tg\delta = \omega \cdot C_s \cdot R_s = \frac{1}{\omega \cdot C_p \cdot R_p} \quad (1.13)$$

Při návrhu je třeba vyhodnotit vlastní parazitní indukčnost elektrod, která se liší pro různé elektrody. Zmenšením mezery ji lze redukovat, ale vede to k vyšší vlastní rezonanční frekvenci. [49] Pokud se zvýší relativní permitivita dielektrika, tak frekvenční odezva reaguje posunem na nižší frekvenci. Při konfiguraci má IDC rezonanční frekvenci, která se vyskytuje kolem čtvrtiny vlnové délky. Tato rezonance se objevuje v důsledku parazitní indukčnosti vazebního účinku mezi prsty a nastává, když konfigurace má počet prstů více než 3. Vztah mezi délkou prstu, šířkou prstu a mezerou prstu k rezonanční frekvenci lze přesně určit. Čím delší je prst, tím nižší je rezonanční frekvence, přestože vliv mezery prstů vytváří inverzní vztah rezonanční frekvence. [51]

1.4.2 Oddělení elektrod pomocí elektrolytu (elektrochemické)

Využití elektrolytických materiálů namísto dielektrik je alternativní cestou, zejména kvůli podstatnému snížení pracovního napětí. Doposud byla studována řada elektrolytických materiálů zahrnujících iontové kapaliny, iontové gely, polymerní elektrolyty a anorganické iontové materiály. Atraktivní se obzvlášť jeví zapracování elektrolytů do tisku, protože kapacita tohoto materiálového pojetí není příliš závislá na nerovnosti či nehomogenitě. Komplikace může spočívat v kompatibilitě s dalšími materiály, především kvůli vzájemnému rozpouštění. Také polarizační časy v elektrolytech jsou podstatně delší, než u dielektrik, vzhledem k omezené pohyblivosti iontů. Zároveň je potřeba respektovat elektrochemické okno napěťové stability. [18] Běžné vodné elektrolyty jsou zásadité a kyselé, mají okno asi 1 V, organické 2,7 V. K přenosu iontů mezi elektrodami v byly široce používány vodné gelové *elektrolyty* na bázi polyvinilalkoholu jako PVA/H₂SO₄, PVA/KOH, PVA/LiCl nebo PVA/H₃PO₄ [39]. Nejběžnější organické elektrolyty jsou TEABF₄ v propylenkarbonátu (PC) nebo acetonitrilu (AC). [8]

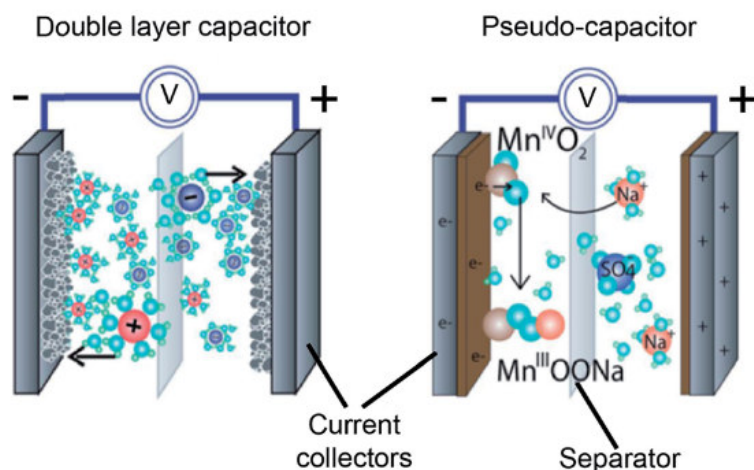
Elektrochemické kondenzátory tzv. Superkondenzátory se liší oproti klasickým elektrostatickým v mechanismu skladování energie a dosahují velmi vysokých úrovní plošných kapacit v řádu jednotek až desítek $\mu\text{F}/\text{cm}^2$, díky mnohem vyšší hustotě nosičů náboje ($\sim 10^{-14} \text{ cm}^{-2}$). Existují dva principy z hlediska procesů na rozhraní, které přispívají k celkové kapacitě. [8], [18], [52]



Obr. 1.13 Schématické rozdělení elektrochemických kondenzátorů.

Enormní kapacita *EDLC* je daná tenkostí izolační oblasti d , velikostí elektrod a jejich vodivostí. Použití tuhého elektrolytu omezuje napětí, nejčastěji na 2-3V, neboť elektrody jsou od elektrolytu izolovány pouze elektrochemickým potenciálem, kdy roli dielektrika přebírá rozhraní. Důsledkem extrémně malé tloušťky se liší rozložení intenzity elektrického pole oproti konstrukcím s dielektrikem. Potenciálový spád na dvojvrstvě je lineární a velmi strmý. Navzdory jasným výhodám, jako je rychlejší nabíjení, neomezená životnost cyklu a rychlý provozní režim, superkondenzátory stále nabízejí pouze nízkou hustotu energie a rychlý pokles napětí. Velký problém právě při sériovém řazení je jejich vysoká náchylnost na přepětí. Jsou také náchylné na vysoké teploty. Většinou se udává max. dovolená teplota 60 - 70°C. Tyto kondenzátory bývají zapouzdřeny po vícero a zapojeny sériově. Pro elektrody se využívají materiály jako aktivní uhlí, uhlíkové nanotrubičky a uhlíkové materiály. Konkrétně grafen se ukázal jako atraktivní vodivostí, vysokou energickou hustotou a nízkým výrobním nákladům. [8], [18], [44], [50]

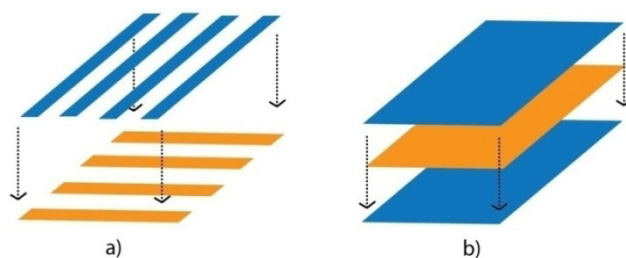
Pseudokondenzátory, neboli redoxní superkondenzátory můžou mít kapacitu 10 až 100 krát vyšší než *EDLC* [53]. Energetické hustoty jsou vyšší, protože pseudokapacitní mechanismus je faradaický proces. Skladování probíhá elektrochemickým principem pomocí přenosu náboje redoxními reakcemi, které jsou na povrchu nebo v blízkosti velmi rychlé. Používané materiály zahrnují vodivé polymery a několik oxidů kovů (RuO_2 , MnO_2 , Co_3O_4). [8], [44]



Obr. 1.14 *EDLC* a pseudokondenzátor. (převzato z [54])

1.5 Kondenzátory realizované na textilních substrátech

Textilní kondenzátory mohou být buď k textilnímu substrátu přišity, přilepeny či přichyceny, nebo mohou být včleněné přímo do textilie. Pokud jsou kondenzátory realizovány na textilním substrátu znamená to o strategii návrhu, kdy se postupuje shora dolů. Tvorba textilních sendvičových kondenzátorů je možná skládáním vrstev. U planárních interdigitálních kondenzátorů (IDC) se využívá především tisk nebo vyšívání. Dosažené kapacity u celo textilního provedení se pohybují od 1 pF do 1 nF [11]. Obecně byla přijata sendvičová architektura, což ale naráží s kompatibilitou jednovrstvých technik zpracování tkanin v konvenčním oděvním průmyslu. Právě v snazší a pohodlnější integrovatelnosti by měla tkvět hlavní výhoda flexibilních textilních kondenzátorů oproti konvenčním tuhým součástkám. Sendvičově strukturovaný (super)kondenzátor podporující jedinou tkaninu lze zkonstruovat stohováním elektrod a elektrolytu na stejné straně hedvábné tkaniny. [6], [39]



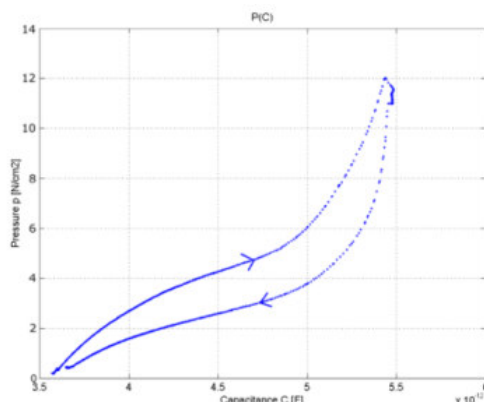
Obr. 1.15 a) Kapacita mezi vlákny; b) kapacita mezi vrstvami látky.

1.5.1 Provedení funkčních vrstev

Při použití již zavedených textilií se musí počítat s tím, že nebyly určeny pro použití v elektrotechnice. Tudíž se v nich mohou vyskytovat nehomogenity, nevhodné elektrické vlastnosti, případně může materiál obsahovat spoustu nechtěných chemických prvků a přísad. [29] Stabilita obecně je klíčovým problémem všech flexibilních funkčních struktur. U nositelných aplikací bude docházet k různým ohybům při kterých nesmí dojít k výraznému zhoršení elektrických vlastností [1]. Problém se týká pohybu těla, který může deformovat prostorovou geometrii kondenzátoru. Dochází k namáhání dvěma různými způsoby na vnitřní a vnější části. Zatímco vnitřní část se stlačuje, vnější část se natahuje, tudíž působí různé síly : konkávní ohyb a konvexní ohyb (prohnutí). Ohýbáním může dojít v určitých místech k nerovnoměrné kapacitě vlivem rozložení hustoty materiálu. V úvahu je potřeba vzít i mechanické napětí mezi součástkou a substrátem, které může vést k

rychlému poškození a následné poruše. Textilní vlákna bývají elastická do určité míry, může tedy docházet k deformaci v tahu. Maximální změna délky se odvíjí od materiálu, i toho, zda je textilie tkaná. S ohledem na textilní povahu materiálů, by struktura kondenzátoru měla být odolná vůči obvyklým podmínkám, kterým jsou oděvy vystaveny během údržby, a zároveň šetrná k pokožce (ve smyslu toxicity i dráždění). Lidské tělo navíc disponuje elektrickými vlastnostmi, které mohou zásadně ovlivnit funkci a parametry kondenzátoru. [5]–[7], [28], [36]

Parametry sendvičového kondenzátoru ovlivňuje změna tloušťky textilie vlivem vnějšího tlaku. Stlačením dochází v textilu ke snížení poměru objemu vzduchu v materiálu a tudíž změně kapacity [5]. Se snižující hustotou při stlačení se kapacita zvyšuje. K určení tlaku pro danou hodnotu kapacity zapotřebí model hystereze. U pěnového nebo 3D textilního substrátu nelze předpokládat konstantní hysterezi, neboť dochází k deformaci uvnitř struktury třením mezi přízemi ve stlačitelném materiálu. To má za následek posun křivky, která není konstantní v čase na rozdíl od magnetických materiálů. Spíše než to, ale ovlivňuje chování "nahuštění" textilie, čímž dojde k lokálnímu zvýšení ϵ_r . [29], [32], [55]



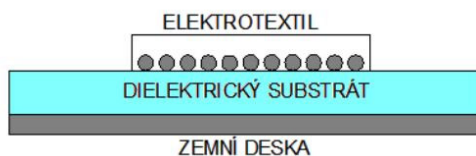
Obr. 1.16 Závislost kapacity na stlačení. (převzato z [55])

1.5.1.1 Elektrody

Vodivé vrstvy mohou být natřeny, potištěny, naprášeny, nažehleny, přilepeny nebo být tkané, šité a vyšívány vodivými nitěmi. Jinými slovy, lze realizovat pomocí *fólií*, elektricky vodivých barev nebo nití, anebo pomocí *elektrotextilu*. Vyšité elektrody na textilním substrátu jsou v současnosti realizovány výhradně hybridními vodivými nitěmi [42]. Kovové fólie, vyráběné obvykle z téměř čistých materiálů (Cu) bez příměsí metodou plátování, disponují výbornými elektrickými vlastnostmi, ale špatnou mechanickou odolností vůči namáhání v ohybu, obzvláště z dlouhodobého hlediska. K textilnímu

substrátu mohou být kovové fólie připevněny pomocí speciálních vodivých lepidel nebo pomocí nažehlování. Hrozí u nich nebezpečí svodového proudu. [29]

Jako nejvhodnější materiál k tvorbě textrod, které lze prát, se jeví elektrotextil. Vodivá tkanina, může být utkána pomocí samostatných vodivých vláken nebo kombinací s běžnými materiály. Další možností je galvanizace textilního substrátu. Nevýhodami složitý a nákladný proces výroby, horší přesnost, omezené motivy. Přestože by některé varianty kovových tkanin, karbonizovaných hedvábných / bavlněných vláken, nebo textilem z uhlíkových nanovláken dalo dosáhnout uspokojivého výkonu, nepohodlný až nepříjemný pocit na kůži stále omezuje praktické použití. Volí se různé kombinace vodivých a nevodivých vláken. Varianta, kdy jsou ztráty v nevodivých vláknech nejmenší je při umístění vodivých vláken po ně viz obrázek níže. Většina elektrické intenzity se tak soustřeďuje v dielektrickém substrátu. [5], [8], [29], [39]



1.17 Struktura tkané látky. (převzato z [5])

1.5.1.2 Využívaná dielektrika

Dielektrické vlastnosti jsou funkcí různých fyzikálních parametrů: teploty, frekvence u střídavého proudu, drsnosti povrchu, obsahu vlhkosti, čistoty a homogenity materiálu. Flexibilní obvody jsou obvykle vyráběny za pomoci levných dielektrických substrátů jako je polyester (Mylar®) nebo polyimid (Kapton®). V mnoha předchozích výzkumných pracích byly použity dielektrika jako syntetické pěny, distanční vložky a / nebo měkké nevodivé polymery. Z organických materiálů je silně polární látkou například celulóza. Pro kondenzátory se také často využívá oboustranně lesklý elektrotechnický papír. Jako základní vrstvu lze použít také dielektrická pasta. Při tisku silnějších vrstev dielektrika klesá kapacita. Permittivita ϵ_r je u většiny dielektrik 1-100, u feroelektrických látek 100 - 10 000. Využití feroelektrik sebou přináší značnou teplotní závislost kondenzátoru. Typické feroelektrické práškové materiály používané pro sítotisk jsou BaTiO_3 a příbuzné titaničitany (SrTiO_3). Rovněž se používají alternativní tisknutelné plastické materiály jako jsou akryly, vinyly a uretany. [24]

1.5.2 Význam a použití (relevantní možnosti aplikace)

Kondenzátory tvoří základ řady elektronických obvodů i senzorů. Pro udržování dlouhodobé funkčnosti e-textilu jsou bezesporu základním kamenem účinná, pružná a roztažitelná zařízení k ukládání energie. Pokud mají nositelné technologie využívat energii produkovanou lidským tělem (dýchání 0,4W, chůze 0,25 W), musí mít nízkou spotřebu a vysoce účinný systém hospodaření nebo disponovat zdrojem. Kondenzátory jsou orientovány, aby uspokojily poptávku aplikací s vysokým výkonem. Zatímco baterie jsou vhodnější pro aplikace vyžadující kapacitu skladování energie. V obou případech jsme ve skutečnosti stále omezeni použitelnými materiály i technologií. Zatím se úspěšně daří vyvíjet flexibilní zdroje s poměrně malou kapacitou, ale i tyto objevy našly využití jako senzory a sensorové struktury. [7], [8], [56]

