

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vliv údržby textilií a parametrů prostředí na elektrické  
vlastnosti vyšíváných pasivních součástek**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan FOU D**  
Osobní číslo: **E17N0007P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Vliv údržby textilií a parametrů prostředí na elektrické vlastnosti vyšívaných pasivních součástek**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou návrhu vodivých motivů na textilních substrátech a technologiemi jejich vytváření.
2. Navrhněte testovací vzorky vyšívaných pasivních elektronických součástek na textilních substrátech.
3. Zjistěte vliv údržby textilií na elektrické parametry vyšívaných pasivních součástek.
4. Proměřte elektrické parametry vyšívaných elektronických součástek v závislosti na parametrech vnějšího prostředí.
5. Kriticky zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Hoffmann K.: Planární mikrovlnné obvody
2. Mattila, H.R.: Intelligent textiles and clothing
3. Schneegass, S.: Smart textiles - Fundamentals, Design and Interaction
4. Internetové zdroje

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Tomáš Blecha, Ph.D.

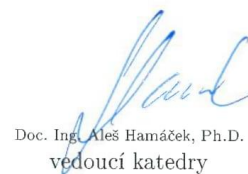
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019



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



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

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na vliv údržby textilií a parametrů prostředí na elektrické vlastnosti vyšíváných pasivních součástek. V práci jsou popsány technologie pro výrobu chytrých textilií a současný stav jejich údržby. Práce se dále zabývá návrhem, výrobou a testováním vlivu ohybu, navlhčení umělým potem a údržby textilií na elektrické vlastnosti vyšíváných pasivních součástek.

## **Klíčová slova**

vodivá nit, vyšívání, údržba chytrých textilií, vyšíváné pasivní součástky, měření vyšíváných součástek, rezonanční charakteristiky

## **Abstract**

This thesis is aimed on the influence of textile maintenance and environmental parameters on the electrical properties of embroidered passive components. The thesis describes technologies for the production of smart textiles and the current state in the issue of their maintenance. The thesis also deals with the design, production and testing of the effect of bending, moistening with artificial perspiration and the maintenance of textiles on the electrical properties of embroidered passive components.

## **Key words**

conductive thread, embroidery, smart fabric maintenance, embroidered passive components, embroidered parts measurement, resonance characteristics

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou 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 24.5.2019

Bc. Jan Foud

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Tomášovi Blechovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat členům Katedry technologií a měření za pomoc při přípravě a realizaci výzkumu.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 CHYTRÉ TEXTILIE</b> .....	<b>11</b>
1.1 HISTORIE CHYTRÝCH TEXTILÍ.....	11
1.2 VODIVÉ NITĚ.....	12
1.3 TECHNOLOGIE CHYTRÝCH TEXTILÍ.....	14
1.3.1 Tkání.....	15
1.3.2 Pletení.....	16
1.3.3 Netkané textilie.....	17
1.3.4 Vyšívání.....	17
1.3.5 Vodivé pasty pro tisk na textilní substráty.....	18
1.3.6 Vodivá folie a tkanina.....	19
1.3.7 Tažení drátků.....	19
1.3.8 Senzory.....	19
1.4 KONTAKTOVÁNÍ.....	20
1.5 PRAVIDELNÁ ÚDRŽBA CHYTRÝCH TEXTILÍ A ZKOUMÁNÍ VLIVU PROSTŘEDÍ NA ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI.....	21
1.5.1 Současný stav.....	21
1.5.2 Zhodnocení současného stavu.....	25
<b>2 PLANÁRNÍ PASIVNÍ SOUČÁSTKY</b> .....	<b>26</b>
2.1 CÍVKY.....	27
2.1.1 Meandrová cívka.....	27
2.1.2 Čtvercová spirála.....	28
2.2 KONDENZÁTOR.....	29
2.2.1 Interdigitální kondenzátor.....	29
2.3 NÁVRH VZORKŮ.....	29
2.3.1 Cívky typu meandr.....	30
2.3.2 Cívky typu čtvercová spirála.....	31
2.3.3 Interdigitální kondenzátory.....	33
2.4 VÝROBA VZORKŮ.....	35
<b>3 MĚŘENÍ</b> .....	<b>38</b>
3.1 MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ PLANÁRNÍCH VYŠÍVANÝCH SOUČÁSTEK.....	38
3.1.1 Naměřené a vypočítané hodnoty $L_s$ , $C_p$ .....	39
3.1.2 Zhodnocení měření základních parametrů.....	40
3.2 MĚŘENÍ VLIVU OHYBU A POTU NA REZONANČNÍ CHARAKTERISTIKY PASIVNÍCH SOUČÁSTEK.....	40
3.2.1 Postup měření vzorků.....	41
3.2.2 Výsledné průběhy.....	43
3.2.3 Zhodnocení vlivu ohybu a navlhčení potem na rezonanční charakteristiky.....	45
3.3 MĚŘENÍ VLIVU ÚDRŽBY VYŠÍVANÝCH PASIVNÍCH SOUČÁSTEK.....	46
3.3.1 Měření základních parametrů v závislosti na vlivu údržby.....	47
3.3.2 Měření vlivu údržby na rezonanční charakteristiky pasivních součástek.....	53
3.3.3 Zhodnocení vlivu údržby na pasivní součástky.....	59
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>62</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>64</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>



## Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na vliv údržby textilií a parametrů prostředí na elektrické vlastnosti vyšíváných pasivních součástek.

Cílem diplomové práce je navrhnout vyšívané pasivní součástky a proměřit vliv údržby textilií a parametrů prostředí na elektrické vlastnosti těchto vyšíváných pasivních součástek, tak aby byly co nejvěrohodněji napodobeny reálné provozní podmínky používání textilií. Navrženými pasivními součástkami jsou planární cívky a kondenzátory. Vyšívané planární pasivní součástky jsou v době psaní diplomové práce poměrně neznámou problematikou, která je předmětem výzkumu. Cílem bude ověření elektrických vlastností součástek při ohybu a při zvlhčení potem. Pro test vlivu údržby vyšíváných pasivních součástek bylo realizováno celkem 20 pracích cyklů.

Diplomová práce je rozdělena do tří částí. První část se věnuje stručné historii, vodivým nitím, popisu současného stavu v oblasti chytrých textilií a metod na jejich vytváření. Mezi tyto metody patří technologie tkaní, pletení, netkané textilie, vyšívání, vodivé folie a tkaniny, vodivé pasty určené pro tisk na textilií. Tato kapitola se dále zabývá popisem metod kontaktování na chytrých textiliích. Kapitola se dále zaměřuje na popis současného stavu v problematice údržby chytrých textilií. Druhá kapitola se věnuje problematice planárních pasivních součástek. Tato kapitola se dále zabývá návrhem vyšíváných pasivních součástek a jejich výrobou. Navrženými pasivními součástkami byla cívka a kondenzátor. Poslední kapitola je věnována praktické části. Praktická část se zaměřuje na měření hodnot vlivu údržby textilií a parametrů prostředí na elektrické vlastnosti vyšíváných pasivních součástek.

## Seznam symbolů a zkratk

L [H] .....	Indukčnost
C <sub>s</sub> [F].....	Sériová kapacita
ε <sub>0</sub> [F. m <sup>-1</sup> ] .....	Permitivita vakua
ε <sub>r</sub> [-] .....	Relativní permitivita
R [Ω].....	Elektrický odpor
L <sub>s</sub> [H] .....	Sériová indukčnost
C <sub>p</sub> [F] .....	Paralelní kapacita
pH [-] .....	Potential of hydrogen (Vodíkový exponent)
C [F].....	Kapacita
f [Hz] .....	Frekvence
U [V].....	Elektrické napětí
Z [Ω] .....	Impedance
φ [°].....	Fázový posuv
Q [-] .....	Činitel jakosti
Ø [m] .....	Průměr
RFID .....	Radio Frequency Identification (Identifikace na rádiové frekvenci)
ISO.....	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)

# 1 Chytré textilie

Chytré textilie jsou textilní oděvy, které jsou rozšířené o zabudovanou elektroniku, jako jsou propleté či vyšité obvody, senzory a další hardware, který dodává inteligentní funkce. Chytré textilie mohou být připojeny k dalšímu zařízení pomocí Bluetooth nebo Wi-Fi. Výhodou chytrých textilií je kombinace vlastností látek s elektrickými vlastnostmi, které jsou do látek implementovány vodivými nitěmi. [1]

Do dnešních dnů vzniklo spoustu příkladů chytrých textilií. Například prostěradlo pro monitorování životních funkcí nebo oblek pro hasiče vyvinutý na Západočeské univerzitě v Plzni. Vývoj v oblasti inteligentních textilních materiálů jde neustále dopředu a rozšíření do běžného komerčního prodeje oblečení nás teprve čeká.