Oděvy a textilie osazené různými typy čidel a snímačů dokážou reagovat na vnější podněty. Snímaná veličina je následně transformována na elektrický signál. Rozlišují se vláknová čidla a textilní snímače. Monitorovat se může tlak a síla, mechanické namáhání, detekovat chemikálie v okolí, nebo teplotu a vlhkost. Princip spočívá ve vyvolání změny kapacity kondenzátoru. Toho lze docílit změnou geometrických (S , d) nebo elektrických vlastností (ϵ). Oproti piezorezistivním nebo piezoelektrickým snímačům mívají o vrstvu elektrolytu méně, což zjednodušuje konstrukci a usnadňuje výrobu. Textilní senzory se typicky potýkají nejen s problémy jako pružnost a tvarovatelnost při nošení a dlouhodobá stabilita ovlivněna údržbou, ale také s tendencí mít relativně nízkou amplitudu. [1]

Tab. 1.3 Seznam některých výrobních technik používaných u kapacitních tlakových senzorů. [10], [11]

Technika	Prvky	Komprese	Senzitivita	Tlak	Velikost
Kapacitní tkanina	e - laminovaná dutá vlákna d - bavlněná příze	-	0,01 $\Delta C/mN$	0-50 N/cm ²	SR = 250 μm Au film = 40 μm
Tištěné elektrody	e - vodivý inkoust d - syntetická pěna		0,214 V/pF	0-13,6 kPa	32 mm ²
Crosslite™ kondenzátor	e - textil s povlakem stříbra d - PCCR	5 mm	0,05 pF/Ncm ²	0-30 N/cm ²	10 x 10 mm
kombinace vyšitých/ natištěných elektrod	e - stříbrná pasta/ vodivá nit d - 3d pletenina	6 mm	3,2 pF - 5,5 pF 0,192 pF/Ncm ²	0-12 N/cm ²	prvek 2x2 cm 35,1 x 40,5 cm
3D textilní kondenzátor	e - vodivá tkanina (75% Ag) d - 3D textilie	5,5 mm	1,2 - 2,2 pF/Ncm ²	0-0,6 N/cm ²	3 x 3 cm
tkanina s pruhovými elektrodami	e - PEDOT:PSS d - nylonová vlákna	1 mm	0,02 - 1,37 pF	0 - 2,5 N/cm ²	průměr: 470 μm vzálenost = 5 cm

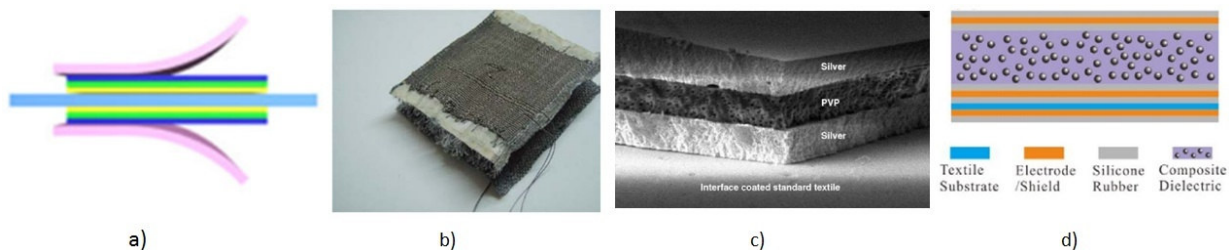
Tlakové a dotykové senzory se běžně používají jako spínače a rozhraní s elektronickými zařízeními nebo ke sledování některých životních známek uživatele. Mohou sloužit jako přepínače, náhrada klávesnice a informační dotykové podložky. [1] Provádět lze úkoly jako je přijímání telefonních hovorů bez zastavení probíhající činnosti a další. Snaha je také kapacitní senzory pohybu je integrovat do matrací, kdy mohou sloužit jako senzory váhy například k prevenci pádu [28]. U neinvazivního monitorování fyziologických funkcí obvykle způsobuje potíže obvykle připojení k tělu a zejména ke kůži. Běžnou nevýhodou je také potřeba čas od času kalibrovat reakci v důsledku buď malých změn v činnosti samotného senzoru nebo kontaminaci povrchu senzoru během provozu, což vážně omezuje použití k nepřetržitému monitorování po dlouhou dobu. [7], [23], [37] Roku 2006 Meyerem a spol. představeno pole textilních kondenzátorů (2x2 cm) s kombinovanou strukturou, které může být všito do oděvu. Dielektrikum tvoří dvě 3 mm vrstvy stačitelné textilie. Elektrody jsou vyšity nylonovou přízí potaženou stříbrem s obchodním názvem . Naměřena byla kapacita do 3,5 pF nestlačeného, a do 5,8 pF, pro tlak 5 N/cm². O čtyři roky později přišel Mayer se senzorem sezení, který je chráněn nepromokavou textilií Goretex s natištěnou stříbrnou stínící vrstvou. [20], [55]



Obr. 1.18 a) Pole textilních kondenzátorů, b) senzor sezení. [55], [32]

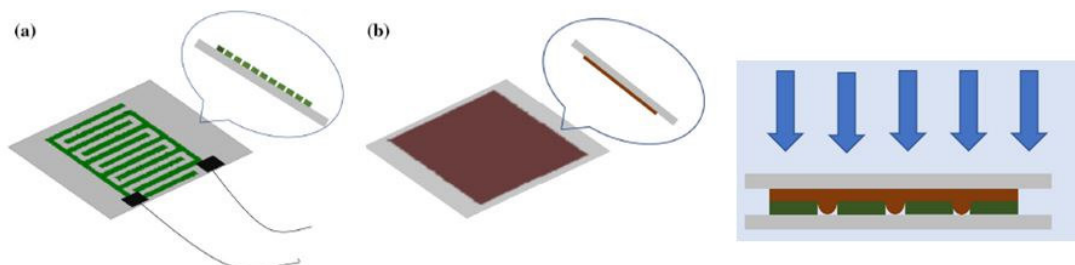
Výzkumná práce z roku 2008 prezentuje tištěný kondenzátor na bavlněnou tkaninu s elektrolytem PVA/H₃P0₄. Elektrody skládající se ze tří vrstev byly vytištěny sítotiskem na přenosný substrát PDMS. Zobrazen na obr. a). [39] V 2010 zkoumal Eriksson koncept 3D tkané kapacitní struktury s poměrem polyesterové a vodivé příze 1:1. Výsledkem této kombinace je odolná, cenově dostupná, omyvatelná a dokonce nositelná 3D struktura viz obr. b). [2], [20] 2011 byl vyvíjen senzor tlaku 3x3cm pro snímání dechu umístěný do pásů na hrudi podobným těm, které využívají sportovci [57]. Roku 2012 Li Y a spol. dosáhli kapacit 113 - 163 pF při nízkých frekvencích celo natištěným deskovým kondenzátorem technologií Ink-Jet viz obr. c). Natištěný polymerní dielektrický materiál (4,5 μm; ε_r = 6,5) disponoval podobnou flexibilitou jako textil. [23] Wei Y v roce 2013

prezentoval kapacitní senzor pohybu natištěný stítotiskem na PES/bavlněnou tkaninu. Kromě dielektrické a stříbrné vodivé pasty byla také natištěná propojovací vrstva vytvrditelná UV světlem. Dosažená kapacita se pohybovala od 3 do 8 pF, ale paracitní kapacita, která bývá řádově vyšší, dosahovala pouze ± 3 pF. [37]



Obr. 1.19 Různé provedení kapacitních textilních senzorů.

Roku 2014 bylo kapacitního efektu dosaženo stříbrnou přízí, která byla vyšita na syntetické vláknité tkanině a umístěna na pěnovou podložku. Velkoplošné kapacitní senzory pro sledování lidské polohy v matracích postelí a podlahách testovali v roce 2015. Elektrody v tomto případě tvoří pruhy z nylonových vláken potažených polymerem vetkané do textilního substrátu. Citlivost závisí na počtu sensorických vláken v pružích. [58] V 2016 zkoumali kapacitní dotykový senzor založený na silikonové gumě (SR) plněné sazemi (CB) viz obr. d), kdy dielektrický kompozit byl vytištěn na netkanou textilii (polypropylene). Stříbrné lepidlo bylo použito na elektrody. Součástky založené na silikonu mají však základní omezení, která zahrnují mechanickou křehkost a špatné odolávání velké deformaci nebo náhlému nárazu. [10], [59] Kapacitní senzor z 3D pleteniny byl experimentálně navržen v roce 2018 [28]. 2019 zkoumal Zhihua textilní senzor natištěný pomocí vodivého polymeru PANI. IDC struktura je natištěna PANI na jednom kusu tkaniny a na druhém kusu tkaniny je natištěna vodivá vrstva PANI/Ag. Poté se obě zkompletují tváří tvář. [60]



Obr. 1.20 Konstrukce textilního kondenzátoru natištěného pomocí PANI/Ag. [60]

2 Experimentální část - návrh a realizace vzorků

Navrženy byly jak vyšívané planární kondenzátory (IDC), tak sendvičový typ kondenzátoru. Konstruktivní řešení IDC je atraktivní především s ohledem na kompatibilitu s tradičním textilním průmyslem a používanými jednovrstvými výrobními technikami. Vytvoření sendvičového kondenzátoru napodobující konvenční deskový kondenzátor je možné například umístěním textrod z obou stran na stlačitelnou 3D textilií [28]. Přitom lze využít řadu výrobních technik popsanych v kapitole 1. Provedení kondenzátorů realizovaných na textilním substrátu by mělo vést k nízkým výrobním nákladům. Zároveň by neměli maximální rozměry součástek být větší než jednotky centimetrů.

2.1 Postup řešení

Uložená energie v kondenzátoru do značné míry závisí na kapacitě a/ nebo napětí, přičemž účinnější je zvýšit napětí. U E-textilií se však předpokládá použití velmi nízkých napěťových hodnot (jednotky voltů) [6]. Kapacita je dána použitými materiály a konstrukcí. S textiliemi se v této práci počítá především jako s dielektrikem. Pro daný tvar a velikost elektrod kondenzátoru lze zvýšit kapacitu záměnou dielektrika s větší materiálovou konstantou. Zvýšení kapacity souvisí s pojmutím většího množství nábojů, které jsou k dispozici pro polarizaci [44]. Dielektrikum svou polarizací zmenšuje sílu elektrického pole nábojů na elektrodách a umožňuje tak umístění většího množství náboje. Zásadním nedostatkem je obecně zejména nízká dielektrická konstanta textilních substrátů, která se liší pouze minimálně u různých materiálů viz tabulka níže.

2.1 Statická dielektrická konstanta vybraných materiálů. [61]

Látka	ϵ_r	Látka	ϵ_r
Bavlna	1,6	Voda	81,6
Polyester	1,9	Kondenzátorový papír	2,5 - 2,55
Nylon	4 - 5	PVC	3,4 - 4
Hedvábí	2,5 - 3,5	Křemík	11,7
Bavlna/PES (65:35)	1,48	Grafit	12 - 15
Condura/Lycra®	1,5	Polypropylén	1,5
Quartzel®	1,95	Polyamid	2,5 - 2,6
Condura®	1,9	Oxid titaničitý (TiO ₂)	110
Vlna	1,45	Kyselina sírová	100
Fleece	1,07	Acetamid	59
Vzduch	1	Oxid měďnatý	18,1
NaCl (monokrystal)	5,9	Sklo	7,6

Oproti klasickým materiálům textilní struktury typicky vykazují menší hodnoty relativní permitivity ϵ_r a značné ztráty vlivem velkého koeficientu $\operatorname{tg} \delta$, neboť většinou obsahují velký podíl vzduchu. Komplikací je, že tyto parametry se běžně u textilií neuvádí. Navíc se liší od výrobce, technologie a použitých materiálů. Měření relativní permitivity konkrétní textilie je tedy pro následnou realizaci nezbytné. Nelze se spoléhat na hodnoty udávané v odborných publikacích a tabulkách [5]. Faktory ovlivňující dielektrické vlastnosti jsou kmitočet, teplota, vlhkost materiálu a intenzita elektrického pole. Při použití impregnace je nutné zvážit výsledný vliv úpravy na flexibilitu součástky. Nejdůležitější rozmezí pro reálné použití je 20 - 40 °C.

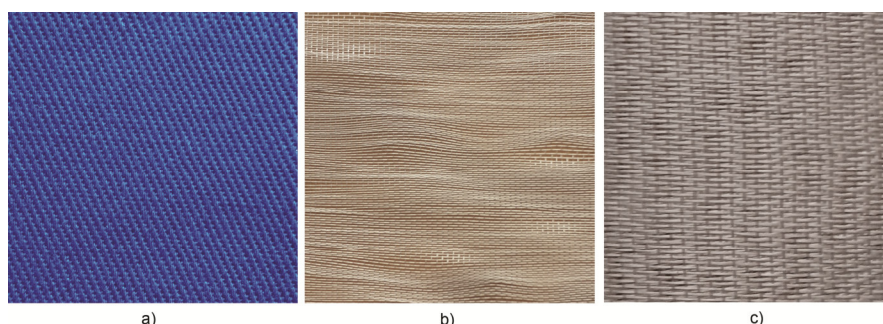
Vzhledem k využití textilního substrátu je hlavním cílem integrace do oblečení, přičemž se nabízí několik technologických řešení. Při aplikaci na oděvech by měl být součástka nenápadná a co nejmenší. Miniaturizace umožňuje skrytí například pod knoflíkem, lemem nebo límcem [37]. Mělo by se jednat o zařízení, které je lehké, levné a šetrné k životnímu prostředí, což v posledních letech hraje čím dál větší roli.

Pro splnění cílů bylo rozhodnuto o impregnaci jednoho kondenzátoru od každé kategorie v nasyceném roztoku soli (NaCl). Nasycený roztok znamená, že se v něm už další látka nerozpouští, přičemž záleží na teplotě a tlaku. Zkoumány byli také různé možnosti, jako laminování, tisk, použití elektrolytu, nebo kombinace. Ne všechny možnosti však byly proveditelné. Kromě znalosti elektrických parametrů materiálů je klíčové technologické zvládnutí přípravy funkčních vrstev.