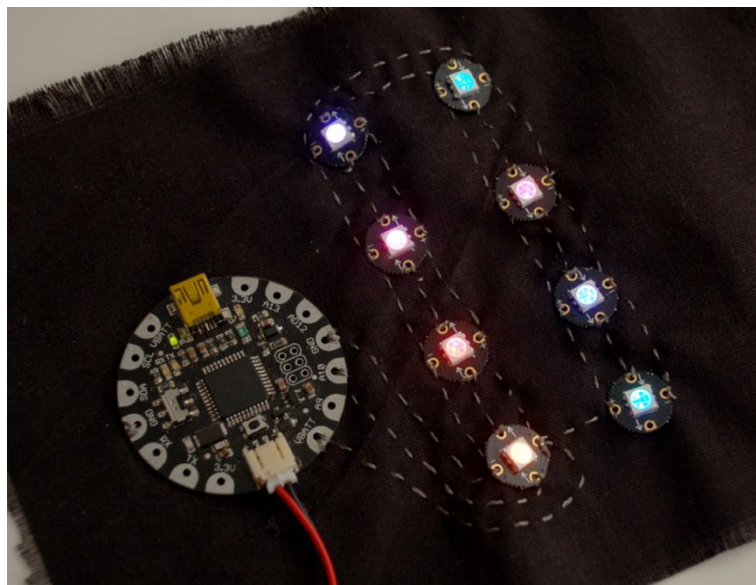
## 1.1 Historie chytrých textilií

Za počátek v používání vodivých vláken se dá považovat počátek 17. století, konkrétně alžbětinská doba. V tomto období byly používány do oděvů zlaté nitě, nikoliv z důvodu vedení elektrického signálu, ale z důvodu estetického. Za úplný počátek vyšíváných vodivých materiálů se dá považovat počátek 90. let 20. století, kdy bylo vyvíjeno inteligentní oblečení pro vojenské účely. V roce 1996 přišla ve známost vodivá tkanina pro odstínění elektromagnetického pole. V roce 1998 dochází k založení firmy s módním oblečením Moondial, která navrhovala oblečení se světelnými efekty. Ukázkou šatů, které využívají světelnou technologii lze vidět na *obr. 1.1*. V roce 2000 byla realizována vyšíváná klávesnice. Ve stejném roce spouští firma Plug and Wear prodej vodivých nití. [2]



*Obr. 1.1 Šaty, které využívají světelnou technologii. [3]*

V roce 2007 dochází k vyvinutí prvního mikrokontroléru FLORA vyrobeného speciálně pro textilní použití, který slouží k řízení ostatních komponentů připojených na chytrou textilií (obr. 1.2). [4]



Obr. 1.2 Mikrokontrolér FLORA připojený na chytrou textilií. [5]

V roce 2012 vzniká společností Drexel Haute technologická laboratoř, která se zabývá vývojem inteligentních tkanin a výzkumem textilních aditiv. V roce 2014 společnost DuPont uvádí na trh nový roztažitelný vodivý inkoust pro tiskařské metody, který je vhodný i pro tisk na textilie. Ve stejném roce přichází společnost Bebop Sensors s textilními obvody vytvořenými inkoustem od společnosti Dupont. [2]

## 1.2 Vodivé nitě

Dříve byly kovové nitě určené pro dekorativní účely na oblečení, v dnešní době lze těžit z jejich vlastností vodivosti pro použití na inteligentních textiliích. Vodivé nitě lze použít k vytváření pasivních elektronických komponent, jako jsou kondenzátory či cívky, dále k vytvoření vodivých cest mezi komponenty, kontaktování elektrických komponent či k vytvoření vyšíváných antén. Různé typy vodivých nití jsou zachycené na obr. 1.3.

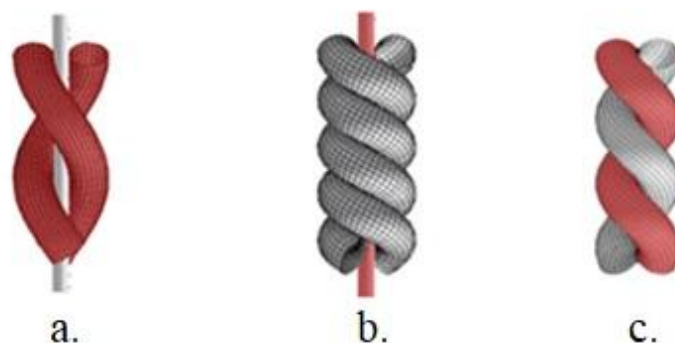
Vodivé nitě by měly splňovat podmínky dobré elektrické vodivosti, stálosti na vzduchu, pevnosti, ohebnosti a odolnosti proti pracím cyklům. V dnešní době existuje mnoho výrobců vodivých nití. Na výběr máme nitě ze stočených vodivých drátků, které jsou většinou měděné nebo nerezové. Tyto nitě, ale nejsou moc vhodné, protože jsou křehké a tuhé. Jako alternativy byly navrženy vodivé polymery, které však mají nižší

vodivost. Další variantou jsou potažená nevodivá vlákna, nejčastěji stříbrem. Nosná potažená vlákna mohou být přírodní nebo syntetická. Mezi přírodní vlákna patří bavlna a mezi syntetická polyester a nylon. Potahování nevodivých nití vodivou vrstvou se provádí chemickou cestou, kde jsou vodivé částičky velikosti nanočástic. [6]



Obr. 1.3 Různé typy vodivých nití.

Nejvíce používanými nitěmi jsou nitě, které vznikají propletením vodivých a nevodivých nosných nití. Kombinace vodivých drátků s nevodivými vlákny se nazývá hybridní kovová nit. Tyto nitě se dělí do tří typů. Prvním typem je kovová nit, která je složená z kovu a nevodivé nitě. Nevodivá nit slouží jako nosný prvek, okolo kterého je obalena jedna nebo více kovových drátků. Nákres této nitě je zachycen na *obr. 1.4.a*. Druhým typem jsou kovově plné nitě, u těchto nití je kovový drátek uprostřed a okolo něho jsou otočeny nevodivé nitě. V tomto případě nevodivé nitě zajišťují elektrickou izolaci a zabraňují mechanickému poškození vodivého drátku. Nákres této nitě je zachycen na *obr. 1.4.b*. Poslední typ neobsahuje částí jádra a obalu, ale nevodivé nitě jsou s kovovými drátky stočeny do jedné nitě. Nákres této nitě je zachycen na *obr. 1.4.c*. Klasické textilní nitě zpražením s vodivým vláknem ztrácí své předchozí vlastnosti jako například ohebnost a flexibilita. Vodivé nitě mohou být vsívány do textilních substrátů ručně nebo na běžně dostupných šicích strojích. Nitě lze také rovnou vkládat do textilních substrátů technologií tkaní nebo pletení. [7]



Obr. 1.4 Ukázka jednotlivých vodivých nití, vodivý materiál je znázorněn červenou barvou a nosný prvek šedou. U obrázku a. slouží nevodivé vlákno jako nosný prvek, okolo kterého je obalena jedna nebo více kovových drátků. U obrázku b. je kovový drátek uprostřed a okolo něho jsou otočeny nevodivé nitě. U obrázku c. jsou nevodivé nitě s kovovými drátky stočeny do jedné nitě. [7]

### 1.3 Technologie chytrých textilií

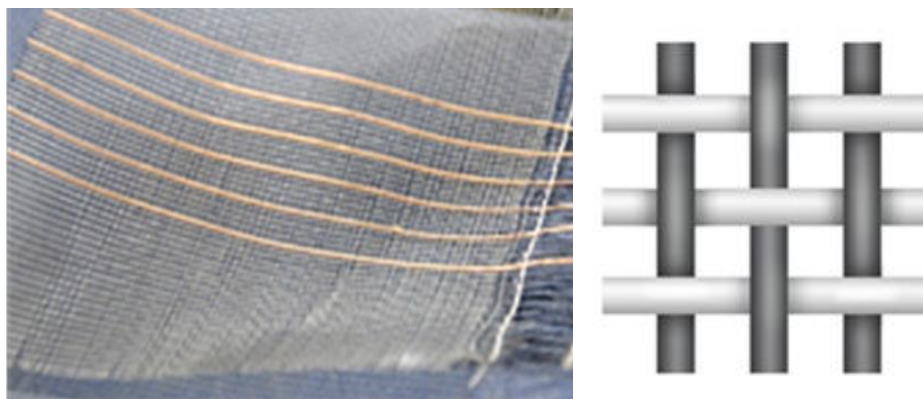
Textilní substrát je základní materiál pro chytrou textilií. Chytré textilie jsou textilní oděvy, které jsou rozšířené o zabudovanou elektroniku, jako jsou propleté či vyšité obvody, senzory a další hardware, který dodává inteligentní funkce. Chytré textilie mohou být připojeny k dalšímu zařízení pomocí Bluetooth nebo Wi-Fi. Výhodou chytrých textilií je kombinace vlastností látek s elektrickými vlastnostmi, které jsou do látek implementovány vodivými nitěmi. [1]

Hlavní úlohou textilního substrátu, tak jako u klasických elektrotechnických substrátů, je nést elektrický signál elektronickým obvodem a elektricky izolovat mezi sebou jednotlivé vodivé cesty. Mezi hlavní výhody textilních substrátů, ve srovnání s klasickými substráty pro elektroniku, patří ohebnost, pružnost, nízká hmotnost nebo prodyšnost. Rozmanitost používaných materiálů pro inteligentní textilie je skoro stejně obsáhlá jako nabídka materiálů v běžném textilním průmyslu. Vybrání vhodné tkaniny pro inteligentní textilie je důležité pro užívání výsledného výrobku z důvodu rozdílných mechanických vlastností, jako je například roztažnost, mechanická odolnost, stabilita parametrů atd. Tkaniny mají rozdílné vlastnosti, proto při výrobě inteligentního obleku musíme nejprve definovat požadované vlastnosti tkaniny a podmínky používání. Požadovaných vlastností docílíme pouze správnou kombinací materiálů a výrobních technologií. Mezi hlavní procesy výroby patří: tkaní, pletení a netkané procesy. Výběr technologie výroby je důležité určit hned v počátku návrhu textilního substrátu, protože z každého procesu výroby vznikne textilie jiných vlastností a výrobních nákladů. [3]

Další možností je vyšít vodivého motivu vodivou nití do textilního substrátu, nanesení vodivé pasty pro textilní substráty, nalepení vodivé tkaniny nebo použití klasických drátků.

### 1.3.1 Tkaní

Technologie tkaní je velmi přesná technologie používaná v textilním průmyslu. Vývojem této technologie došlo k integraci elektronických prvků do struktury tkanin. Lze tedy rovnou při výrobě tkaniny integrovat například elektronické senzory nebo výstupní zařízení. Technologie tkaní je nejstarší způsob výroby látek. Základním principem této technologie je prokládání dvou kolmo umístěných soustav nití (*obr. 1.5*). Tyto sady nití se označují jako osnova a útek. Tkaní je prováděno na tkalcovském stavu. Před zahájením tkaní je nutné nastavit tkalcovský stav pomocí osnovní přize. Technikou tkaní lze vytvořit jak jednovrstvové tak vícevrstvé tkaniny. Kvalitu tkanin ovlivňuje několik faktorů, mezi tyto faktory patří například počet vláken na cm (hustota) nebo schopnost roztahování a smršťování. Oproti technologii pletení jsou tkané tkaniny většinou odolnější a mají stabilnější tvar, díky tomu lze přesněji a hustěji umístit jednotlivé nitě a tím docílit lepší integrace elektrických prvků v tkanině. Další výhodou tkaných textilií je odolnost. Použití technologie tkaní v chytrých textiliích je zachyceno na *obr. 1.5*. [3]



Obr. 1.5 Použití technologie tkaní při implementaci v chytrých textiliích (vlevo), struktura tkané textilie (vpravo). [8]

Tkaniny pro elektrotechnické aplikace jsou vytvářeny tak, aby byly vodivé části implementovány během výroby, příkladem může být tkaní kovových nití nebo kovových drátků. Nevodivá textile je většinou složena z přízí na bázi polymerů, většinou se využívá polyamid a polyester. Na vodivé části se používají tenké stříbrné nebo měděné drátky, využívány jsou jako svazek tenkých drátků nebo jako pokovená polymerní vlákna. [3]



### 1.3.2 Pletení

Výhodou pletených tkanin oproti tkaným je vysoká pružnost a roztažnost. Mezi další vlastnosti pletených tkanin patří prodyšnost, přizpůsobení při mechanickém namáhání, lepší odvod tepla a vlhkosti. Pletené tkaniny lze snadno ohýbat a tak lze snadno přizpůsobit jejich tvar podle potřebného použití. [3]

Technologie pletení spočívá ve výrobě tkaniny z příze nebo nitě. Tkanina se skládá z po sobě jdoucích řad stehů (*obr. 1.6*). Pletená tkanina se vyrábí z mnoha druhů přízí, které mohou být jak přírodní, tak syntetické. Mezi přírodní materiály patří vlna a bavlna. Mezi syntetické materiály patří polyesterová a polyacrylnitrilová vlákna. Pro elektrotechnické využití lze použít i kovová vlákna. Pletené tkaniny se vyrábí na plochých nebo kruhových pletacích strojích. Kruhové pletací stroje mají oproti plochým pletacím strojům vyšší výrobní kapacitu, ale používají se většinou k výrobě tkanin jednoduchých konstrukcí a tvarů. Tyto tkaniny lze dále stříhat a sešívat nebo lepit do požadovaného tvaru. Ploché pletací stroje nabízejí naopak možnost vytvářet libovolné struktury a tvary. Na plochých pletacích strojích lze vyrábět i tkaniny s použitím kovových nití. U plochých pletacích strojů je mnohem menší kapacita výroby z důvodu omezeného počtu nití, které mohou být současně zpracovávány. Díky tomu, že lze vyrábět rovnou požadované tvary výrobku a tím šetřit další náklady na zpracování mohou být ploché stroje konkurenceschopné. Použití technologie pletení v chytrých textiliích je zachyceno na *obr. 1.6*. [3]



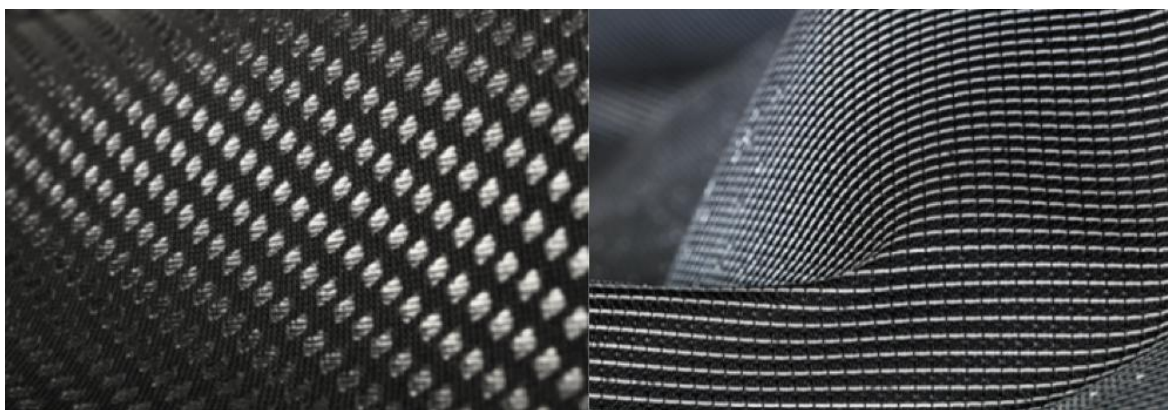
*Obr. 1.6* Použití technologie pletení při implementaci v chytrých textiliích (vlevo), struktura pletené textilie (vpravo). [8]

K technologii pletení patří i další technologie výroby. Mezi tyto metody patří osnovní technologie pletení, technologie pletení útku a technologie fleece. [3]



### 1.3.3 Netkané textilie

Netkané textilie se vyrábí z vláken, ze kterých nebyla vyrobena příze. Vlákna jsou co nejrovnoměrněji rozprostřena na povrchu tak, aby výsledná netkaná tkanina měla na každém místě stejné vlastnosti. Netkané textilie jsou textilie, které nevznikly technologií tkaní ani pletení. Netkaná textilní vlákna mohou být spojována do netkaných textilií mechanicky, termicky nebo chemicky. Mechanicky lze vlákna spojovat jehlou nebo vodními paprsky. Vlastnosti netkaných textilií závisí na použitých vláknech. Vlákna mohou být přírodní nebo syntetická. Syntetická vlákna jsou nejčastěji vyrobena z polypropylenu nebo polyethylentereftalátu. Netkané tkaniny je možné vyrábět naplocho dvojrozměrně nebo i jako větší trojrozměrná tělesa. Do netkaných textilií nelze rovnou implementovat kovová vodivá vlákna během výroby, ale lze je použít jako základní nosný substrát pro další aplikaci vodivých nití a elektronických součástek. Použití netkaných textilií v chytrých textiliích je zachyceno na *obr. 1.7*. [3]

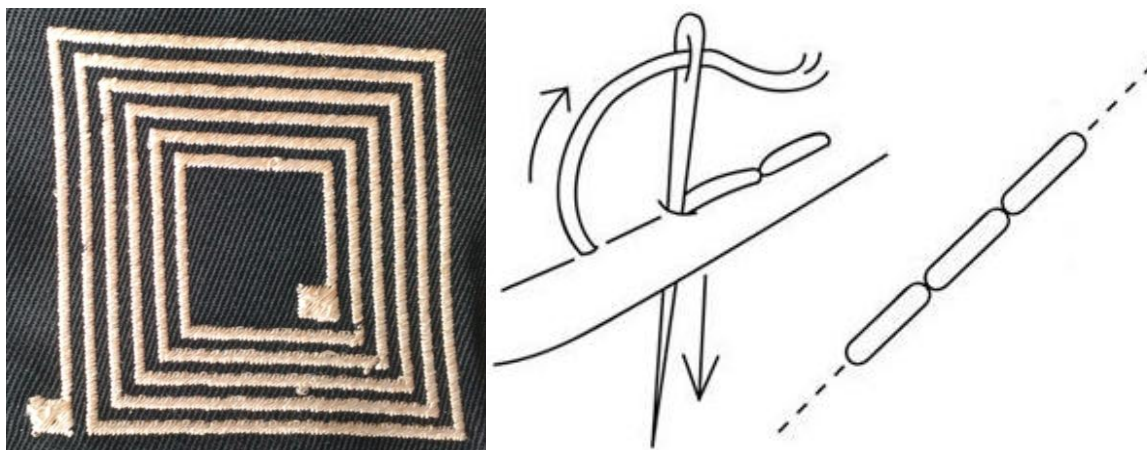


*Obr. 1.7 Použití technologie netkaných textilií při implementaci v chytrých textiliích. [9]*

### 1.3.4 Vyšívání

Nejjednodušším způsobem, jak vytvořit vodivý motiv v chytrých textiliích, je technologie vyšívání (*obr. 1.8*). Dříve byla technologie vyšívání používána především k dekorativním účelům. Vyšívací technologií lze realizovat libovolné velmi přesné motivy, které nejsou omezené vkládáním jako u technologie pletení nebo tkaní. Vyšít motiv lze, jak ručně, tak strojově. K ručnímu vyšítí je potřeba pouze šicí jehla s očkem pro provlíknutí nitě a nit. Strojové vyšívání je realizováno na vyšívacím stroji, v dnešní době jsou v průmyslovém zpracování využívány počítačem řízené vyšívací stroje. Při strojovém vyšívání dochází k většímu namáhání nitě než u ručního vyšívání, proto musí být vodivé vlákno nitě dostatečně pevné a ohebné. Základní substrát pro použití této technologie

v chytrých textiliích může být tkaný, pletený nebo vyrobený z netkané textilie. Použití technologie vyšívání je zachyceno na obr. 1.8. [10]



Obr. 1.8 Cívka realizována vyšívací technologií (vlevo), princip technologie vyšívání (vpravo). [11]

### 1.3.5 Vodivé pasty pro tisk na textilní substráty

Vodivé pasty pro textilní substráty musí splňovat podmínky odolnosti vůči mechanickému namáhání jako je ohebnost a roztažnost. Další důležitou podmínkou je odolnost pasty vůči mytí substrátu. Tyto pasty se většinou skládají z částecek vodivých materiálů, které mají dobrou elektrickou vodivost, většinou se jedná o částecčky stříbra. Vodivé částecčky jsou velikosti mikro až nanometrů. Pro dosažení pružnosti se jako pojivo pro tyto pasty používá pojivo na bázi polyurethanu nebo elastomeru. Vodivou pastu lze nanášet sítotiskem nebo šablonovým tiskem. Pasta je následně vytvrzována přibližně při 100 °C. [12]

Vodivé tištěné vrstvy lze chránit proti degradaci a proti následkům pracích cyklů zapouzdřením. [13]

Jedním z předních výrobců vodivých past pro textilní substráty je společnost DuPont. Pasty jsou použitelné pro všechny typy tkanin. Tyto pasty jsou navrženy tak, aby byly roztažitelné a při opakování roztažení nedocházelo k jejich degradaci. Výrobce garantuje omyvatelnost a odolnost na 100 pracích cyklů. Pasty lze nanášet sítotiskem nebo šablonovým tiskem [14]. V této době je k dostání uhlíková roztažitelná pasta DuPont Intexar PE671, tato pasta se vytvrzuje 15 minut při teplotě 130 °C [15]. Dále lze použít stříbrnou roztažitelnou pastu DuPont PE873, tato pasta se vytvrzuje 2 – 10 minut při teplotě 100 – 160 °C [16]. Poslední vodivou pastou od společnosti DuPont je chloridostříbrná roztažitelná pasta DuPont PE971, tato pasta se vytvrzuje 2 – 10 minut

při teplotě 110 – 140 °C [17]. Tyto vodivé pasty lze následně zapouzdřit roztažitelnou ochrannou pastou DuPont PE773, tato pasta slouží k ochraně proti poškození vodivých cest a vytvrzuje se 2 – 10 minut při teplotě 100 – 160 °C. Výsledné zapouzdření je průsvitné, pružné, odolné proti otěru a zlepšující odolnost vůči pracím cyklům [18].