Textilie jsou ohebné ve všech směrech, nicméně při ohýbání struktury dochází ke změnám tloušťky substrátu a hustotě struktury. Mechanické změny ve struktuře textilu způsobuje také vlhkost. U součástky integrované do oděvu pravděpodobně dojde k nasáknutí potem nebo dešťovou vodou. Textilní vlákna budou navíc vždy obsahovat vodu z běžné vzdušné vlhkosti. Zejména savost a následné změny relativní permitivity souvisí s nestálostí elektrických vlastností. Pokud vlákna absorbují vodu, dochází ke zvýšení ϵ_r a snížení $\tan \varphi$. Přírodní materiály obecně dokážou pohltit více vlhkosti oproti syntetickým. Konkrétně u bavlny jde zhruba o 7,5% při relativní vlhkosti vzduchu 65%. Vlákna se při nasáknutí smršťují více ve směru svojí délky než tloušťky. U bavlněných substrátů může jít až o 40%. [36]

2.2 Použité materiály

Pro realizaci vyšitých interdigitálních kondenzátorů (IDC) jako základní textilní substrát posloužila 100% bavlněná tkanina s keprovou vazbou o gramáži 155 g/m^2 , která je dále v práci označována "substrát 1" v souvislosti s testovanými různými druhy impregnací. "substrát 2" a "substrát 2B" označují typ skelné tkaniny, která se využívá pro výrobu plošných spojů. Skelná tkanina byla použita jednak v kombinaci právě se základním bavlněnou tkaninou jako podšívka (substrát 2), tak i jako nosná textilie (substrát 2B). Druhou zmíněnou variantu tvoří tři neoddělitelné vrstvy totožné skelné tkaniny jako na obr. 2.1 b).



Obr. 2.1 Textilní substráty pro IDC: a) substrát 1; b) substrát 2, c) substrát 2B

Základní struktura sendvičového kondenzátoru se skládá z několika vrstev kombinací dielektrikum-elektroda. Jako dielektrikum byla zvolena 3D textilie, kvůli přirozené třírozměrné povaze, tj. významná tloušťka podél osy z , oproti tradičními tkaninám nebo pleteninám. 3D textilie mají menší hysterezi než pěny (ϵ_r až 4) vyrobené například z polyethylenu v kombinaci s dalšími příměsemi [11], [42]. Elektrody z vodivých tkanin jsou umístěny po obou stranách stlačitelného dielektrika. Hlavním faktorem pro výběr vhodné vodivé textilie je efektivní plocha kondenzátoru tj. podíl vodivého materiálu po celé ploše. Zvolena byla pro tento účel nešlichtovaná vodivá tkanina na bázi Silver.STAT, kdy jsou vodivá vlákna jen v osnově. Silver.STAT jsou vodivé nitě z polyamidových vláken ovrstvená stříbrem s jemností 6,7 dTex a hodnotou odporu $10^2 - 10^6 \Omega/\text{m}$ [13].



Obr. 2.2 Vodivá tkanina na bázi Silver.STAT.

2.3 Vyšité zkušební vzorky kondenzátorů

Výsledný vyšitý motiv je možné v softwaru Bernina Designer předem určit grafickou předlohou ve vektorovém formátu. Barevné odlišení trajektorií výšivky slouží jako indikátor změny nití, stehu a podobně za jiný druh viz *příloha E*. Lze tedy nakreslit celou výšivku najednou a pouze zadat pokyn, kdy má dojít k manuální výměně za jinou niť. SW umožňuje výpočet spotřeby jednotlivých nití. [12] Při tvorbě objektu lze v prostředí programu zvolit typ výplně. Existují dvě široké kategorie. Pokud vyšíváme objekt pouze jako obrys, je ve výchozím nastavení vytvořen jako saténový steh (satin stitch). Ve druhém případě se u objektů jedná o step fill, přičemž u jakéhokoli objektu lze změnit též na satin fill. Může se však stát, že délka stahu bude přesahovat šířku objektu. Je dobré brát také v potaz že dlouhé stehy jsou náchylné k zachycení, tudíž pro nošení nejsou příliš praktické.

2.3.1 Šicí a vyšivací stroj Bernina

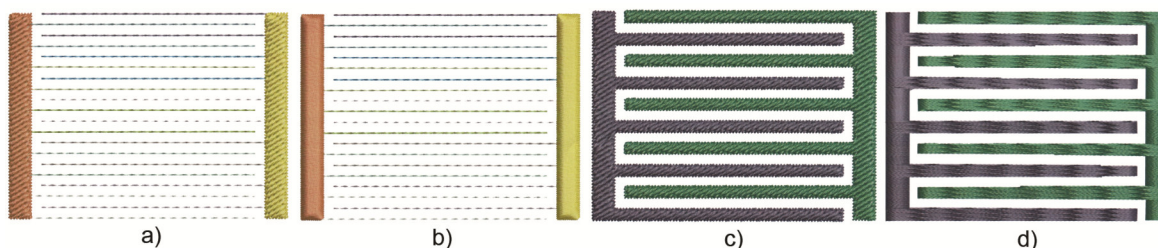
K realizaci byl použit celokovový poloprofesionální švýcarský přístroj Bernina 750 QE, jenž vlastní KET. Šicí a vyšivací stroje Bernina umožňují mimo běžné funkce také např. výšivky rovnou v látce vyřezávat. Série 7 nabízí barevný dotykový displej, velké programové vybavení, volné rameno přes celou pracovní plochu a přídatný stolek. Součástí je navíc tzv. BSR senzor pro volný pohyb. Díky tomu stroj sám zrychluje či zpomaluje podle rychlosti pohybu látky. Tento konkrétní stroj je ještě dovybaven modulem 8XX / 7XX kvůli možnosti vyšívat i složité vzory různých velikostí. K dispozici jsou stovky druhů stehů včetně abeced. Je možná regulace délky i šířky stehů a rychlosti (až 1000 stehů/min). [9], [62]



Obr. 2.3 Šicí a vyšivací stroj Bernina 750 QE (převzato z [9]).

2.3.2 Návrh

U vyšíváných kondenzátorů byli vytvořeny čtyři různé varianty o celkových rozměrech kolem 38x52 mm. Bylo zjištěno, že při vyšívání interdigitálních elektrod je potřeba izolační mezera větší než 1 mm, neboť vlivem třepení vodivých vláken příze dochází v těchto místech ke zkratům [9]. Z tohoto důvodu byl proto zvolen rozstup mezi elektrodami 2 mm.



Obr. 2.4 Navržené varianty vyšíváných kondenzátorů a) IDC A; b) IDC B; c) IDC C; d) IDC D.

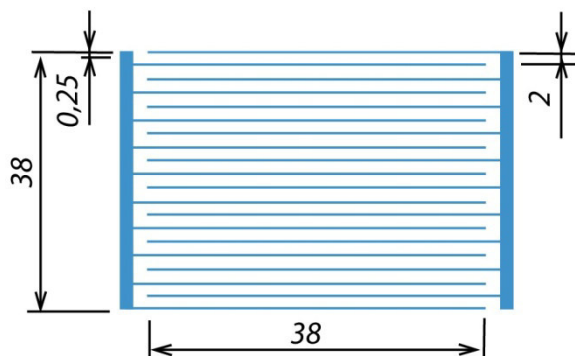
Vzorky typu IDC A a IDC B jsou vyšity jednou vodivou nití. Pro IDC C a IDC D byl zvolen plný motiv. Mezi sebou se potom liší zvoleným směrem vyšívání. IDC A a IDC C jsou vyšity šikmo, IDC B a IDC D ve směrech x , y , $-x$, $-y$ souřadnicového systému. Podrobnější návrh vyexportovaný ze softwaru Bernina Designer uvádím v příloze E.

U všech vyšitých vzorků byla použita vodivá příze s označením 53 od výrobce CleverTex[®], na jejímž vývoji se podílela i FEL. Označení příze souvisí s její jemností. Tato hybridní nit je plně kompatibilní se standardně používanými procesy v textilním průmyslu, jako je tkaní, pletení a vyšívání. Strukturu této příze tvoří polyesterová vlákna spředená s 8 měděnými drátky, které jsou potaženy stříbrem kvůli zvýšení elektrických vlastností, obzvláště vodivosti. Kromě toho je stříbro antibakteriální. Povrchová úprava sebou však nese menší odolnost vůči praní, neboť během pracích cyklů dochází k obroušování stříbrných destiček.

Tab. 2.2 Parametry použité vodivé nitě [12].

Označení	Jemnost [Tex]	Počet vodivých vláken	[cN/tex]	Protáhnutelnost [%]	Materiál	R [Ω /m]
53	50	8x27 μ m	31,59	14,08	Cu/Ag	6,5

1) Interdigitální kondenzátor - 20 prstů, jedno-vláknový



Obr. 2.5 Návrh rozměrů pro varianty IDC A a IDC B.

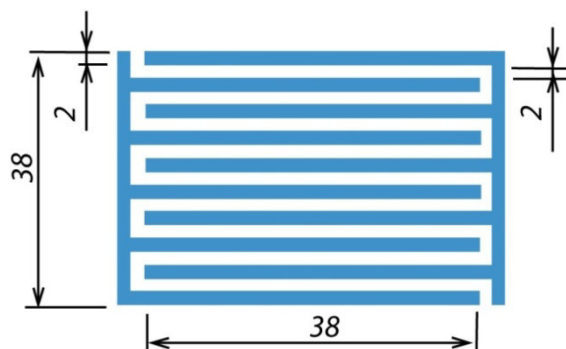
Tab. 2.3 Parametry kondenzátorů vyšívaných jednou nití (IDC A a IDC B).

wp	s	l	t	ϵ_r	n
0,25	2	38	0,25	1,8	20

Výpočet kapacity pro vyšité vzorky IDC A a IDC B:

$$C_s = \frac{\pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{1,8 + 1}{2}}{\ln\left(\frac{\pi \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3} + 0,25 \cdot 10^{-3} + 1}\right)} \cdot 38 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{20}{2} = 5,67 \text{ pF} \quad (1.14)$$

2) Interdigitální kondenzátor - 10 prstů



Obr. 2.6 Návrh rozměrů pro varianty IDC C a IDC D

Tab. 2.4 Parametry kondenzátorů vyšívaných s plným motivem (IDC C a IDC D).

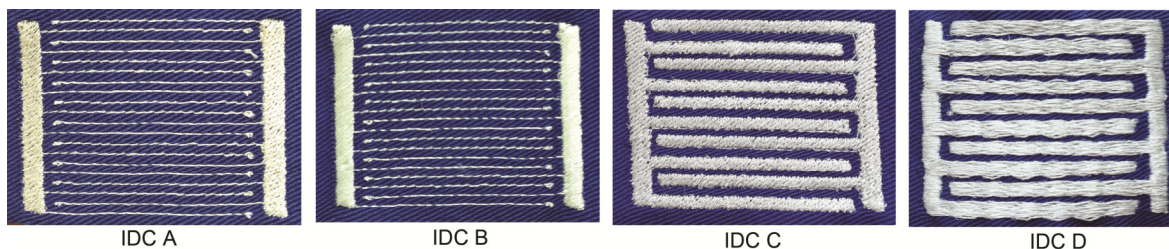
wp	s	l	t	ϵ_r	n
2	2	38	0,5	1,8	10

Výpočet kapacity pro vyšité vzorky IDC C a IDC D:

$$C_s = \frac{\pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{1,8 + 1}{2}}{\ln\left(\frac{\pi \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 10^{-3} + 1}\right)} \cdot 38 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{10}{2} = 5,89 \text{ pF} \quad (1.15)$$

2.3.3 Realizované zkušební vzorky

Celkem bylo experimentováno s třinácti funkčními vzorky IDC. Substrát 1 byl použit, až na jednu výjimku, u všech vyšitých interdigitálních kondenzátorů. Bavlněná textilie (substrát 1) je tkaná šikmo. Jako přesnější se tedy jeví zvolit šikmé stehování.



Obr. 2.7 Varianty vyšitých kondenzátorů na textilním substrátu 1.

Vzorky realizovaných kondenzátorů od každé kategorie s označením "S" byly nejdříve namočené ve vlažné vodě o teplotě 37°C na jednu hodinu. Poté byly přendány do nasyceného roztoku soli po dobu 45 minut a následně zavěšeny a usušeny. Verze vyšitých kondenzátorů s označením "ST" jsou podšity dvěma vrstvami skleněné tkaniny, vyjímaje IDC A-ST, kdy jde pouze o jednu vrstvu viz obrázek níže.



Obr. 2.8 Spodní strana (podšívka) vyšitých IDC s označením 3-ST.

Varianta IDC C-3ST se od ostatních vyšívaných IDC liší na první pohled použitým nosným textilním substrátem. V tomto případě se jedná o substrát 2B popsany v předchozí kapitole.

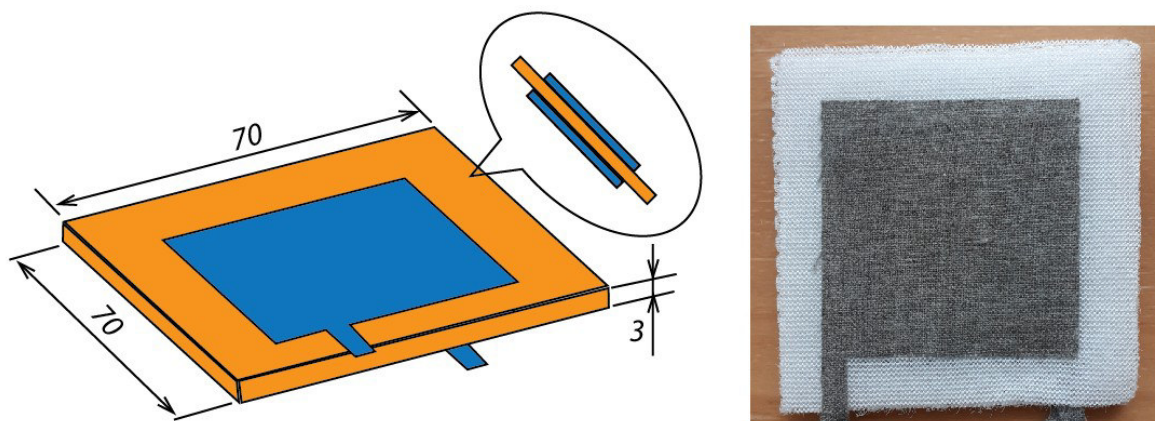


Obr. 2.9 Vyšitý IDC C na substrátu 2B, neboli IDC C-3ST.

2.4 Nažehlené zkušební vzorky kondenzátorů

2.4.1 Návrh

Nosným prvkem vícevrstvé struktury je uspořádání dielektrikum-vodič. Skladba vícevrstvé struktury je znázorněna na obrázku níže. Dielektrikum reprezentuje nevodivá textilie o definované w , l , h , ϵ_r a $\tan \delta$. Nutno zdůraznit, že výška dielektrika velmi ovlivní návrh [29]. Jinými slovy, kapacitu obvykle zvyšuje zmenšení mezery mezi elektrodami. Izolační vrstvu tvořila 3D tkanina o rozměrech 7x7 cm a tloušťkou 3 cm. Elektrody z vodivé textilie na bázi SilveR.STAT jsou o něco menší (5x5cm). Menší rozměry elektrod by měli zabránit zkratům, ke kterým může dojít.



Obr. 2.10 Realizovaná pětivrstvá sendvičová struktura

2.4.2 Příprava sendvičové struktury

Připravené elektrody byly umístěny na textil a "zažehleny" v tepelném lisu "tváří tvář" po obou stranách textilních substrátů. Při nastavování optimálního tlaku a teploty se obvykle postupuje metodou pokus omyl. Po několika pokusech nabyté zkušenosti umožní správně nastavit tlak pro různé materiály. Zvoleno bylo 145°C po dobu 10 vteřin. Pro zažehlení byl použit manuální termolis, neboli tepelný lis, s plochou desek 38x38 cm. Během procesu jsou materiály překryty pečícím papírem nebo teflonovou fólií.