### 1.3.6 Vodivá folie a tkanina

Vytvoření vodivé cesty lze také realizovat nastříháním a přilepením vodivé folie nebo vodivé tkaniny na textilní substrát (*obr. 1.9*). Obě tyto varianty lze nastříhat do požadovaných tvarů. [19]



Obr. 1.9 Nastříhaná vodivé tkanina vyrobená z měděných nití.

Vodivá tkanina se skládá z textilie, která má na sobě vodivou vrstvu. Vodivá vrstva je realizována nejčastěji mědí nebo jinou slitinou mědi, například slitinou mědi a niklu. Textilie bývá většinou z nylonu. Lze opatřit vodivou textilií ve velkých plátech, nařezanou na pásy, samolepicí nebo rovnou i opatřenou izolační vrstvou. Mezi vlastnosti vodivé tkaniny patří ohebnost, pružnost a mírná roztažnost. [20]

### 1.3.7 Tažení drátků

V počátcích chytrých textilií byly vodivé cesty tvořeny tažením drátků po povrchu textilie, drátky byly k textilii připevněny přišitím. Toto řešení ovšem bylo nepraktické z důvodu malé spolehlivosti při mechanickém namáhání kvůli možnosti přetržení nebo zlomení drátků. Nevýhodou také byla vyšší hmotnost a složitější údržba inteligentního obleku. [7]

### 1.3.8 Senzory

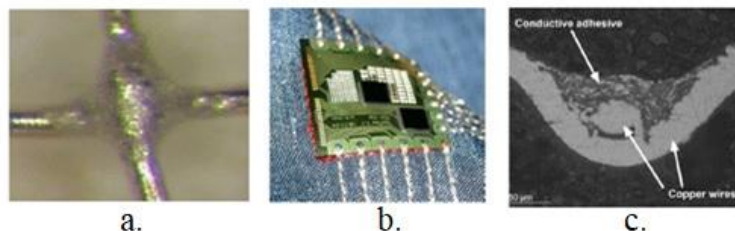
Mezi základní senzory pro textilní použití patří senzory pro měření mechanického napětí, tlaku a ohybu. Pomocí těchto senzorů lze například měřit ohyb kloubů. Po aplikaci senzorů na textilní substrát je nutné do obvodu zakomponovat také desku plošných spojů pro zpracování dat ze senzorů. Nutné je také uvážit energetickou náročnost senzorů a s tím i zvolit správnou kapacitu baterie. [3]

## 1.4 Kontaktování

Důležitou částí textilních substrátů je také kontaktování vodivých částí s nosným textilním substrátem. Kontaktování může být trvalé nebo dočasné. Mezi typy trvalého kontaktování patří šití, pájení, lepení epoxidovou pryskyřicí a ultrazvukové či odporové svařování. Mezi dočasné typy spojení patří připojení přes konektor nebo magnet. Dočasné elektrické spojení lze využít například pro nabíjení baterie. [3]

Špatné propojení na vodivé cestě může způsobit špatný kontakt vodivých ploch a to může způsobit nesprávné fungování elektronických prvků či úplnou ztrátu signálu ve vodivé cestě. Pájení v inteligentních textiliích způsobuje pevný tvrdý bod, u kterého při větším mechanickém namáhání hrozí prasknutí a tím i přerušení vodivé cesty. Toto riziko může být zmenšeno přišitím drátků před místem pájení, čímž se může zamezit vytržení z pájeného místa. Pájet lze dohromady jak drátky, tak i drátky a vodivé nitě k sobě. Technologie pájení na textilií je zachycena obr. 1.10.a. V současné době je nejlepším způsobem kontaktování přišitím vodivou nití ve spojení jednotlivých elektronických komponent rovnou při vytváření vodivých cest pomocí vodivé nitě. Toto propojení poskytuje dostatečnou pružnost v místě spojení, ale při vyšší koncentraci komponent a jednotlivých propojení může zapříčinit zvýšenou tuhost textilního substrátu. Technologie sešití vodivou nití na textilií je zachycena obr. 1.10.b. Dalším způsobem kontaktování může být kontaktování vodivým lepidlem, tato lepidla jsou pružná, netoxická a stálá. Tato metoda je v současné době spíše v experimentální vědecké sféře. Technologie lepení vodivým lepidlem na textilií je zachycena na obr. 1.10.a. [7]

V současné době lze ultrazvukově či odporově svařovat hybridní kovové nitě, tento výzkum probíhal na Západočeské univerzitě v Plzni.



Obr. 1.10 Metody kontaktování. Na obrázku a. je zachycený spájený spoj. Na obrázku b. je zachycen sešitý spoj. Na obrázku c. je zachycen slepený spoj vodivým lepidlem. [7]

## 1.5 Pravidelná údržba chytrých textilií a zkoumání vlivu prostředí na elektrické vlastnosti

Před samotným měřením byla zpracována rešerše vědeckých článků věnující se pravidelné údržbě chytrých textilií a vlivu prostředí na elektrické vlastnosti vyšíváných součástek. Články byly čerpány zejména z knihovny IEEE.

### 1.5.1 Současný stav

Vlivem ohybu vyšíváného senzoru na elektrické vlastnosti se zabývá studie na měření EKG [21]. Při realizaci bylo vytvořeno tílko s vyšívánými senzory pro měření EKG (obr. 1.11). Testování proběhlo na 5 mužích od 20 do 25 let, kteří neměli diagnostikovanou žádnou srdeční vadu. Byl testován vliv ohybu vyšíváného senzoru na elektrické vlastnosti. Testování probíhalo ve třech polohách: stojící osoba a dvě polohy v sedě. Výsledkem měření bylo, že byly zjištěny velké rozdíly v kvalitě signálu EKG, to bylo způsobeno ohyby, které vznikly dýcháním i změnou polohy člověka. Dále byl měřen elektrický odpor textilního senzoru v závislosti na napnutí tkaniny a na ohybu. Byl zjištěn nárůst elektrického odporu při napnutí v rozmezí 0 % – 2 %, dále byl zaznamenán pokles elektrického odporu při zvětšujícím napnutí 2 % – 30 %. Elektrický odpor u ohybu byl měřen na kolenním kloubu. Nárůst elektrického odporu byl zaznamenán u ohybu 0 ° – 10 °, pokles elektrického odporu byl zaznamenán u ohybu 10 ° – 130 °. Dále byla měřena změna elektrického odporu v závislosti na chůzi, i zde byla zaznamenána patrná změna elektrického odporu. [21]



Obr. 1.11 Tričko pro měření EKG s vyšívánými elektrodami. [21]



Vlivu vlhkosti se věnuje studie zabývající se spolehlivostí vyšíváných textilních RFID štítků [22]. Štítky byly vyrobeny z komerčně dostupné bavlny a měděné vodivé tkaniny. Testovány byly 2 druhy (*obr. 1.12*). První bavlněný byl natřen vodivou barvou. Druhý byl vystřižený z měděné vodivé tkaniny. Od každého typu byly vytvořeny vzorky bez ochranné vrstvy a s ochrannou vrstvou, realizovanou ochranným lakem. Vlhkost byla imitována ponořením značky do kohoutkové vody. Měření probíhalo před ponořením do vody, po 1 minutě ve vodě, 10 minutách ve vodě a 1 hodině ve vodě. Počáteční čtecí vzdálenost byla cca 10 metrů u obou typů. Výsledkem bylo, že ochranný lak dokázal zabránit pronikání vody k vodivé části a tudíž ani po 1 hodině ve vodě nebyla zaznamenána žádná změna rozsahu čtení. Celkem byly testovány 4 kusy každého typu. [22]



*Obr. 1.12 RFID štítek potřený vodivou barvou (nahore) a vystřižený štítek z měděné tkaniny (dole) potažený ochranným lakem. [22]*

Vlivu vlhkosti a vlivu pracích cyklů se věnuje předchozí studie rozšířená o spolehlivost vyšíváných štítků [23]. Na vyšíváné štítky byl opět aplikován ochranný lak (*obr. 1.13*). Počáteční čtecí vzdálenost vyšíváných štítků je přibližně 6 metrů. Ověřování spolehlivosti bylo realizováno testem vlhkosti. Vlhkost byla napodobena působením kohoutkové vody po dobu 1 hodiny. Poté byly štítky vyprány v běžné pračce s pracím prostředkem při teplotě 40 °C a vyždímány. Měření bylo prováděno po každém testu vlhkosti a každém pracím cyklu. Celkem bylo provedeno 5 cyklů. Výsledkem bylo, že po 5 pracích cyklech fungovali všechny vyšíváné štítky a štítky vystřižené z měděné tkaniny, ale došlo po každém pracím cyklu ke snížení rozsahu čtení. U natřených štítků dochází vlivem pracích cyklů k prasknutí ochranného laku a tím i k vymytí vodivé barvy, natřené štítky přestaly vykazovat funkčnost již po 2 pracích cyklech. [23]



Obr. 1.13 Vyšívaný RFID štítek. [23]