Aby bylo možné zaručení spolehlivosti výsledků s ohledem na limity ruční výroby bylo stejným způsobem vyhotoveno několik totožných kondenzátorů. Testovány byly celkem tři vzorky tohoto typu. Obdobně jako u testovacích vzorků IDC byla verze s označením SK 2-S impregnována NaCl viz předchozí kapitola.

3 Experimentální část - testování

Při experimentu byly u testovaných vzorků na frekvencích 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz a 200 kHz měřeny: paralelní kapacita C_p a ztrátový činitel D . Vždy byly provedeny minimálně tři série měření. Napájecí napětí bylo 1 V. Veškerá měření se uskutečnila při pokojové teplotě v prostředí s průměrnou teplotou 21,5 °C při relativní vlhkosti vzduchu kolem 65 %, což dle normy ČSN EN ISO 139 odpovídá normálnímu testovacímu ovzduší.

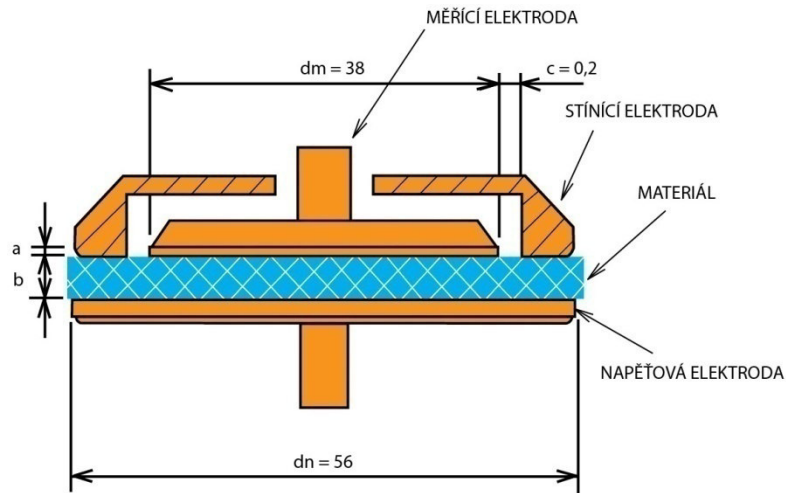
3.1 Měřicí zařízení

Při měření zkušebních vzorků byl použit LCR metr Agilent E4980A s kmitočtovým rozsahem od 20 Hz do 2 Mhz. K dispozici je řada měřících módů, pro nás nejdůležitější = mód $C_p - D$ (Paralelní kapacita - ztrátový činitel), za pomoci kterého měříme dané vlastnosti zkoumaných prvků.[63]



Obr. 3.1 a) LCR metr Agilent E4980A. [63]; b) Elektrodotý systém Agilent 16451B. [64]

Elektrodotý systém Agilent 16451B slouží pro měření elektrických vlastností rovinných vzorků stejnosměrným i střídavým elektrickým polem do kmitočtu cca 10 MHz. Tříelektrodotý systém tvoří napěťová a měřicí elektroda kruhového tvaru a ochranná elektroda ve tvaru mezikruží. Ochranná elektroda zajišťuje přesnost měření. Snižuje vliv okrajové a zemní kapacity měřicí elektrody a vylučuje vliv povrchového svodu. Účinnost roste s menším rozdílem potenciálů a mezerou mezi měřicí a ochrannou elektrodou. Platí, že šířka ochranné elektrody musí být větší než dvojnásobek tloušťky vzorku ($c \leq 2h$). Doporučuje se šířka minimálně 10 mm u ochranné elektrody a 1 až 2 mm pro mezeru. Průměr napěťové elektrody potom nesmí být menší než vnější průměr ochranné elektrody. [63]



Obr. 3.2 řez elektrodovým systémem. [64]

Pro výpočet relativní permitivity platí:

$$\varepsilon'_{(r)} = \frac{C_p}{C_0} \quad (3.1)$$

C_p je kapacita kondenzátoru s vloženým dielektrikem. C_0 je geometrická kapacita, kdy je místo dielektrika vakuum, a stanoví se :

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{S_{ef}}{h} \quad (3.2)$$

Efektivní plocha měřící elektrody je :

$$S_{ef} = \pi \cdot \frac{(d_m + B \cdot c)^2}{4} = \pi \cdot \frac{(0,038 + 1 \cdot 0,0002)^2}{4} = 1146,08 \text{ mm}^2 \quad (3.3)$$

, kde d_m je průměr měřící elektrody 38 mm, c šířka vzduchové mezery 0,2 mm.

Součinitel B (korekční činitel) je roven jedné pro $a < h$. Pro $a \ll h$ se spočte ze vztahu :

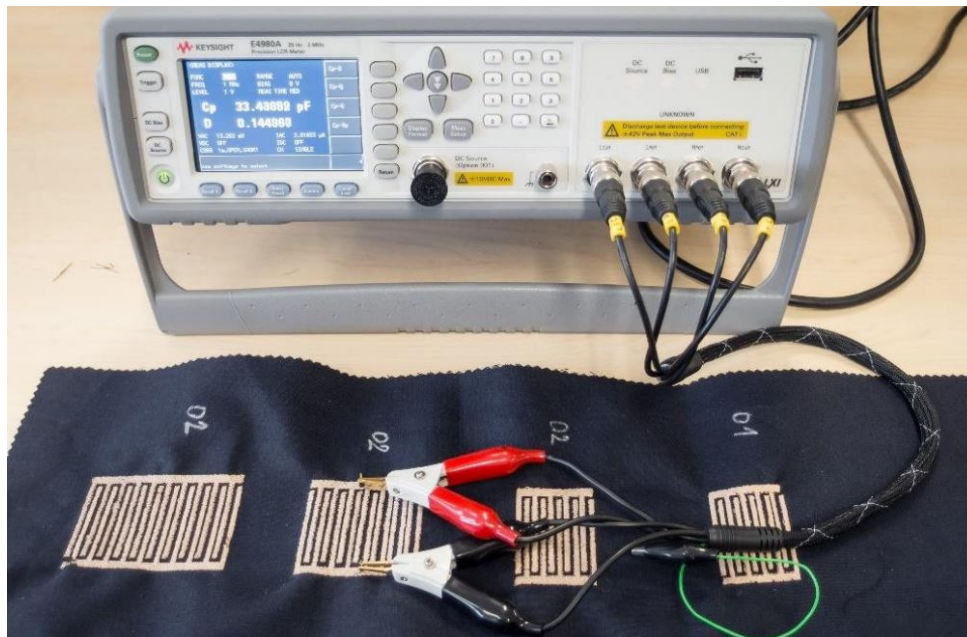
$$B = 1 - 2,932 \cdot \frac{h}{c} \cdot \log \cos \left(0,7854 \cdot \frac{c}{h} \right) \quad (3.4)$$

Po dosazení je zjevné, že geometrická kapacita je závislá na tloušťce měřeného vzorku h . Ostatní parametry se nemění.

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{S_{ef}}{h} = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{0,00114608}{h} = \frac{1,0147 \cdot 10^{-14}}{h} \quad (3.5)$$

3.2 Postup měření

V případě testování textilních substrátů tvořil měřicí obvod tříelektrokový rovinný systém HP Agilent 16451B připojený čtyř vodičovým vedením k LCR metru. U kondenzátorů bylo připojení k měřicímu přístroji (LCR metr) realizováno prostřednictvím zařízení Agilent 16085B připojeného ke elektrodám kondenzátoru byl pomocí kabelových svorek (krokosvorky).



Obr. 3.3 Měření elektrických parametrů přístrojem Agilent E4980A. (převzato z [9])

Pro správný výsledek měření je nutná interní kalibrace a kompenzace přívodních vodičů, aby nebyly do výsledků měření zahrnuty veškeré nežádoucí parazitní vlivy. Kalibrace se provádí ve dvou krocích.

Naprázdno, kdy se ponechají svorky otevřené a stiskne se tlačítko "OPEN". U elektrodového systému se k nastavení používá speciální kalibrační elektroda s izolační krytkou, která od sebe oddělí elektrody. Korekce OPEN eliminuje parazitní kapacity C_p mezi vodiči měřicího zařízení a elektrodového systému. V druhém kroku se kalibruje nakrátko. Svorky se ponechají zkratované a stiskne se tlačítko "SHORT". U elektrodového systému se pro nastavení používá speciální kalibrační elektroda, která zkratuje napěťovou a měřicí elektrodu. Tato korekce eliminuje parazitní impedance R_s a indukčnosti vodičů. [63]

3.2.1 Naměřené výsledky a zhodnocení textilních substrátů

Substrát 1 označuje bavlněná tkanina popsanou v kap. 2.2. V souvislosti s tímto substrátem byly testovány různé možnosti impregnace. Impregnaci bavlněné tkaniny klasickou metodou používanou v textilním průmyslu označuje substrát 1-I. Bavlněná tkanina v kombinaci s nasyceným roztokem soli substrát 1-S. Na variantu 1-L byl postříkem aplikován akrylový čirý lak.

Tab. 3.1 Naměřené průměrné hodnoty substrátu 1 a testovaných variant impregnace.

f [kHz]	Substrát 1		Substrát 1-I		Substrát 1-L		Substrát 1-S	
	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D
1	37,1	0,2633	25,0	0,1934	22,2	0,1634	51,3	0,2995
10	27,4	0,1889	20,2	0,1256	18,1	0,1322	39,0	0,2081
100	22,0	0,1357	17,6	0,0826	15,4	0,0999	29,2	0,2000
200	20,7	0,1242	17,1	0,0752	14,9	0,0924	26,8	0,1964

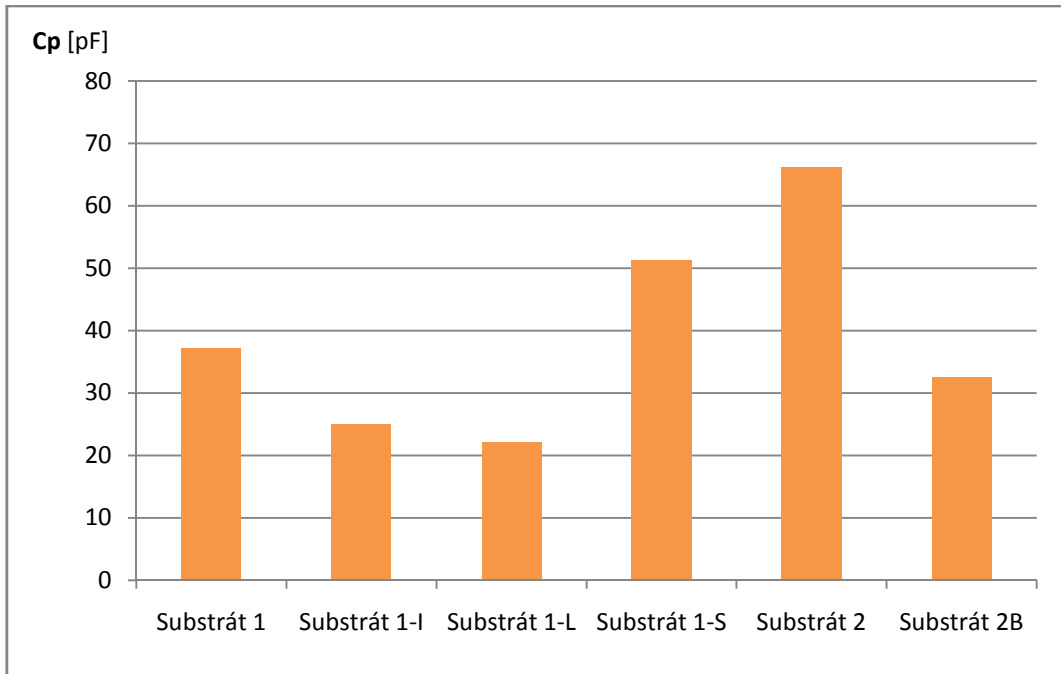
Substrát 2 označuje také již zmiňovanou skelnou tkaninu. Substrát 2B pak několik vrstev této skelné tkaniny nažehlených na sebe pomocí tepelného lisu.

Tab. 3.2 Naměřené průměrné hodnoty substrátu 2 a substrátu 2B.

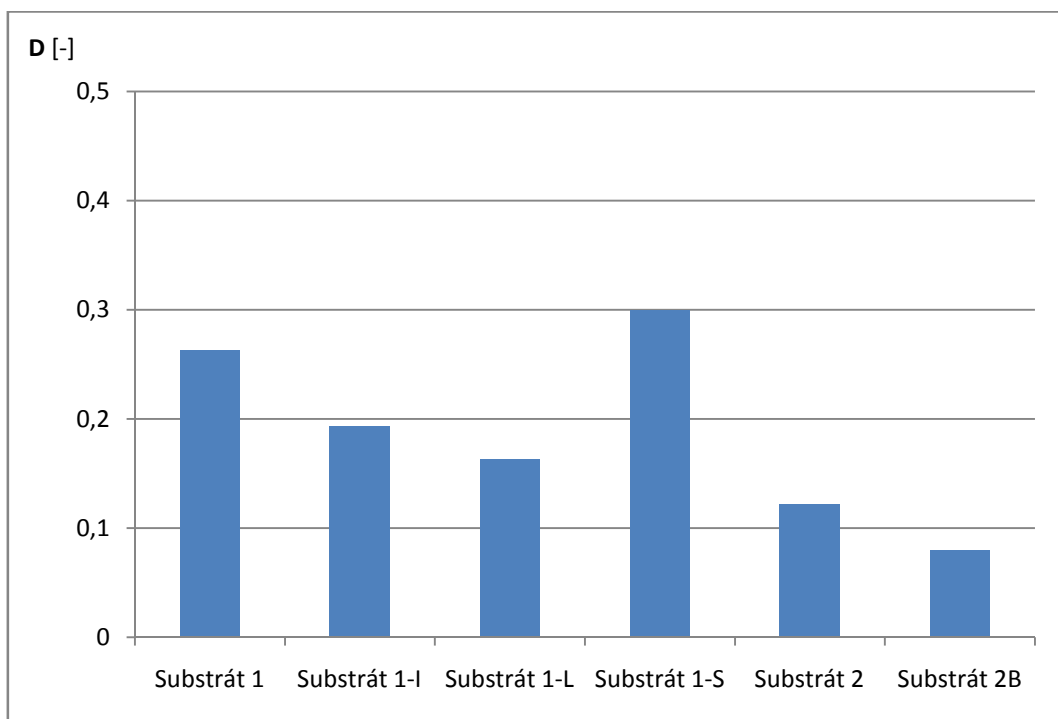
f [kHz]	Substrát 2		Substrát 2B	
	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D
1	66,2	0,1213	32,5	0,0800
10	61,1	0,0457	29,5	0,0584
100	58,5	0,0235	27,8	0,0347
200	58,0	0,0292	27,4	0,0298

U textilních substrátů bylo provedeno 6 sérií měření. Tabulky ukazují průměrné aritmetické hodnoty. Na základě porovnání s středními hodnotami je možné deklarovat, že se jedná o dostatečně přesné údaje. Z testovaných možností impregnace došlo k navýšení kapacity pouze u varianty s označením Substrát 1-S. U této varianty, kdy je bavlněná tkanina impregnována v nasyceném roztoku NaCl, by bylo teoreticky možné dosáhnout lepších výsledků v závislosti na množství a velikosti krystalů/ vloček soli. Ty v tomto případě oproti impregnaci aplikované u kondenzátorů byly okem skoro nepatrné. K dispozici však nebyl dostatečně velký vzorek s totožnou úpravou pro testování elektrodovým systémem. Grafy 3.1 a 3.2 ukazují kapacitu C_p a ztrátového činitele D všech testovaných substrátů pro frekvenci 1 kHz, při které jsou naměřeny nejvyšší hodnoty.

Z grafů je vidět, že naměřená kapacita dosahuje nejvyšších průměrných hodnot u textilních substrátů 1-S a 2. Avšak pro substrát 1-S dosahuje ztrátový činitel D hodnot kolem 0,3, zatímco pro substrát 2 je zhruba třikrát menší.



Graf 3-1 Kapacita testovaných substrátů pro frekvenci 1 kHz.



Graf 3-2 Ztrátový (rozptylový) činitel testovaných substrátů pro frekvenci 1 kHz.

Výpočet relativní permitivity substrátů :

$$\varepsilon_r = \frac{C_p \cdot h}{\varepsilon_0 \cdot S_{ef}} = \frac{C_p \cdot h}{\varepsilon_0 \cdot \pi \cdot r^2} , \text{ neboli } \frac{C_p \cdot h}{\varepsilon_0 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (3.6)$$

, kde $d = 38$ mm je průměr elektrod měřícího elektrodového systému

$$\varepsilon_0 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,038}{2}\right)^2 \approx 1 \cdot 10^{-14} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_r = h \cdot C_p \cdot 1 \cdot 10^{14} \quad (3.8)$$

Příklad výpočtu pro substrát 1 s tloušťkou $h = 0,485$ mm a frekvenci 1 kHz :

$$\varepsilon_r = h \cdot C_p \cdot 1 \cdot 10^{14} = 0,485 \cdot 10^{-3} \cdot 37,1 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{14} = 1,8 \quad (3.9)$$

Tab. 3.3 Parametry testovaných textilních substrátů

Označení	h [mm]	f :	1 kHz	10 kHz	100 kHz	200 kHz
Substrát 1	0,485	ε_r	1,80	1,33	1,07	1,01
Substrát 1-I	0,490		1,09	0,99	0,86	0,84
Substrát 1-L	0,490		1,09	0,89	0,76	0,73
Substrát 1-S	0,520		2,67	2,03	1,52	1,39
Substrát 2	0,050		0,33	0,31	0,29	0,29
Substrát 2B	0,205		0,67	0,61	0,57	0,56

Pro dosažení přijatelné přesnosti při výpočtu ε_r byla použita průměrná hodnota naměřených paralelních kapacit C_p viz *tab. 3.4*. Kompletní naměřené hodnoty jsou uvedeny v *příloze C*. U měření permitivity je požadována velká přesnost. Nevětším zdrojem nepřesnosti je odlišná tloušťka vzorků v různých místech. Uváděná tloušťka h v je průměrná aritmetická hodnota textilních substrátů naměřená digitálním posuvným měřítkem (šuplera). Tento způsob není ideální, ale lze ho považovat za směrodatný. Relativní permitivita bavlněné tkaniny (substrát 1) se pohybuje pro frekvenci kolem 1 kHz kolem hodnoty 1,8, což přibližně odpovídá udávané tabulkové hodnotě 1,6.

3.2.2 Naměřené výsledky a zhodnocení kondenzátorů

V první části této podkapitoly jsou uvedeny a zhodnoceny výsledky vyšitých kondenzátorů IDC, následuje sendvičový kondenzátor. V tabulkách jsou uvedeny naměřené hodnoty paralelní kapacity C_p a ztrátového činitele D . Vždy byly provedeny 3 sérií měření. Tabulky ukazují průměrné aritmetické hodnoty.

1) Interdigitální kondenzátory (IDC) realizované na textilních substrátech

Tab 3.5 Průměrné naměřené hodnoty vyšitých IDC na substrátu 1 (bavlněná tkanina).

f [kHz]	IDC A		IDC B		IDC C		IDC D	
	C_p [pF]	D	C_p [pF]	D	C_p [pF]	D	C_p [pF]	D
1	9,1	0,3790	10,4	0,3817	14,7	0,5430	13,6	0,5273
10	6,3	0,2163	7,3	0,2277	10,0	0,2467	9,3	0,2303
100	5,1	0,1173	5,7	0,1387	8,1	0,1193	7,6	0,1090
200	4,9	0,0989	5,6	0,0996	7,7	0,0974	7,3	0,0911

Tab 3.6 Průměrné naměřené hodnoty IDC vyšitých na substrátu 1 po impregnaci v roztoku soli.

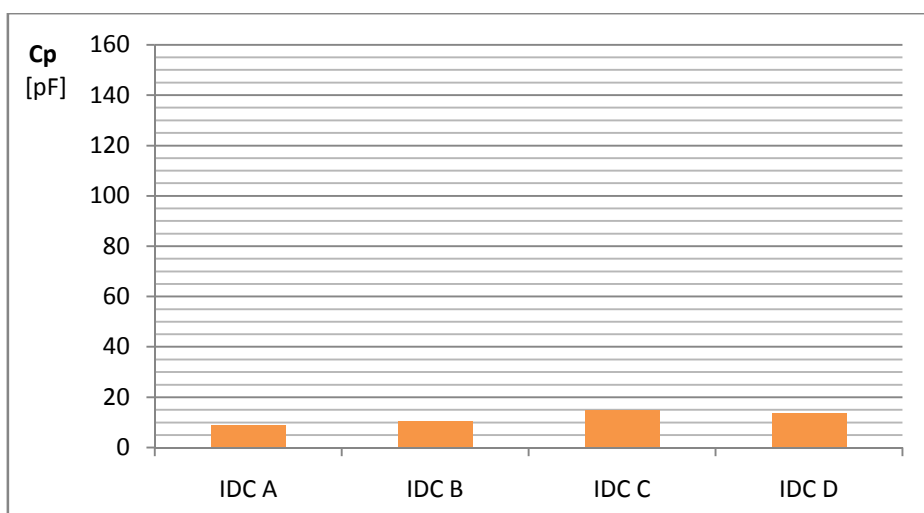
f [kHz]	IDC A-S		IDC B-S		IDC C-S		IDC D-S	
	C_p [pF]	D	C_p [pF]	D	C_p [pF]	D	C_p [pF]	D
1	46,4	0,6487	33,8	0,9017	148,7	2,0937	125,3	1,4963
10	24,1	0,5213	16,7	0,5957	43,9	1,2727	38,1	1,0838
100	12,9	0,4063	8,8	0,4217	19,5	0,6363	17,4	0,5697
200	11,1	0,3633	7,5	0,3710	16,3	0,5140	14,8	0,4593

Tab 3.7 Průměrné naměřené hodnoty IDC vyšitých na substrátu 1 a podšitých dvěma vrstvami substrátu 2.

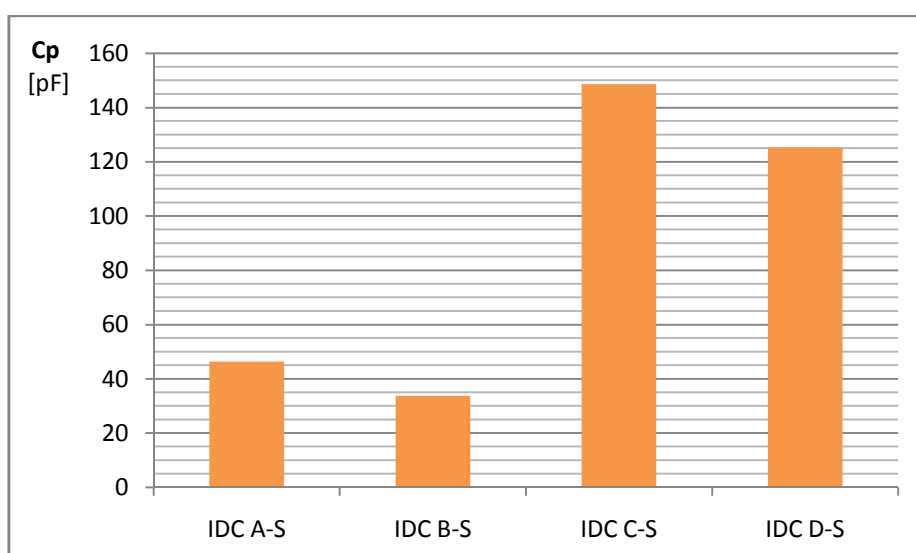
f [kHz]	IDC A-ST		IDC B-ST		IDC C-ST		IDC D-ST	
	C_p [pF]	D	C_p [pF]	D	C_p [pF]	D	C_p [pF]	D
1	12,1	0,3447	11,5	0,3947	15,7	0,5537	15,4	0,5747
10	7,7	0,1920	7,7	0,2217	10,4	0,2413	10,2	0,2437
100	6,5	0,1173	6,2	0,1207	8,4	0,1167	8,2	0,1137
200	4,2	0,0697	5,9	0,1013	8,1	0,0955	7,9	0,0912

Tab 3.8 Průměrné naměřené hodnoty IDC vyšitých na substrátu 2B

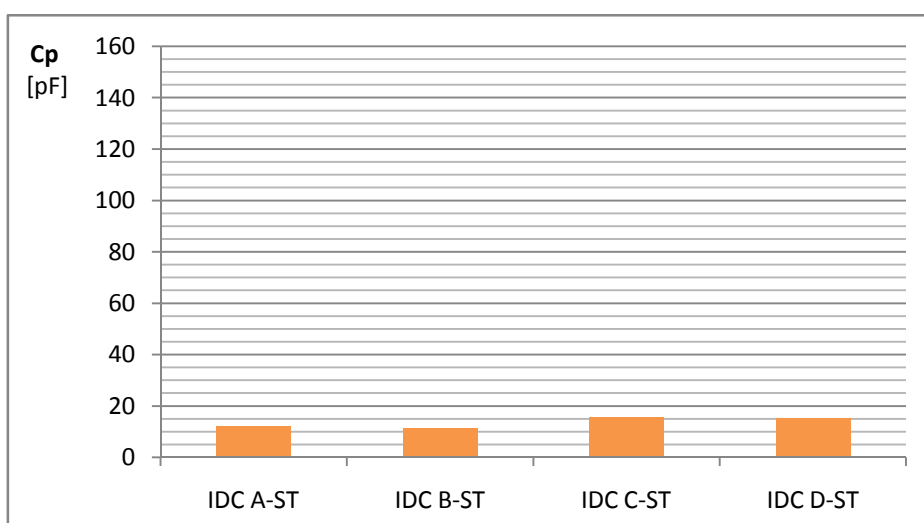
f [kHz]	IDC C-3ST	
	C_p [pF]	D
1	6,8	0,0312
10	6,6	0,0147
100	6,5	0,0280
200	6,5	0,0056



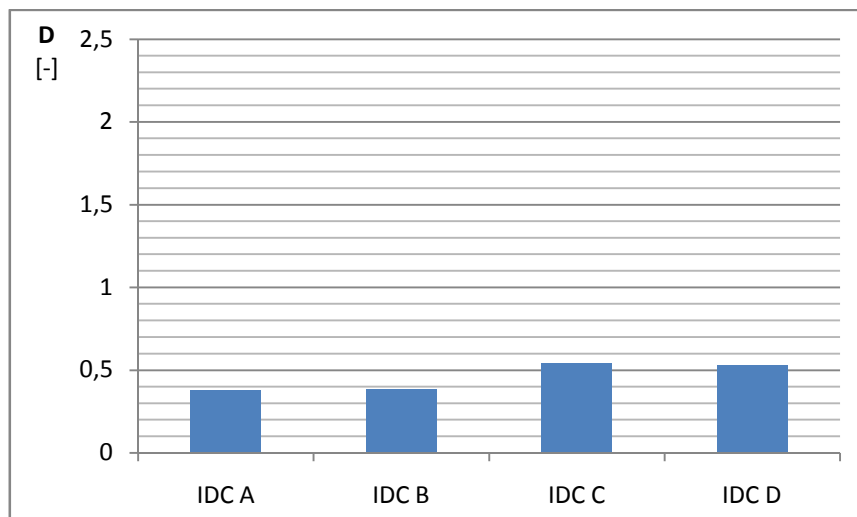
Graf 3-3 Kapacita základního provedení vzorků pro frekvenci 1 kHz.



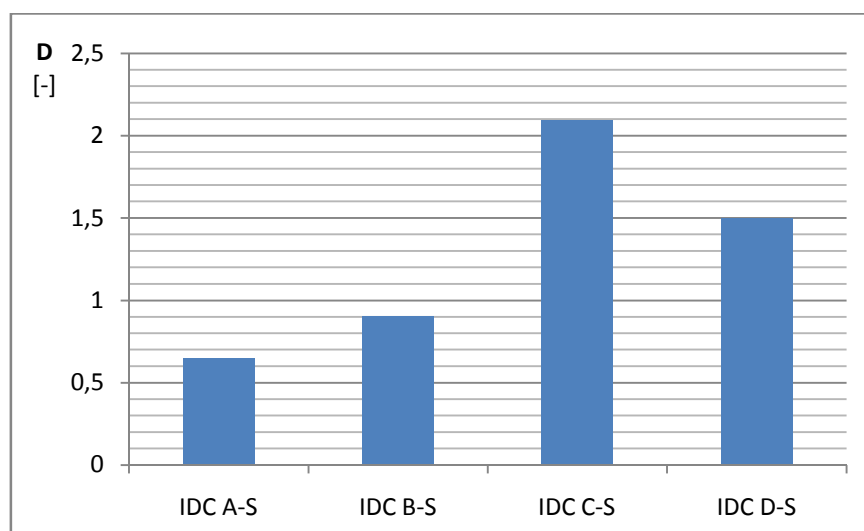
Graf 3-4 Kapacita vzorků po impregnaci v NaCl pro frekvenci 1 kHz.



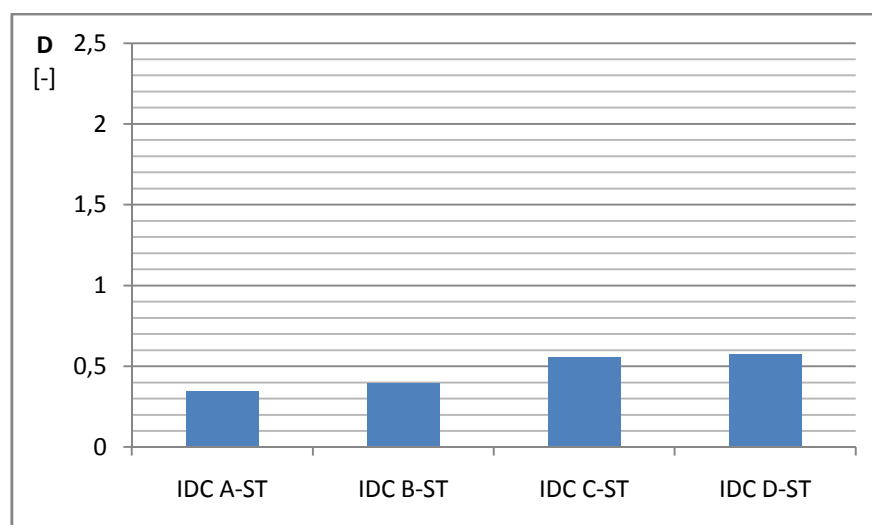
Graf 3-5 Kapacita vzorků podšitých skelnou tkaninou (substrát 2) pro frekvenci 1 kHz.