Další studie se zabývá vlivem vlhkosti a vlivem pracích cyklů na vlastnosti vyšívaných RFID značek [24]. Značky byly vyšity stříbrnou nití (obr. 1.14). Při měření byl testovaný vzorek navlhčen vodou z kohoutku a měřen v krátkých časových intervalech, dokud nebyl úplně suchý. Měřen byl vliv vlhkosti na rozsah čtení. Měření probíhalo 144 minut. Z výsledků je patrné, že při počáteční vlhkosti došlo k poklesu rozsahu čtení přibližně o 1 – 2 metry v závislosti na frekvenci. Počáteční rozsah čtení se pohyboval od 3 do 5 metrů v závislosti na frekvenci. Z výsledků je patrné, že po dokonalém vysušení neměla vlhkost žádný vliv na počáteční stav hodnot. Dalším měřením byl vliv pracích cyklů. Byly testovány 3 prací programy s použitím pracích prostředků. První prací program byl na syntetická vlákna, která byla praná při teplotě 40 °C, 400 otáček za minutu s použitím 10 ml pracího prostředku. Druhý prací program byl na barevné bavlněné oblečení, které bylo práno při teplotě 60 °C, 600 otáček za minutu s použitím 55 ml pracího prostředku. Třetí prací program byl na bílé bavlněné oblečení, které bylo práno při teplotě 95 °C, 1000 otáček za minutu s použitím 75 ml pracího prostředku. Každý prací program pro samostatný vzorek. Po každém pracím cyklu došlo k poklesu rozsahu čtení. Nejvíce vydržel vzorek, který byl testován prvním typem praní. Výdrž tohoto vzorku byla 16 pracích cyklů. Při třetím typu praní vydržel vzorek pouze 4 prací cykly. Postupný pokles rozsahu čtení lze vysvětlit postupnou degradací vodivého vlákna, kdy docházelo ke snižování záření antény. Se zvýšenou teplotou, rychlostí otáček a množstvím saponátu docházelo ke strmější degradaci vzorku. Z výsledků vyplývá, že pro bezproblémovou funkci vyšívané elektroniky je potřeba vlákna opatřit ochrannou vrstvou. [24]



Obr. 1.14 Zkoumaná vyšívaná anténa. [24]

Vlivem pracích cyklů na elektrické vlastnosti se zabývá studie zaměřená na textilní antény [25]. Nositelné antény byly vyrobeny z komerčně dostupných stříbrných a měděných tkanin. Tkaniny byly nastříhány a posléze přilepeny do požadovaného tvaru. Celkem bylo vyrobeno 6 různých modifikací antén. Prvním typem antén byla pouze stříbrná a měděná tkanina, dalším typem antén byla anténa potažená vrstvou lepidla a posledním typem byla anténa opatřena PELC ochranným sprejem proti vlhkosti. Antény byly prány se saponátem při použití běžného pracího cyklu při teplotě 40 °C. Po praní následovalo ždímání. Antény byly prány bez dalšího prádla. Testování probíhalo po každém praní. Celkem bylo provedeno maximálně 10 pracích cyklů nebo méně, pokud rozsah čtení antény klesl pod 1 metr, což byl nejnižší přípustný rozsah. Původní rozsah čtení před 1. pracím cyklem byl přibližně 6 metrů u stříbrných a 11 metrů u měděných antén. Nejvyšší schopnost výdrže byla u antén potažených vrstvou lepidla, tam došlo k poklesu rozsahu čtení přibližně o 2 metry u stříbrných a o 6 metrů u měděných antén. Po ukončení pracích cyklů byl ještě změřen přechodový odpor tkanin, kdy byl zaznamenán zvýšený elektrický odpor u antén, kde došlo ke snížení čtecí vzdálenosti. [25]

Poslední studie se zabývá měřením výkonu textilních vyšíváných antén na tričku nejprve po 7 pracích cyklech a následně po 9 pracích a sušících cyklech [26]. Vyšíváné antény byly vyšity postříbřenou nití (*obr. 1.15*). Před praním byly antény na tričku zapouzdřeny ochrannou vrstvou DuPont PE772. Praní a sušení bylo prováděno ve spotřebičích určených pro domácnosti. Tričko bylo přes den nošeno a vždy večer vypráno. Praní probíhalo při teplotě 40 °C, jeden prací cyklus trval 22 minut. Prací cykly byly prováděny bez saponátu. Při prvních 7 pracích cyklech bylo tričko vysušováno při pokojové teplotě, následovalo 9 pracích a sušících cyklů, kdy sušící cyklus trval 1 hodinu a 30 minut. Měření probíhalo po každém cyklu v běžné místnosti a v bezúrazové komoře. Testování probíhalo na tričku, do kterého byla oblečena žena, která stála 1 metr od čtecí RFID antény. Výsledkem měření bylo, že prací cykly neměli výrazný vliv na elektrické vlastnosti antén, ale došlo po celkem 16 pracích a 9 sušících cyklech ke snížení rozsahu čtení o 0,5 – 1 metr. Počáteční čtecí vzdálenost byla 3,5 metru. [26]



Obr. 1.15 Vyšíváná anténa. [26]



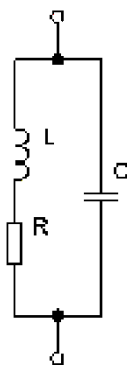
### **1.5.2 Zhodnocení současného stavu**

Zpracováním rešerše bylo zjištěno, že dle publikovaných výsledků nebyla doposud řešena problematika vlivu údržby textilií a parametrů prostředí na elektrické vlastnosti vyšíváných pasivních součástek. Většina článků zpracovaných v rešerši se věnuje vlivu údržby na výkon textilních vyšíváných antén, kam patří měření úbytku výkonu antén při pracích cyklech. Cílem mé diplomové práce bylo tudíž provést a zhodnotit vliv údržby na vyšívané planární pasivní součástky.

## 2 Planární pasivní součástky

Mezi běžné pasivní součástky řadíme rezistor, cívku a kondenzátor. [27]

Na cívce se v ideálním případě objevuje pouze indukčnost a u kondenzátoru kapacita. U reálných součástek však platí, že se u cívky objevují parazitní kapacita a u kondenzátoru parazitní indukčnost. Náhradní schéma cívky je uvedeno na obr. 2.1 a náhradní schéma kondenzátoru je uvedeno na obr. 2.2. [28]

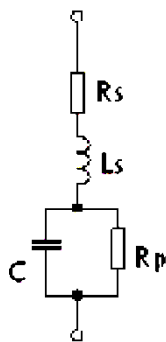


Obr. 2.1 Náhradní schéma cívky. [28]

kde  $L$  [H] – vlastní indukčnost cívky

$C$  [F] – parazitní kapacita cívky

$R$  [ $\Omega$ ] – ztráty v cívce, zahrnuje ztráty ve vodičích, ztráty magnetického obvodu, ztráty výřivými proudy [28]



Obr. 2.2 Náhradní schéma kondenzátoru. [28]

kde  $C$  [F] – kapacita kondenzátoru

$R_p$  [ $\Omega$ ] – parazitní paralelní odpor, určen materiálem dielektrika

$R_s$  [ $\Omega$ ] – parazitní sériový odpor přívodů

$L_s$  [H] – parazitní sériová indukčnost přívodů [28]

Vyšívané planární pasivní součástky jsou v době psaní diplomové práce poměrně neznámou problematikou, která není zatím příliš publikovaná. Při návrhu vyšívanych

pasivních součástek jsem se inspiroval diplomovou prací ze Západočeské univerzity, která se tímto problémem zabývala [29]. Při návrhu vyšíváných pasivních součástek a výpočtu parametrů se vycházelo z obecných pravidel pro planární součástky. Výpočty jsou platné pro ploché a rovné pasivní součástky realizované na desce plošných spojů [30]. Vyšíváné pasivní součástky, které byly navrženy pro výzkum v této diplomové práci, mají podobné teoretické předpoklady a z tohoto důvodu byly pro výpočet použity tyto vztahy. Tyto teoretické předpoklady například již byly dříve ověřeny, bylo například zjištěno, že indukčnost vyšíváné cívky je přibližně stejně velká jako indukčnost měděné cívky vyleptané na desce plošného spoje [29].

Cílem praktické části diplomové práce bylo navrhnout různé struktury cívek a kondenzátorů realizované vyšíváním a proměřit vliv údržby textilií a parametrů prostředí na elektrické vlastnosti těchto vyšíváných pasivních součástek, tak aby byly co nejdříve napodobeny reálné provozní podmínky používání v chytrých textiliích. Strukturami cívek byla meandrová cívka a čtvercová spirála. U kondenzátoru to byla interdigitální struktura. Od každého návrhu bylo zpracováno několik různých typů a velikostí provedení včetně provedení cívek a kondenzátoru pouze vodivou jednou nití. Celkem bylo navrženo a vyrobeno 5 cívek a 3 kondenzátory.

## 2.1 Cívky

V této kapitole je uveden obecný popis, vztah pro výpočet indukčnosti a základní nákres pro dva typy cívek – meandrová cívku a čtvercová spirálu.

### 2.1.1 Meandrová cívka

Obecný nákres meandrové cívky je zobrazen na *obr. 2.3*. Velikost indukčnosti meandrové cívky závisí na konstantě  $K_n$  (tab. 2.1), která je závislá na hodnotě počtu úseků vodivé cesty  $n$ . Indukčnost meandrové cívky je dána vztahem: [30]

$$L = 0,1 * d * \left[ 4 * n * \ln \frac{2*(a+w)}{w} - Kn \right] [nH, mm] \quad (2.1)$$

kde  $n$  [-] – počet úseků vodivé cesty

$a$  [mm] – šířka mezi vodivými cestami

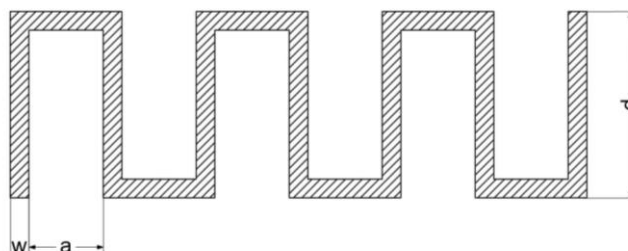
$w$  [mm] – šířka vodivé cesty

$d$  [mm] – délka úseku vodivé vodivé cesty

$K_n$  [-] – konstanta

Tab. 2.1 Hodnoty konstanty  $K_n$  ze vztahu (2.1), tato konstanta je závislá na počtu úseků vodivé cesty  $n$

$n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K_n$	2,76	3,92	6,22	7,60	9,7	10,92	13,38	14,92	16,86



2.3 Obecný náčrt meandrové cívky. [30]

### 2.1.2 Čtvercová spirála

Obecný náčrt cívky čtvercové spirály je zobrazen na obr. 2.4. Indukčnost čtvercové spirály je dána vztahem: [30]

$$L = 6 * \frac{(D+d)^2 * n^2}{15D-7d} [nH, mm] \quad (2.2)$$

kde  $D = d + 2n(w + s) + w - s$

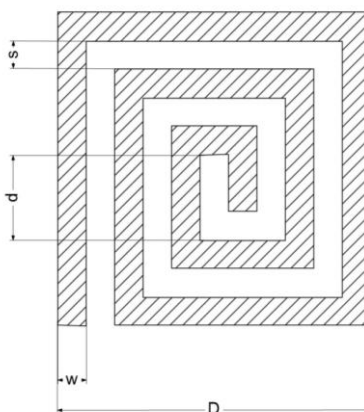
$n$  [-] – počet závitů cívky

$s$  [mm] – šířka mezi vodivými cestami

$w$  [mm] – šířka vodivé cesty

$d$  [mm] – šířka mezi vnitřními vodivými cestami

$D$  [mm] – délka hrany čtvercové cívky



Obr. 2.4 Obecný náčrt cívky čtvercové spirály. [30]

## 2.2 Kondenzátor

V této kapitole je uveden obecný popis, vztah pro výpočet kapacity a obecný náčrtek pro integrální kondenzátor.

### 2.2.1 Interdigitální kondenzátor

Obecný náčrtek interdigitálního kondenzátoru je zobrazen na *obr. 2.5*. Kapacita interdigitálního kondenzátoru je dána vztahem: [31]

$$C_s = \frac{\pi * \epsilon_0 * \epsilon_r + 1}{\ln\left(\frac{\pi * s}{w_p + t} + 1\right)} * l * \frac{n}{2} [F, m] \quad (2.3)$$

kde  $\epsilon_0 [Fm^{-1}]$  – permitivita vakua, jejíž hodnota je  $8,854 * 10^{-12} Fm^{-1}$

$\epsilon_r [Fm^{-1}]$  – relativní permitivita textilního substrátu

$n [-]$  – počet prstů kondenzátoru

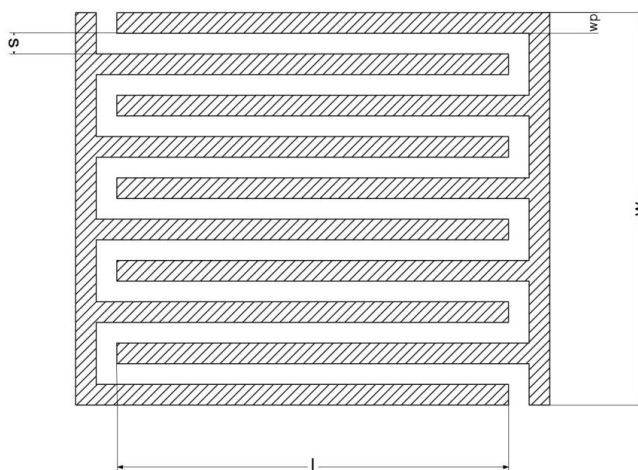
$t [m]$  – tloušťka vodivé vrstvy

$s [m]$  – šířka mezi vodivými cestami

$w_p [m]$  – šířka prstu

$l [m]$  – délka sousedících prstů

$w [m]$  – výška celého kondenzátoru



2.5 Obecný náčrtek interdigitálního desetiprstového kondenzátoru. [30]

## 2.3 Návrh vzorků

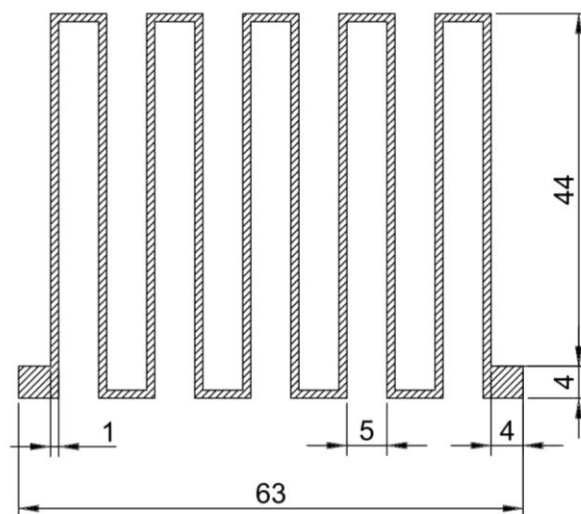
V této kapitole jsou uvedené návrhy všech 8 testovaných typů vzorků. Bylo navrženo 5 typů cívek a 3 kondenzátory. Rozdělení vzorků je uvedeno v tab. 2.2.

Tab. 2.2 Tabulka se specifikací jednotlivých vzorků

	Cívka - meandr	Cívka – čtvercová spirála	Kondenzátor
Označení vzorku	A, B	C, D, H	E, F, G

### 2.3.1 Cívky typu meandr

První cívkou typu meandr byl vzorek A. Tento vzorek byl navržen jako cívka typu meandr s 10 úseky vodivé cesty. Šířka vyšité vodivé cesty je 1 mm. Informace o vyšítí jsou uvedené v tab. 2.3. Návrh cívky vzorku A včetně rozměrů je na obr. 2.6. Vyrobený vzorek je zachycen na obr. 2.16.

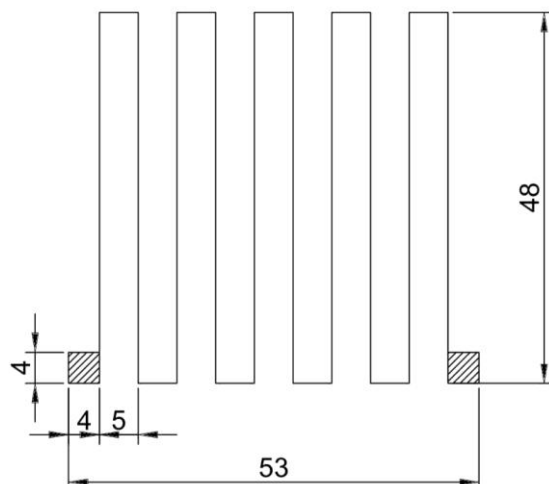


Obr. 2.6 Návrh meandrové cívky – vzorek A. Uvedené rozměry jsou v milimetrech.

Tab. 2.3 Informace o vyšítí vzorku A

Datum:	3.1.2019	Počet ks:	4 meandry	Rychlost šití cca	170 stehů/min
látka			F14-černý kepr		100% bavlna
jehla			Organ – Ti / 90		
nitě			vrchní – 25A		spodní – bobbin černá
napětí nitě			2,00		
výztuha			ano		Alphasew 8''/75 stický stabilizer
Počet stehů:	2527	Čas vyšítí:	16 minut	Spotřeba nitě:	11,26 m

Druhou meandrovou cívkou byl vzorek B, tato cívka byla podobná cívce A, jen s tím rozdílem, že vodivá cesta nebyla prošívána více stehy, ale vodivou cestu tvořil pouze jeden vodič vyrobený jednou nití. Cívka byla opět s 10 úseky vodivé cesty. Šířka vodivé cesty je 240  $\mu\text{m}$ . Informace o vyšítí jsou uvedené v tab. 2.4. Návrh cívky vzorku B včetně rozměrů je na obr. 2.7. Vyrobený vzorek je zachycen na obr. 2.16.



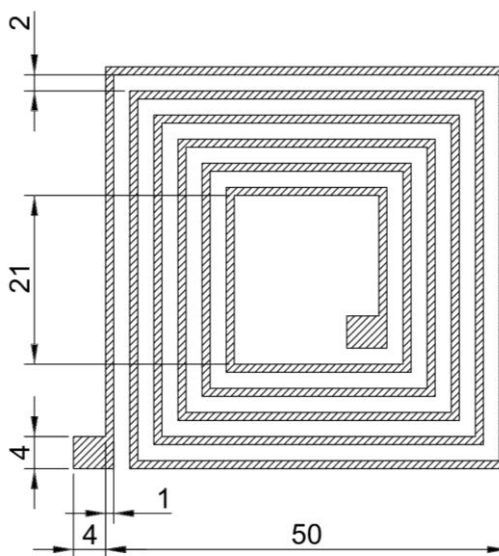
Obr. 2.7 Návrh meandrové cívky – vzorek B. Uvedené rozměry jsou v milimetrech. Šířka vodivé cesty je 240  $\mu\text{m}$ .

Tab. 2.4 Informace o vyšití vzorku B.

Datum:	3.1.2019	Počet ks:	3	Rychlost šití cca	170 stehů/min
látka	F14-černý kepr				100% bavlna
jehla	Organ – Ti / 90				
nitě	vrchní – 25A				spodní – bobbin černá
napětí nitě	2,00				
výztuha	ne				bez výztuhy
Počet stehů:	442	Čas vyšití:	5 minut		Spotřeba nitě: 2,10 m

### 2.3.2 Cívky typu čtvercová spirála

Další cívkou byl vzorek C, tento vzorek byl typu čtvercové spirálové cívky. Na tomto vzorku byla zvolena šířka vodivé cesty 1 mm. Tato cívka měla 5 závitů. Informace o vyšití jsou uvedené v tab. 2.5. Návrh cívky vzorku C včetně rozměrů je na obr. 2.8. Vyrobený vzorek je zachycen na obr. 2.16.