Graf 3-6 Ztrátový (rozptylový) činitel základního provedení vzorků pro frekvenci 1 kHz.



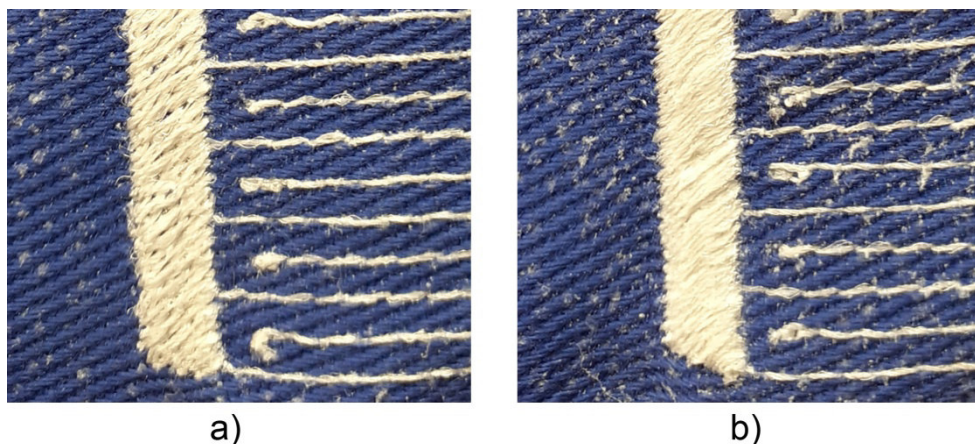
Graf 3-7 Ztrátový (rozptylový) činitel vzorků po impregnaci v NaCl pro frekvenci 1 kHz.



Graf 3-8 Ztrátový činitel vzorků podšitých skelnou tkaninou (substrát 2) pro frekvenci 1 kHz.

Při porovnání naměřených výsledků je patrné, že u vyšitých motivů plnou strukturou (IDC A, IDC C) je dosahováno o zhruba o 25 % až 37,5 % vyšších kapacit oproti variantám vyšitých jednou vodivou nití (IDC B, IDC D). Také se potvrdilo že vzhledem ke struktuře bavlněné tkaniny (substrát 1) je efektivnější zvolit šikmé vyšívání. U základního provedení variant IDC C oproti IDC D je tak dosaženo zvýšení kapacity o několik procent (5 - 7%). Pokud jsou kondenzátory realizované na textilním substrátu impregnovány (-S) rozdíl je až 15 %.

Bylo zjištěno že impregnací testovaných vzorků textilních kondenzátorů v NaCl dojde k desetinásobnému nárůstu kapacity. To však platí pouze právě u variant s vyšitými interdigitálními elektrodami plnou strukturou. U kondenzátorů s elektrodami vyšívanými jednou vodivou nití se jedná maximálně o pětinásobek, přičemž rozhoduje hustota stehování. Ta je v případě IDC A řidší na rozdíl od IDC B, proto v tomto případě dochází k lepší impregnaci roztokem soli viz obrázek níže. Výsledkem je že po impregnaci IDC A-S dosahuje oproti IDC B-S zhruba o 40 % vyšších hodnot, a to i přes menší kapacitu základního provedení.



Obr. 3.4 Detail stehování vyšívaných kondenzátorů: a) IDC A-S; b) IDC B-S.

Z měření také vyplívá u vyšívaných IDC kondenzátorů na bavlněné tkanině má podšívka ze skleněné tkaniny (substrát 2) minimální efekt na zvýšení kapacity. Zaznamenán byl nárůst jen o jednotky pF, což v nejlepším případě (IDC A-ST) činí 25 %. V případě IDC C-3ST, kdy byl motiv vyšit na přímo substrát 2B, lze pozorovat velmi stabilní hodnoty v závislosti na frekvenci. Na druhou stranu naměřená kapacita takto realizovaného kondenzátoru dosahuje pouze $\pm 6,5$ pF. Na základě porovnání s IDC C pro frekvenci 1 kHz jsou hodnoty kapacity poloviční.

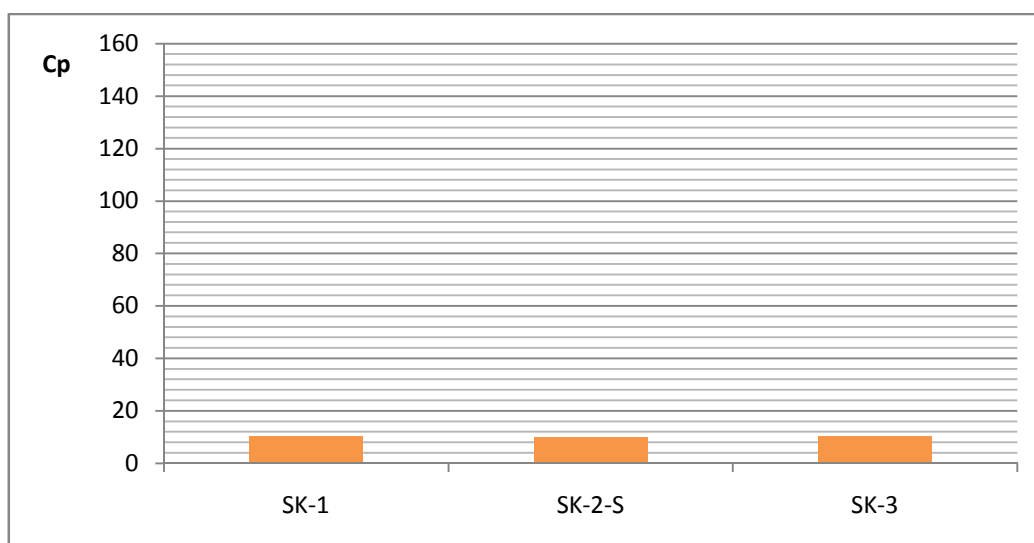
2) Sendvičové textilní kondenzátory

U realizovaných sendvičových kondenzátorů s rovnoběžnými deskovými textrodami, kdy jako dielektrikum slouží 3D tkanina, závisí kapacita především na stlačení. Z tohoto důvodu nejsou uváděné hodnoty příliš vypovídající. Pro lepší výsledky by bylo nezbytné provést měření kapacity v závislosti na míře stlačení, jehož výsledkem je hysterezní křivka.

Tab 3.9 Průměrné naměřené hodnoty sendvičových kondenzátorů realizovaných nažehlováním.

f [kHz]	SK-1		SK-2-S		SK-3	
	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D
1	10,2	0,0050	9,9	0,0225	10,2	0,0058
10	10,0	0,0028	9,6	0,0084	10,0	0,0039
100	10,0	0,0026	9,6	0,0044	10,0	0,0030
200	10,0	0,0026	9,5	0,0042	10,0	0,0029

Naměřené parametry jsou frekvenčně stabilní a v podstatě se nemění. Rozptylový, neboli ztrátový, činitel D je o dva řády nižší než v případě testovaných vzorků IDC. Na grafu níže je proto znázorněna pouze kapacita pro srovnání s vyššími kondenzátory.



Graf 3-9 Kapacita testovaných sendvičových kondenzátorů pro frekvenci 1 kHz.

Závěr

Tato práce se zabývá pouze velmi úzkou částí výzkumných a vývojových aktivit související s progresivně se rozvíjejícím sektorem e-textil. Vybrané technologie, postupy a materiály, které lze využít při návrhu a realizaci kondenzátorů na textilním substrátu jsou uvedeny v teoretické části. Při návrhu textilních kondenzátorů popsaných v kapitole 2 se počítá s textilií především jako s dielektrikem. Hlavní přínos práce spočívá v nalezení způsobu zvýšení kapacity textilních kondenzátorů. Všechny textilní materiály však typicky vykazují typicky velmi nízkou dielektrickou konstantu ($\epsilon_r > 2$), neboť většina textilní struktur obsahuje velký podíl vzduchu, což snižuje celkovou permitivitu. Vývoj projektu byl směřován proto prověřením možností jejího zvýšení. Experimentováno bylo s bavlněnou tkaninou (Substrát 1), včetně různých možností impregnace, a též se skleněnou tkaninou (Substrát 2). U návrhu kondenzátorů se vycházelo především z provedení součástek, které je možné přichytit, přilepit nebo přišít na textilní materiál. Pro porovnání byly vyšity interdigitální kondenzátory (IDC). Také byl realizován textilní sendvičový kondenzátor. Celkem bylo otestováno 16 různých vzorků. Elektrické parametry jsou závislé na frekvenci. Měřením paralelní kapacity C_p a ztrátového činitele D se zabývá předchozí kapitola.

Potvrdilo se, že vzhledem ke struktuře substrátu 1, je efektivnější zvolit šikmé vyšívání. Takto vyšité motivy jsou přesnější, vykazují větší odolnost stehů vůči mechanickému poškození a především vzroste kapacita kondenzátoru. Při porovnání IDC C s variantou IDC D, kdy jsou elektrody vyšity ve směru y / x , se jedná o rozdíl 5 - 15 % v závislosti na frekvenci a impregnaci. U těchto verzí, kdy jsou elektrody vyšity plným motivem, je kapacita obecně vyšší než v případě IDC A a IDC B s vyšitými elektrodami jednou vodivou nití. Impregnační zkušební vzorků v nasyceném roztoku NaCl narostla kapacita u všech variant vyšitých IDC na substrátu 1. Ze všech testovaných možností je nejvyšších naměřených hodnot kapacity dosaženo u varianty IDC C-S. Kapacita je desetinásobná pro frekvenci 1 kHz je na rozdíl od základního provedení IDC C. Jako problém navrhovaného řešení se jeví odolnost při praní. Kombinace vody, detergentu a mechanického namáhání může strukturu rozvolnit nebo zničit i přes zapouzdření. Předmětem dalších zkoumání bude zjištění mechanických vlastností a změn elektrických parametrů v závislosti na ohybu. Prohloubení znalostí vyžaduje otázka nanokompozitů, miniaturizace a zvládnutí zpracování metodami hromadné výroby.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] M. Hetzerová, "Diplomová práce: Studie možností aplikace senzorů v oděvech - snímání teploty, vlhkosti, tělesných funkcí osoby," Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní, 2006.
- [2] S. Eriksson, L. Berglin, E. Gunnarsson, L. Guo, H. Lindholm, and L. Sandsjö, "Three-dimensional multilayer fabric structures for interactive textiles," no. 0, pp. 3–8, 2010.
- [3] D. Michal and J. Řeboun, "Kontaktní struktury na textilních substrátech Contact Structures On Textile Substrates," pp. 85–88, 2018.
- [4] M. Blecha, Tomáš; Tichý, "Conductive Hybrid Threads and their application," 2019. [Online]. Available: <https://epci.eu/conductive-hybrid-threads-and-their-applications/>.
- [5] B. M. Jakubíček, "Diplomová práce. Nositelná anténa pro komunikaci v blízkosti lidského těla," Vysoké učení technické v Brně, 2015.
- [6] B. J. Balaban, "Bakalářská práce. Průmyslové chytré textilie," 2018.
- [7] A. Myers, Amanda; Bowles, "Wearable Electronics," 2017. [Online]. Available: <https://www.textileworld.com/textile-world/features/2017/03/wearable-electronics/>.
- [8] U. Gulzar *et al.*, "Next-generation textiles: From embedded supercapacitors to lithium ion batteries," *J. Mater. Chem. A*, vol. 4, no. 43, pp. 16771–16800, 2016.
- [9] B. M. Kovářik, "Diplomová práce. Vyšívání pasivní elektronické součástky," 2017.
- [10] C. Gonçalves, A. F. da Silva, J. Gomes, and R. Simoes, "Wearable e-textile technologies: A review on sensors, actuators and control elements," *Inventions*, vol. 3, no. 1, pp. 1–13, 2018.
- [11] L. M. Castano and A. B. Flatau, "Smart fabric sensors and e-textile technologies: A review," *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, no. 5, 2014.
- [12] B. S. Suchý, "Diplomová práce. Optimalizace technologického procesu vyšívání elektronických prvků pro chytré textilie," 2018.
- [13] P. Šohaj, "Diplomová práce. Spolehlivost tištěných a všívaných vodivých motivů v textilních substrátech," ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, 2014.
- [14] S. B. Stanković *et al.*, "Novel engineering approach to optimization of thermal comfort properties of hemp containing textiles," vol. 5000, 2019.
- [15] R. H. Gong, *Specialist Yarn and Fabric structures: Developments and applications*. Elsevier, 2011.
- [16] J. Mičúch, "Bakalářská práce. Antény realizované pomocí šití nebo pletení," 2018.
- [17] J. Skřivan and T. Blecha, "Testování senzorů natažení integrované v kompresních ponožkách," pp. 117–120, 2018.
- [18] I. S. Pretl, "Disertační práce. Heterostruktury na bázi organických vodivých materiálů," Západočeská univerzita v Plzni, 2015.
- [19] W. Rehnby, M. Gustafsson, and M. Skrifvars, "Coating of Textile Fabrics with Conductive Polymers for Smart Textile Coating of Textile Fabrics with Conductive Polymers for Smart Textile Applications," University College of Borås, 2013.
- [20] M. Stoppa and A. Chiolerio, "Wearable electronics and smart textiles: A critical review," *Sensors*