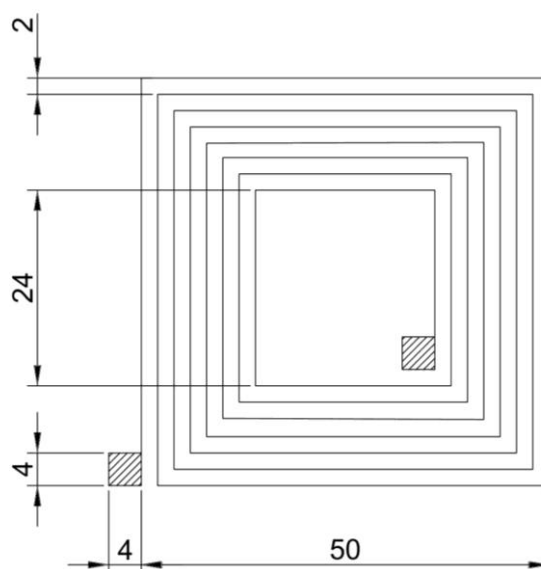


Obr. 2.8 Návrh cívky – vzorek C. Uvedené rozměry jsou v milimetrech.

Tab. 2.5 Informace o vyšití vzorku C.

Datum:	2.1.2019	Počet ks:	4	Rychlost šití cca	170 stehů/min
látka		F14-černý kepr		100% bavlna	
jehla		Organ – Ti / 90			
nitě		vrchní – 25A		spodní – bobbin černá	
napětí nitě		2,00			
výztuha		ano		Alphasew 8''/75 sticky stabilizer	

Čtvrtým vzorkem byl vzorek D. Vzorkem D byla cívka o 7 závitů spirálového tvaru, která byla podobná vzorku C, jen s tím rozdílem, že vodivá cesta nebyla vyšitá, ale byla tvořena pouze jednou vodivou nití. Šířka vodivé cesty je 240  $\mu\text{m}$ . Informace o vyšití jsou uvedené v tab. 2.6. Návrh cívky vzorku D včetně rozměrů je na obr. 2.9. Vyrobený vzorek je zachycen na obr. 2.16.

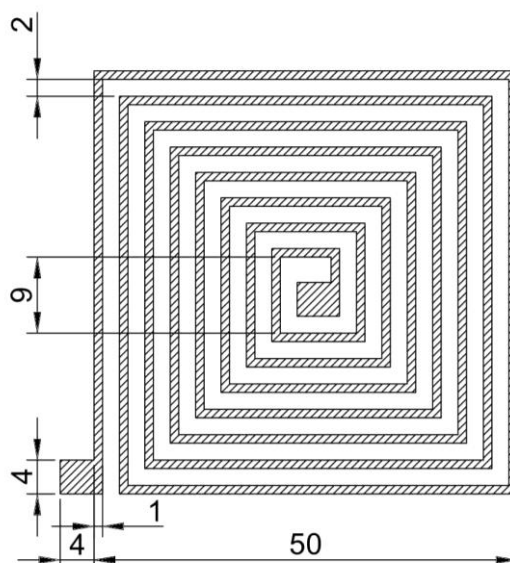
Obr. 2.9 Návrh cívky – vzorek D. Uvedené rozměry jsou v milimetrech. Šířka vodivé cesty je 240  $\mu\text{m}$ .

Tab. 2.6 Informace o vyšití vzorku D.

Datum:	2.1.2019	Počet ks:	3	Rychlost šití cca	170 stehů/min
látka		F14-černý kepr		100% bavlna	
jehla		Organ – Ti / 90			
nitě		vrchní – 25A		spodní – bobbin černá	
napětí nitě		2,00			
výztuha		ano		bez výztuhy	
Počet stehů:	706	Čas vyšití:		Spotřeba nitě:	3,36 m

Poslední spirálovou cívku byl vzorek H. Tato cívka byla podobná vzorku C, jen s tím rozdílem, že cívka H měla 7 závitů. Šířka vodivé cesty byla 1 mm. Návrh cívky vzorku H včetně rozměrů je na obr. 2.10. Vyrobený vzorek je zachycen na obr. 2.16.

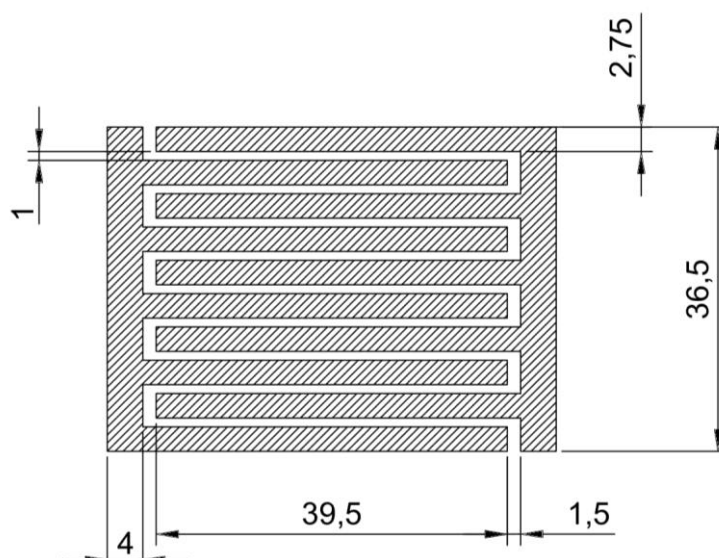




Obr. 2.10 Návrh cívky – vzorek H. Uvedené rozměry jsou v milimetrech.

### 2.3.3 Interdigitální kondenzátory

Prvním kondenzátorem byl vzorek E. Kondenzátor byl navržen jako interdigitální desetiprstový kondenzátor. Informace o vyšítí jsou uvedené v tab. 2.7. Návrh kondenzátoru vzorku E včetně rozměrů je na obr. 2.11. Vyrobený vzorek je zachycen na obr. 2.16.

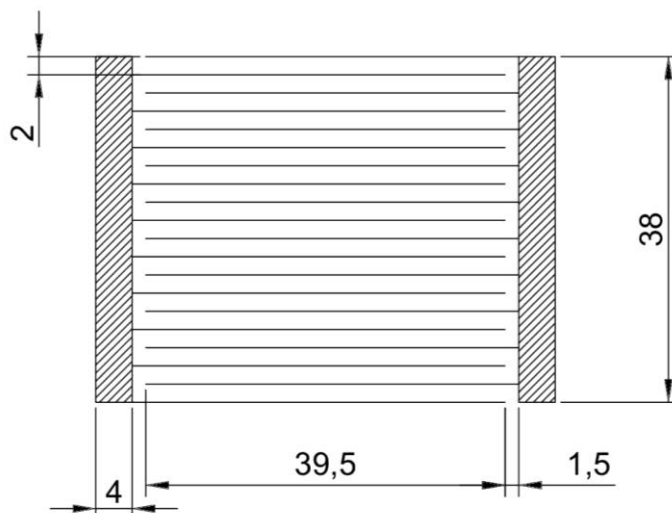


Obr. 2.11 Návrh kondenzátoru – vzorek E. Uvedené rozměry jsou v milimetrech.

Tab. 2.7 Informace o vyšítí vzorku E.

Datum:	4.1.2019	Počet ks:	3	Rychlost šití cca	170 stehů/min
látka		F14-černý kepr		100% bavlna	
jehla		Organ – Ti / 90			
nitě		vrchní – 25A		spodní – bobbin černá	
napětí nitě		2,00			
výztuha		ne			
Počet stehů:	5001	Čas vyšítí:	32 minut	Spotřeba nitě:	22,96 m

Druhý kondenzátor byl vzorek F. Tento kondenzátor byl podobný kondenzátoru ze vzorku E, jen s tím rozdílem, že prsty kondenzátoru nebyly vyšité, ale byly tvořeny pouze jedním vodičem. Šířka prstu kondenzátoru je 240  $\mu\text{m}$ . Tento kondenzátor měl opět 10 prstů. Informace o vyšití jsou uvedené v tab. 2.8. Návrh kondenzátoru vzorku F včetně rozměrů je na obr. 2.12. Vyrobený vzorek je zachycen na obr. 2.16.

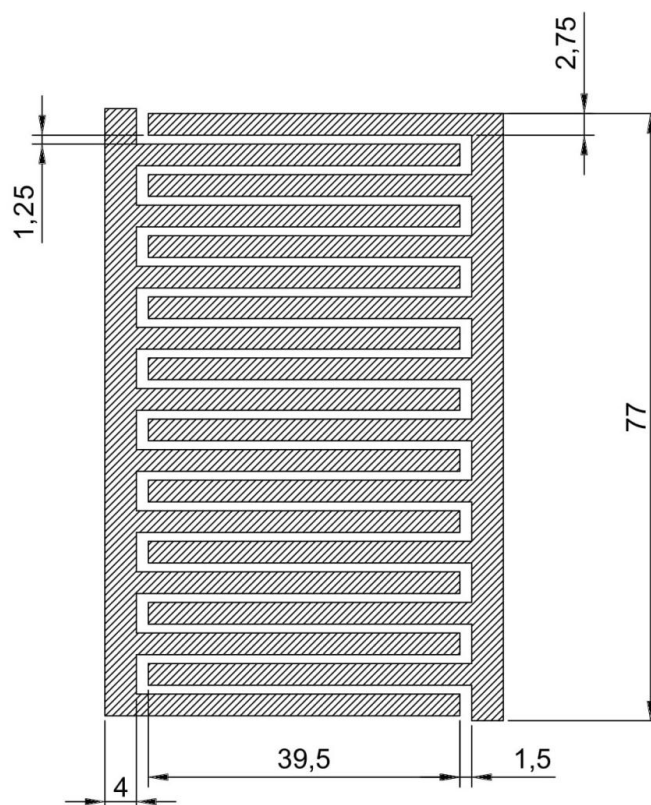


Obr. 2.12 Návrh kondenzátoru – vzorek F. Uvedené rozměry jsou v milimetrech. Šířka prstu kondenzátoru je 240  $\mu\text{m}$ .