- (Switzerland), vol. 14, no. 7, pp. 11957–11992, 2014.
- [21] M. M. Ondrušková, “Druhy textilních materiálů.” [Online]. Available: <http://slideplayer.cz/slide/3409618/>.
- [22] “Z historie čalounických materiálů - tkané textilie.” [Online]. Available: <https://www.nabytek-dnes.cz/z-historie-calounicky-ch-materialu-tkane-textilie-p144>.
- [23] Y. Li, R. Torah, S. Beeby, and J. Tudor, “An all-inkjet printed flexible capacitor on a textile using a new poly (4-vinylphenol) dielectric ink for wearable applications,” pp. 5–8, 2012.
- [24] Y. Torah, R; Wei, “Printed Textile-based Electronic Devices,” in *Handbook of Smart Textiles*, 2015, pp. v–vi.
- [25] M. Pelíšková and S. P., “Vliv lehčené struktury na elektrické vlastnosti polymerních kompozitů s elektrovedivými plnivý,” Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2012.
- [26] J. Shi, “Smart Textile - Integrated Microelectronic Systems for wereable applications,” 2019.
- [27] Skolatextilu.cz, “Názvy vzorů pletenin.” [Online]. Available: <http://www.skolatextilu.cz/elearning/327/textilni-terminologie-zboziznalstvi/pleteniny/Nazvy-vzoru-pletenin.html>. [Accessed: 27-Apr-2020].
- [28] D. Matsouka, S. Vassiliadis, S. Mitilineos, N. Stathopoulos, and E. Siores, “Three-dimensional weft-knitted textile fabrics-based capacitors,” *J. Text. Inst.*, vol. 109, no. 1, pp. 98–105, 2018.
- [29] J. Hotovec, “Bakalářská práce. Textilní mikrovlnné komponenty,” Vysoké učení technické v Brně, 2017.
- [30] N. Sahbaz Karaduman, Y. Karaduman, H. Özdemir, and G. Ozdemir, “Textile Reinforced Structural Composites for Advanced Applications,” 2017.
- [31] Wikipedie, “3D tkanina.” [Online]. Available: https://www.wikiwand.com/cs/3D_tkanina.
- [32] J. Meyer, B. Arnrich, J. Schumm, and G. Troster, “Design and modeling of a textile pressure sensor for sitting posture classification,” *IEEE Sens. J.*, vol. 10, no. 8, pp. 1391–1398, 2010.
- [33] I. K. P. Zelová, “Předmět: Stroje a zařízení v oděvní výrobě.” [Online]. Available: <http://docplayer.cz/14722848-Predmet-stroje-a-zarizeni-v-odevni-vyrobe-strojni-sici-jehla-povrchove-upravy-yjehel-nove-trendy-jehel-ing-katarina-zelova-ph-d.html>.
- [34] I. J. Zouharová, “Konstrukce a povrchové úpravy srojných jehel.” [Online]. Available: <https://www.mmspektrum.com/clanek/konstrukce-a-povrchove-upravy-strojnich-sicich-jehel.html>.
- [35] ALPHASET, “Flex a flock fólie.” [Online]. Available: https://issuu.com/alphasetwerbeteknik/docs/flockaflex2017_cz?fbclid=IwAR12IDialbU5PQXakeMlK9JozlL5wmYTkPMYMIZGfWBK2qAbQGa2JOvWCVA.
- [36] B. M. Kokolia, “Diplomová práce. Nositelná rektifikační anténa pro RF sklizení energie,” Vysoké učení technické v Brně, 2016.
- [37] Y. Wei, R. Torah, K. Yang, S. Beeby, and J. Tudor, “Screen printing of a capacitive cantilever-based motion sensor on fabric using a novel sacrificial layer process for smart fabric applications.”
- [38] D. Waldhans, “Bakalářská práce. Využití tiskových technologií pro smart textil,” Univerzita Pardubice, 2019.
- [39] M. Zhou, H. Zhang, Y. Qiao, C. M. Li, and Z. Lu, “A flexible sandwich-structured supercapacitor with poly(vinyl alcohol)/H3PO4-soaked cotton fabric as solid electrolyte, separator and supporting layer,” *Cellulose*, vol. 25, no. 6, pp. 3459–3469, 2018.

- [40] J. Skřivan, "Diplomová práce: Testování ohebnosti flexibilních elektronických prvků a systémů," Západočeská univerzita, 2017.
- [41] RICE, "Aerosol Jet Printing aneb když tranzistor prochází tryskou," 2015. [Online]. Available: <https://vyvoj.hw.cz/trendy/aerosol-jet-printing-aneb-kdyz-tranzistor-prochazi-tryskou.html>.
- [42] T. Blecha and E. Engineering, "Printed and Embroidered Electronic Passive Components."
- [43] I. B. E. Z. Baterie, "Elektrina a magnetismus: V. Kapacita a dielektrika," pp. 1–39.
- [44] J. Mulopo and J. Abdulsalam, *Energy storage properties of graphene nanofillers*. Elsevier Inc., 2019.
- [45] D. I. J. Kotlan CSc., *Úvod do elektrotechniky*. Plzeň, 2007.
- [46] P. Pavelka, "Diplomová práce. Feroelektrika v elektrickém poli.," Vysoké učení technické v Brně, 2012.
- [47] Wikipedie, "Dielektrická pevnost." [Online]. Available: https://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrická_pevnost.
- [48] K. Tkotz, *Příručka pro elektrotechnika*. Brno: CENTA, spol. s.r.o., 2004.
- [49] A. Shlykevich, T. Bystricky, and T. Blecha, "View of High Frequency Properties of RF Planar Passive Components.pdf," 2017.
- [50] Wikipedie, "Kondenzátor." [Online]. Available: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kondenzátor>.
- [51] A. Munir and E. K. Sari, "Printed traveling wave antenna composed of interdigital capacitor structure for wireless communication application," *2015 Int. Semin. Intell. Technol. Its Appl. ISITIA 2015 - Proceeding*, pp. 441–444, 2015.
- [52] Wikipedie, "Supercapacitor." [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>.
- [53] S. Palchoudhury, K. Ramasamy, R. K. Gupta, and A. Gupta, "Flexible supercapacitors: A materials perspective," *Front. Mater.*, vol. 5, no. January, pp. 1–9, 2019.
- [54] U. Gulzar *et al.*, "Next-generation textiles: From embedded supercapacitors to lithium ion batteries," *J. Mater. Chem. A*, vol. 4, no. 43, pp. 16771–16800, 2016.
- [55] J. Meyer, P. Lukowicz, and G. Tr, "Textile Pressure Sensor for Muscle Activity and Motion Detection," pp. 2–5, 2006.
- [56] J. Hofman, "Bakalářská práce. 2D kapacitní senzor zatížení s textilní strukturou," České vysoké učení technické v Praze, 2015.
- [57] T. Hoffmann, B. Eilebrecht, and S. Leonhardt, "Respiratory monitoring system on the basis of capacitive textile force sensors," *IEEE Sens. J.*, vol. 11, no. 5, pp. 1112–1119, 2011.
- [58] S. Takamatsu, T. Yamashita, and T. Itoh, "Meter-scale large-area capacitive pressure sensors with fabric with stripe electrodes of conductive polymer-coated fibers," *Microsyst. Technol.*, vol. 22, no. 3, pp. 451–457, 2016.
- [59] X. Guo, Y. Huang, X. Cai, C. Liu, and P. Liu, "Capacitive wearable tactile sensor based on smart textile substrate with carbon black /silicone rubber composite dielectric," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 4, p. 45105, 2016.
- [60] Z. Ma, W. Wang, and D. Yu, "Assembled wearable mechanical sensor prepared based on cotton fabric," *J. Mater. Sci.*, vol. 55, no. 2, pp. 796–805, 2019.

- [61] Dielektrika.kvalitne.cz, “Statická dielektrická konstanta - tabulky.” [Online]. Available: <http://dielektrika.kvalitne.cz/tabulky.html>.
- [62] K. Černoch, “Šicí a vyšivací stroje Bernina,” 2019. [Online]. Available: <https://www.sici-stroj.cz/category/znacky-sici-stroje/sici-stroje-overlocky-bernina/>. [Accessed: 01-Oct-2019].
- [63] J. Hangya, “Bakalářská práce. Vliv korekčních činitelů na složky komplexní permitivity,” Vysoké učení technické v Brně, 2010.
- [64] “Keysight 16451B Dielectric Test Fixture.” [Online]. Available: <https://www.atecorp.com/products/keysight-technologies/16451b>. [Accessed: 09-May-2020].
- [65] “Druhy stehů a švů. Spojovací proces.” [Online]. Available: <http://docplayer.cz/7703202-Druhy-stehu-a-svu-spojovaci-proces.html>.

Přílohy

Příloha A.1 - Dodavatelé vodivých nití a látek. [6]

Název společnosti	Odkaz	Stát
3L TEX., CO.LTD	http://3ltex.com	China
AJIN ELECTRON	http://ajinelectron.co.kr/eng	Korea
BALTEX	https://www.baltex.co.uk/	UK
BEKAERT	http://bekaert.com	Belgie
CLEVER TEX	http://clevertex.cz	CZ
EEEONYX	http://eeonyx.com	USA
ELEKTRISOLA	https://www.elektrisola.com/	Německo
FUNZE	http://grunze.co.jp/english	Japonsko
HEATHCOAT FABRICS LTD	http://heathcoat.co.uk	UK
KARIL GRIMM GMBH	http://karl-grimm.com	Německo
LAIRD TECHNOLOGIES	http://lairdtech.com	UK
LAMÉ LIFESAVER	http://conductive-thread.ca	Canada
LESSEMF	http://lessemf.com	USA
MITSUFUJI	http://mitsufuji.co.jp/en/	Japonsko
NOBLE BIOMATERIALS, INC.	http://noblebiomaterials.com	USA
OTEX SPECIALTY NARROW FABRICS	http://osnf.com	USA
PLUGANDWEAR	http://plugandwear.com	Itálie
SHIELDEX	http://shieldextrading.net	USA
SWISS-SHIELD	https://www.swiss-shield.ch/	Švýcarsko
SPARKFUN ELECTRONICS	http://sparkfun.com	USA
STATEX	http://statex.de	Německo
STATICFACTION INC.	http://staticfaction.com	USA
SYSCOM ADVANCED MATERIALS	http://metalcladfibers.com	USA
TORAY TEXTILES EUROPE LTD.	http://seeitsafe.co.uk	UK
V TECHNICAL TEXTILES INC	http://fine-silver-productsnet.com	USA

Příloha A.2 - Někteří výrobci a dodavatelé vodivých barev.

Název společnosti	Odkaz	Stát
CREATIVE MATERIALS INC.	http://www.creativematerials.com/	USA
DUPONT	https://www.dupont.com/	USA
HENKEL	https://www.henkel-adhesives.com/	
KONTAKT CHEMIE	http://www.kontaktchemie.com/	Německo
SMART FABRIC INKS	http://www.fabinks.com/	UK
SOLVAY	https://www.solvay.com/	Belgie
SUN CHEMICAL	https://www.sunchemical.com/	USA

Příloha B - FLEX a FLOCK fólie. [35]

FLEXOVÉ FÓLIE											
název :	základ	tloušťka [μm]	zpětná lepivost	teplota [°C]	doba [s]	tlak	sejmutí přenosové fólie	praní	sušička	chem. čist.	vhodné druhy textilií :
PREMIUMFLEX	PU	100	ano	160	15	střední	za tepla	80°	ano	ano	bavlna, PES, PES/akryl
PREMIUMFLEX BLOCKOUT	PU	125	ano	160	15	střední	horká	60°	-	ano	PES barvené sublimací, softshell
PREMIUMFLEX REFLEXNÍ	PU	160	ano	160	15	střední	horká	60°	ano	-	bavlna, PES, PES/akryl
MAXFLEX	PU	90	ano	150	15	střední	za tepla/studena	80°	ano	-	bavlna, PES
MAXFLEX BLOCKOUT	PU	110	ano	130	15	střední	za tepla/studena	40°	-	-	PES barvené sublimací
STRETCHFLEX	PU	90	mírná	155	15	střední	za tepla/studena	60°	ano	-	lycra, elastan, bavlna, PES)
PROFIFLEX	PU	50	mírná	150-160	15-20	střední	za studena	80°	ano	ano	bavlna, PES
PROFIFLEX BLOCKOUT	PU	110	mírná	150-160	15-20	střední	za studena	80°	-	ano	PES barvené sublimací, softshell
PROFIFLEX REFLEXNÍ	PU	150	mírná	160	20	střední	za studena	60°	ano	ano	bavlna, PES
VIDEOFLEX	PVC	250	-	150	15	střední	za studena	80°	ano	-	bavlna, PES
EASYFLEX	PU	105/125	ano	150	10-15	střední	za studena	90°	ano	-	bavlna, PES, akryl
PREMIUM FLEX NYLON	PU	100	ano	150	3-4	nízký	vlažné	40°	-	-	impregnovatelný a voděodolný nylon a obtížně zpracovatelné materiály

MULTIFUNKČNÍ FLEXOVÉ FÓLIE

PREMIUMFLEX UNIVERSAL	PU	95	ano	130	5	střední	za tepla/studena	60°	ano	ano	bavlna, PES	
				150	4							
				160	3							
				150	5	nízký	za tepla/studena	60°	ano	ano	PES/akryl	
MAXFLEX UNIVERSAL	PU	90	mírná	120	5	nízký	za tepla/studena	40°	ne	ne	neimpregnovaný nylon	
				120	5	vyšší	za tepla/studena	60°	ano	-	bavlna, PES, elastan	
PROFIFLEX UNIVERSAL	PU	70	mírná	120	20	střední/vysoký	za tepla/studena	60°	ano	ano	bavlna, PES	
				110-115	25-30	střední/vysoký	za tepla/studena	60°	ano	ano	bavlna, PES	
				140	5-7	střední/vysoký	za tepla/studena	60°	ano	ano	bavlna, PES	
				140	20-25	střední/vysoký	za tepla/studena	40°	ano	ano	nylon	

FLOCKOVÉ FÓLIE

PREMIUMFLOCK	viskóza	500	ano	160	15	nízký	za tepla	60°	ne	ano	přírodní i syntetické tkaniny
S VELUROVÝM POVRCHEM											
STRIPFLOCK	viskóza	500	mírná								
PROFIFLOCK	viskóza	600	mírná								

POTISKNUTELNÉ FLOCKOVÉ FÓLIE

K POTISKU NA SOLVENTNÍCH A LATEXOVÝCH TISKÁRNÁCH											
PRINTFLOCK	PVC	450 μm	ano	160-170 °C	15-17 s	střední	-	40°	ano	ano	bavlna, PES
PRO PŘENOS SE SUBLIMAČNÍM INKOUSTEM											
SUBLIFLOCK - Premium	PES	400 μm	ano	160-170 °C	15-17 s	střední	-	60°	ano	ano	nylon, polyamid

POTISKNUTELNÉ FLEXOVÉ FÓLIE DIGIFLEX

K POTISKU NA SOLVENTNÍCH TISKÁRNÁCH											
CLASSICPRINT mat	PVC	140	-	165	17	střední/vysoký	za tepla	60°	ano	ano	bavlna, PES
K POTISKU NA SOLVENTNÍCH A LATEXOVÝCH TISKÁRNÁCH											
EASY mat	PVC	160	-	160	20	střední	horká	60°	ano	-	bavlna, PES bez sublimace, akryl
Nylon - EASY mat	PVC	160	-	140	20	střední	za tepla	40°	ano	-	nylon, PAD
Nylon - EASY satén	PVC	150	-	165	15	střední	za tepla	40°	-	-	nylon, PAD
COLORPRINT PU mat	PU	80	-	155	15	střední	za tepla	60°	ano	-	bavlna, PES, elastan
TOUCH mat	PU	50	-	160	20	střední	horké	60°	ano	-	bavlna, PES
MASTER lesk / mat	PU	80	-	160	15	střední	za tepla	80°	ano	-	bavlny, PES
MASTER UNIVERSAL mat	PU	80	ano	130	5	střední	za tepla	60°	ano	-	bavlna, PES
				150	4						
				160	3						
				150	5	nízký	za tepla	60°	ano	-	neimpregnovaný nylon
SUBLIBLOCK THIN mat	PU	110	-	130	20	střední	za tepla	40°	-	-	PES barvené sublimací
SUBLIBLOCK PROFI mat	PU	100	-	160	20	střední	horké	60°	-	-	PES barvené sublimací
CLEAR mat	PU	60	ano	160	15	střední/vysoký	za tepla	60°	-	-	světlé, neposilované materiály
K POTISKU NA SOLVENTNÍCH, LATEXOVÝCH A UV TISKÁRNÁCH											
LT mat	PU	60	-	135	20	střední/vysoký	vlažné	60°	ano	ano	bavlna, PES nebarvený sublimací
K POTISKU PIGMENTOVÝM INKOUSTEM											
Pigment mat	PU	400	-	160	15	střední	za tepla	60°	-	-	bavlna, PES

Příloha C.1 - Naměřené hodnoty základního bavlněného textilního substrátu.

	f [kHz]	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D
Substrát 1	1	36,14	0,2538	35,49	0,2700	40,04	0,2696
	10	26,87	0,1854	26,16	0,1900	29,44	0,1919
	100	21,63	0,1346	21,01	0,1359	23,60	0,1365
	200	20,51	0,1234	19,09	0,1242	22,37	0,1246
	1	36,30	0,2628	37,99	0,2576	36,65	0,2660
	10	26,81	0,1890	28,17	0,1864	27,04	0,1905
	100	21,52	0,1360	22,67	0,1341	21,66	0,1370
	200	20,39	0,1244	21,50	0,1227	20,51	0,1259

Příloha C.2 - Naměřené hodnoty bavlněného textilního substrátu s impregnací.

	f [kHz]	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D
Substrát 1-I	1	25,67	0,1912	23,92	0,1919	26,79	0,1962
	10	20,88	0,1212	19,37	0,1237	21,52	0,1301
	100	18,31	0,0784	16,92	0,0808	18,63	0,0869
	200	17,77	0,0712	16,41	0,0735	18,02	0,0792
	1	25,61	0,1913	24,67	0,1940	23,39	0,1955
	10	20,84	0,1207	19,80	0,1310	18,85	0,1271
	100	18,29	0,0779	17,09	0,0887	16,41	0,0830
	200	17,76	0,0708	16,51	0,0809	15,89	0,0754

Příloha C.3 - Naměřené hodnoty bavlněného textilního substrátu s lakováním.

	f [kHz]	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D
Substrát 1-L	1	19,12	0,1675	22,40	0,1597	25,28	0,1666
	10	15,47	0,1349	18,33	0,1304	20,61	0,1327
	100	13,15	0,1030	15,71	0,0986	17,63	0,0991
	200	12,63	0,0956	15,13	0,0912	17,00	0,0914
	1	20,40	0,1612	19,42	0,1545	26,60	0,1710
	10	16,65	0,1303	15,87	0,1292	21,54	0,1359
	100	14,24	0,0988	13,53	0,0991	18,33	0,1009
	200	13,72	0,0914	13,02	0,0919	17,67	0,0930

Příloha C.4 - Naměřené hodnoty textilních substrátů impregnovaného v NaCl.

	f [kHz]	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D
Substrát 1-S	1	57,95	0,2116	47,90	0,1940	50,78	0,2071
	10	44,21	0,1996	36,64	0,1903	39,15	0,1920
	100	32,86	0,2001	27,67	0,1911	29,42	0,1949
	200	30,15	0,1963	25,47	0,1878	27,05	0,1915
	1	48,60	0,3940	50,70	0,3666	51,86	0,4239
	10	35,61	0,2250	38,81	0,2143	39,47	0,2273
	100	26,60	0,2016	28,98	0,2045	29,40	0,2076
	200	24,41	0,1969	26,53	0,2016	26,90	0,2043

Příloha C.5 - Naměřené hodnoty textilních substrátů ze skelné tkaniny.

	f [kHz]	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D
Substrát 2	1	67,00	0,1800	72,80	0,2110	66,00	0,1073
	10	61,15	0,0460	64,86	0,066	60,25	0,0559
	100	58,60	0,0202	61,59	0,0288	56,72	0,0338
	200	58,15	0,0153	61,02	0,02275	55,99	0,0284
	1	61,35	0,0264	59,99	0,1054	70,10	0,0978
	10	59,90	0,0140	55,27	0,0450	64,96	0,0473
	100	59,19	0,0081	52,89	0,0239	61,88	0,0264
	200	59,04	0,0669	52,40	0,0199	61,29	0,0217

Příloha C.6 - Naměřené hodnoty vícevrstvých textilních substrátů ze skelné tkaniny.

	f [kHz]	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D
Substrát 2B	1	32,81	0,052	32,86	0,085	31,80	0,1029
	10	30,843	0,0361	29,68	0,069	28,10	0,07
	100	29,598	0,0233	27,806	0,0358	25,90	0,0450
	200	29,338	0,02028	27,401	0,03065	25,40	0,0385

Příloha D - Rozdělení stehů podle počtu jehel a nití potřebných k realizaci.

Třída	Název	Počet nití
100	řetízkové stehy	1 nit (1 nebo více jehel)
200	ruční stehy	1 nit
300	vázané stehy	2 nebo více skupin nití, které se provazují
400	vícenitné-řetízkové stehy	2 nebo více skupin nití, které se provazují smyčkami
500	obnitkovací řetízkové stehy	2 nebo více skupin nití
600	krycí řetízkové stehy	3 a více skupin nití

Nejjednodušším typem je vázaný steh pomocí dvou, nebo více nití, které se provazují. Řetízkové vazby vykazují vysokou tažnost a lepší paratelnost. U třídy 500 smyčky 1. skupiny nití prochází materiálem a druhá skupina je vedena kolem okraje a protažena zpět k místu vpichu. U 600 dvě skupiny pokrývají povrch materiálu a další je provazuje z obou stran. Řada vzájemně spojených stehů se označuje jako štěp a dělí se podle funkce (švový, základní, lícní, vnitřní, zajišťovací, skrytý atd.) a podle stehů (ruční, strojový, ozdobný atd). [65]

Příloha E.1 - vyšité interdigitální kondenzátory - 20 prstů.

Design Worksheet

BERNINA Embroidery Software DesignerPlus

Design: C-interdigital n20 l-40mm w-0mm-jeden vodič, verze 2 - kvýšiti 01_step fills

IDC A

Stitches: 1645
 Colors: 12
 Height: 38.4 mm
 Width: 52.3 mm
 Zoom: 2.58



Fabric type: F7 Woven Medium Weight
 Required stabilizer: Topping: Backing: Poly Mesh or Cut Away x 2
 Total bobbin: 2.65m

Color Sequence:

#	Brand	Code	Description	Thread
1.	BERNINA	1	Blue	0.26m
2.	BERNINA	2	Cyan	0.25m
3.	BERNINA	12	Powder Blue	0.25m
4.	BERNINA	14	Grey	0.25m
5.	BERNINA	16	Pastel Blue	0.25m
6.	BERNINA	30	Ghost Green	0.26m
7.	BERNINA	31	Mint Green	0.25m
8.	BERNINA	33	Chartreuse	0.25m
9.	BERNINA	34	Moon Green	0.25m
10.	BERNINA	28	Sea Green	0.25m
11.	BERNINA	4	Yellow	2.59m
12.	BERNINA	9	Orange	2.66m

Design Worksheet

BERNINA Embroidery Software DesignerPlus

Design: C-interdigital n20 l-40mm w-0mm-jeden vodič, verze1_satin fill_2020

IDC B

Stitches: 1290
 Colors: 12
 Height: 38.4 mm
 Width: 52.3 mm
 Zoom: 2.58



Fabric type: F7 Woven Medium Weight
 Required stabilizer: Topping: Backing: Poly Mesh or Cut Away x 2
 Total bobbin: 3.37m

Color Sequence:

#	Brand	Code	Description	Thread
1.	BERNINA	1	Blue	0.26m
2.	BERNINA	2	Cyan	0.25m
3.	BERNINA	12	Powder Blue	0.25m
4.	BERNINA	14	Grey	0.25m
5.	BERNINA	16	Pastel Blue	0.25m
6.	BERNINA	30	Ghost Green	0.26m
7.	BERNINA	31	Mint Green	0.25m
8.	BERNINA	33	Chartreuse	0.25m
9.	BERNINA	34	Moon Green	0.25m
10.	BERNINA	28	Sea Green	0.25m
11.	BERNINA	4	Yellow	2.84m
12.	BERNINA	9	Orange	2.91m

Příloha E.2 - vyšité interdigitální kondenzátory - 10 prstů.

Design Worksheet

BERNINA Embroidery Software DesignerPlus

Design: C-interdigital n10 l-40mm w-1mm, verze 2 - k vyšití 02_step fills

IDC C

Stitches: 5001
 Colors: 2
 Height: 38.5 mm
 Width: 52.3 mm
 Zoom: 2.63



Fabric type: F7 Woven Medium Weight
 Required stabilizer: Topping: Backing: Poly Mesh or Cut Away x 2

Total bobbin: 7.66m

Color Sequence:

#	Brand	Code	Description	Thread
1.	BERNINA	1	Blue	11.48m
2.	BERNINA	3	Green	11.45m

Design Worksheet

BERNINA Embroidery Software DesignerPlus

Design: C-interdigital n10 l-40mm w-1mm, verze1_satin fills_2020

IDC D

Stitches: 3199
 Colors: 2
 Height: 38.1 mm
 Width: 52.4 mm
 Zoom: 2.62



Fabric type: F7 Woven Medium Weight
 Required stabilizer: Topping: Backing: Poly Mesh or Cut Away x 2

Total bobbin: 10.27m

Color Sequence:

#	Brand	Code	Description	Thread
1.	BERNINA	1	Blue	11.69m
2.	BERNINA	3	Green	12.04m

Příloha F.1 - Naměřené hodnoty IDC kondenzátorů s designem/označením A.

	f [kHz]	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D
IDC A	1	8,78	0,3580	9,30	0,3820	9,30	0,3970
	10	6,33	0,2110	6,37	0,2150	6,33	0,2230
	100	5,16	0,1130	5,15	0,1180	5,08	0,1210
	200	4,91	0,0952	4,92	0,0994	4,85	0,1020
IDC A-S	1	46,20	0,6440	45,60	0,6360	47,40	0,6660
	10	25,00	0,5260	23,70	0,5160	23,70	0,5220
	100	13,20	0,4090	12,80	0,4030	12,70	0,4070
	200	11,35	0,3650	11,11	0,3620	10,90	0,3630
IDC A-ST	1	11,50	0,3670	12,90	0,4000	12,01	0,4000
	10	8,42	0,2340	8,45	0,2260	8,00	0,2270
	100	6,60	0,1230	6,72	0,1240	6,40	0,1260
	200	6,27	0,1020	6,40	0,1040	6,11	0,1050

Příloha F.2 - Naměřené hodnoty IDC kondenzátorů s designem/označením B.

	f [kHz]	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D
IDC B	1K	10,56	0,3760	10,50	0,3740	10,27	0,3950
	10K	7,60	0,2360	7,30	0,2130	6,90	0,2340
	100K	6,00	0,1240	5,90	0,1160	5,33	0,1760
	200K	5,71	0,1030	5,60	0,0970	5,40	0,0987
IDC B-S	1K	33,20	0,8850	34,50	0,9500	33,60	0,8700
	10K	17,40	0,6130	16,60	0,5860	16,05	0,5880
	100K	9,03	0,4260	8,90	0,4130	8,50	0,4260
	200K	7,67	0,3720	7,67	0,3650	7,30	0,3760
IDC B-ST	1K	11,50	0,3920	11,15	0,3900	11,70	0,4020
	10K	7,78	0,2200	7,61	0,2200	7,70	0,2250
	100K	6,28	0,1200	6,15	0,1200	6,22	0,1220
	200K	6,00	0,1010	5,87	0,1000	5,92	0,1030

Příloha F.3 - Naměřené hodnoty IDC kondenzátorů s designem/označením C.

	f [kHz]	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D
IDC C	1	14,40	0,5230	14,40	0,5260	15,43	0,5800
	10	10,10	0,2520	9,80	0,2370	10,10	0,2510
	100	8,10	0,1210	7,98	0,1160	8,10	0,1210
	200	7,80	0,0995	7,66	0,0950	7,75	0,0978
IDC C-S	1	150,00	2,1610	144,00	1,9200	152,00	2,2000
	10	44,00	1,2810	42,70	1,2430	45,00	1,2940
	100	19,55	0,6430	19,30	0,6260	19,65	0,6400
	200	16,30	0,5180	16,20	0,5070	16,40	0,5170
IDC C-ST	1	16,10	0,5700	15,20	0,5310	15,70	0,5600
	10	10,46	0,2430	10,40	0,2390	10,43	0,2420
	100	8,45	0,1170	8,43	0,1160	8,45	0,1170
	200	8,09	0,0955	8,08	0,0950	8,10	0,0960
IDC C-3ST	1	6,70	0,0330	6,90	0,0315	6,90	0,029
	10	6,40	0,0160	6,66	0,0140	6,60	0,014
	100	6,30	0,0700	6,60	0,0070	6,55	0,007
	200	6,30	0,0050	6,56	0,0058	6,50	0,006

Příloha F.4 - Naměřené hodnoty IDC kondenzátorů s designem/označením D.

	f [kHz]	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D
IDC D	1	13,30	0,5060	14,40	0,5630	13,20	0,5130
	10	9,24	0,2240	9,50	0,2400	9,10	0,2270
	100	7,62	0,1070	7,75	0,1120	7,50	0,1080
	200	7,42	0,0940	7,42	0,0910	7,20	0,0883
IDC D-S	1	126,80	1,5300	128,00	1,5400	121,00	1,4190
	10	38,70	1,0900	38,30	1,0890	37,30	1,0724
	100	17,60	0,5730	17,40	0,5700	17,30	0,5660
	200	14,93	0,4630	14,70	0,4570	14,70	0,4580
IDC D-ST	1	15,50	0,5850	16,05	0,6200	14,50	0,5190
	10	10,23	0,2470	10,30	0,2550	9,95	0,2290
	100	8,26	0,1150	8,24	0,1170	8,17	0,1090
	200	7,93	0,0920	7,87	0,0930	7,86	0,0886

Příloha G - Naměřené hodnoty testovaných sendvičových kondenzátorů.

Sendvič	f [kHz]	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D	Cp [pF]	D
SK-1	1	10,30	0,0050	10,20	0,0050	10,00	0,0050
	10	10,20	0,0030	10,02	0,0030	9,85	0,0025
	100	10,19	0,0026	10,03	0,0030	9,84	0,0022
	200	10,17	0,0026	9,93	0,0025	9,84	0,0027
SK-2-S	1	9,80	0,0140	10,07	0,0310	9,84	0,0225
	10	9,60	0,0060	9,70	0,0110	9,60	0,0083
	100	9,60	0,0036	9,70	0,0053	9,60	0,0043
	200	9,60	0,0036	9,60	0,0050	9,42	0,0040
SK-3	1	10,1	0,0060	10,30	0,0060	10,20	0,0053
	10	9,80	0,0040	10,12	0,0043	10,00	0,0033
	100	10,0	0,0030	10,13	0,0034	10,02	0,0027
	200	9,95	0,0030	10,01	0,0031	9,89	0,0025