Tab. 2.8 Informace o vyšití vzorku F.

Datum: 4.1.2019	Počet ks: 3	Rychlost šití cca 170 stehů/min
látka	F14-černý kepr	100% bavlna
jehla	Organ – Ti / 90	
nitě	vrchní – 25A	spodní – bobbin černá
napětí nitě	2,00	
výztuha	ano	Alphasew 8''/75 sticky stabilizer
Počet stehů: 1060	Čas vyšití: 19 minut	Spotřeba nitě: 6,25 m

Poslední kondenzátor byl vzorek G. Tento kondenzátor byl podobný kondenzátoru ze vzorku E, jen s tím rozdílem, že měl dvojnásobný počet prstů, jednalo se tedy o interdigitální dvacetiprstový kondenzátor. Návrh kondenzátoru vzorku G včetně rozměrů je na obr. 2.13. Vyrobený vzorek je zachycen na obr. 2.16.



Obr. 2.13 Návrh kondenzátoru – vzorek G. Uvedené rozměry jsou v milimetrech.

## 2.4 Výroba vzorků

Měřené vzorky byly vyšity na Západočeské univerzitě v Plzni. K vyšítí byl použit počítačem řízený vyšívací stroj značky Bernina 750 QE. Pracoviště s vyšívacím strojem je zachyceno na obr. 2.14.



Obr 2.14 Pracoviště s vyšívacím strojem Bertina 750 QE.

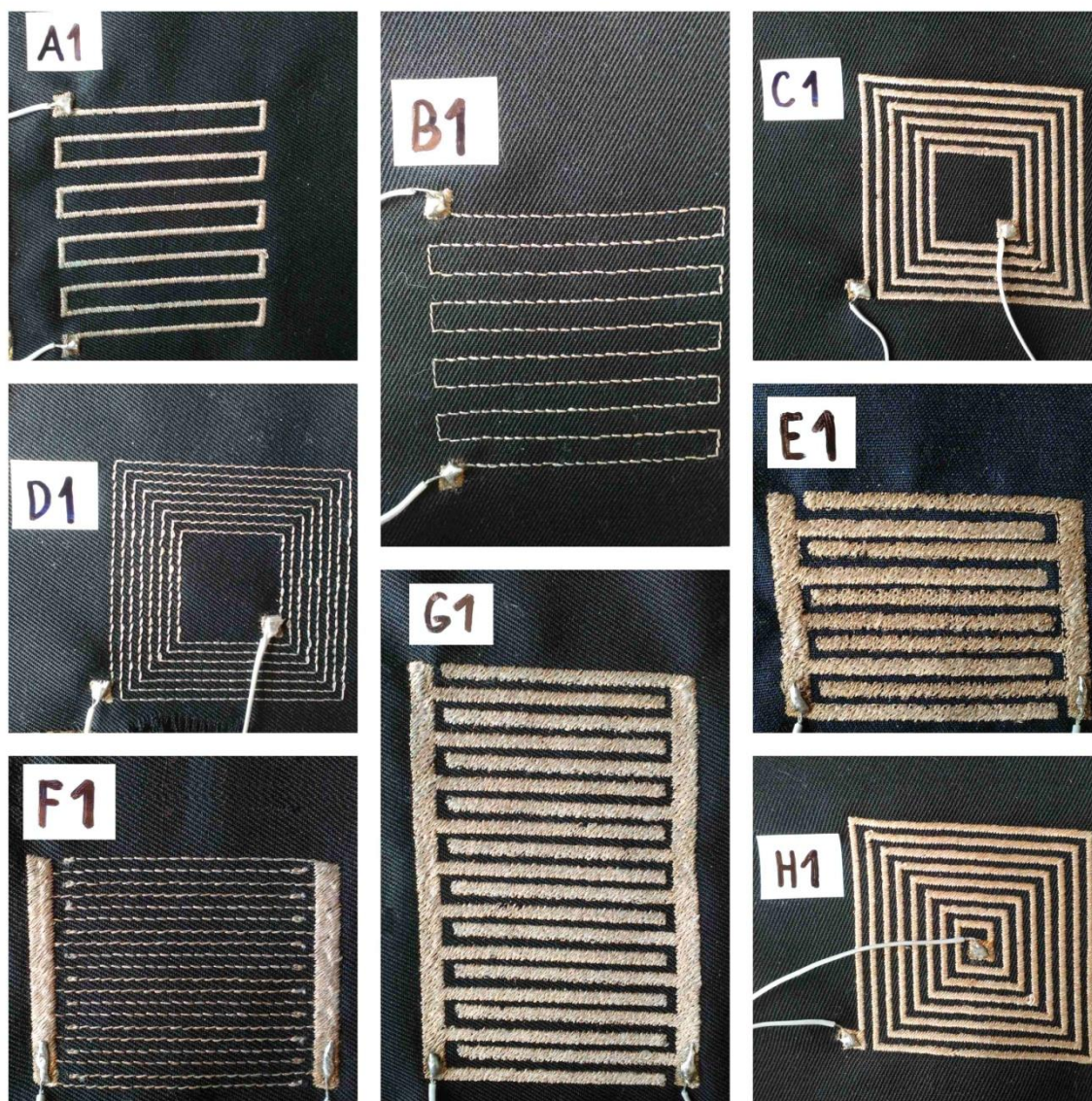
K vyšítí byla zvolena mosazná nit s označením 25A (obr. 2.15), Tato nit se skládá z polyesterového vlákna, které tvoří jádro. Jádro je spředen s 8 vodivými mosaznými drátky o průměru každého drátku 30  $\mu\text{m}$ . Vodivá nit byla vyšita na základní nosný materiál černý kepr. U vzorků A, C, F a G byla použita výztuž pod nosný materiál.



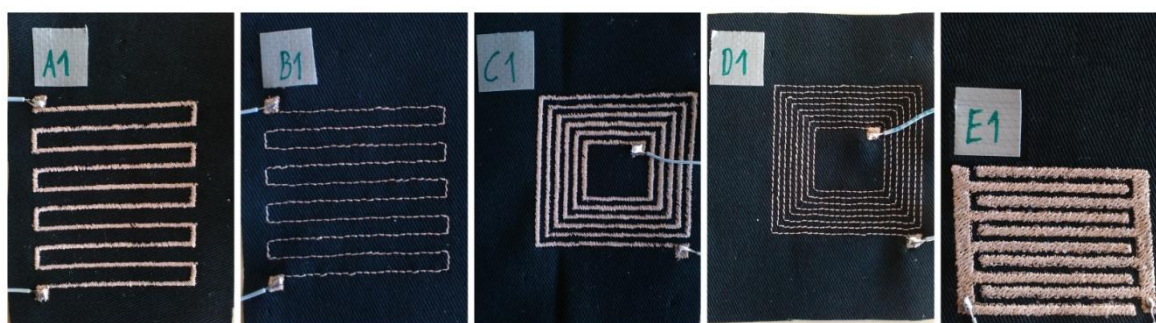
Obr. 2.15 Špulka s vodivou mosaznou nití použitou při výrobě vyšíváných pasivních elektrických součástek.

K návrhu byl použit Software BERNINA Software DesignerPlus. Celkem bylo vyrobeno 8 typů vzorků, od každého typu 2 kusy. Vyšité vzorky jsou zachycené na obr. 2.16. Tyto vzorky byly použity pro test při ohybu a při navlhčení potem. Po tomto testu a zhodnocení výsledků bylo vybráno 5 typů vzorků z předchozích návrhů, konkrétně 4 cívky a 1 kondenzátor, a znovu vyrobeny pro testování vlivu údržby realizovaného 20 pracími cykly. Vzorky byly vyrobeny znovu z důvodu, aby nedošlo k ovlivnění výsledků po měření navlhčení vzorků umělým potem. Byly vyrobeny 3 exempláře od každého typu vzorku. Tyto vzorky jsou zachycené na obr. 2.17.





Obr. 2.16 Všechny typy testovaných vyšívaných pasivních součástek. Od každého vzorku byly vyrobeny 2 kusy.



Obr. 2.17 Znovu vyrobené vzorky, které byly použity při pracích cyklech, od každého typu vzorku byly vyrobeny 3 kusy.



### 3 Měření

Cílem diplomové práce bylo navrhnout vyšíváné pasivní součástky a proměřit vliv údržby textilií a parametrů prostředí na elektrické vlastnosti těchto vyšíváných pasivních součástek tak, aby byly co nejvěrohodněji napodobeny reálné provozní podmínky používání v chytrých textiliích. Navrženými pasivními součástkami byly planární cívky a kondenzátory. Měřeny byly základní parametry vyšíváných planárních součástek jako je elektrický odpor  $R$ , sériová indukčnost  $L_s$  u cívek, paralelní kapacita  $C_p$  u kondenzátorů a rezonanční charakteristiky. Testovacími podmínkami bylo ověření elektrických vlastností součástek při ohybu a při zvlhčení umělým potem s  $pH = 8,0$  [-]. Pro test údržby vyšíváných pasivních součástek bylo navrženo 20 pracích cyklů.

#### 3.1 Měření základních parametrů planárních vyšíváných součástek

Cílem tohoto měření bylo změřit základní elektrické parametry planárních vyšíváných součástek a porovnat je s teoretickými hodnotami. Měřena byla sériová indukčnost  $L_s$  u cívek a paralelní kapacita  $C_p$  u kondenzátorů. Sériová indukčnost  $L_s$  u cívek a paralelní kapacita  $C_p$  u kondenzátoru byly změřeny na RLC můstku MOTECH MT 4090 při přivedení frekvence  $f = 1$  kHz a napětí  $U = 1$  V. Měřicí přístroj je zachycen na *obr. 3.1*. Hodnoty z měřicího přístroje byly odečítány ručně. Měření vzorků probíhalo v laboratorních podmínkách při konstantní pokojové teplotě a středoevropském tlaku.



Obr. 3.1 RLC můstek MOTECH MT 4090 s připojeným vzorkem typu E při měření paralelní kapacity.

### 3.1.1 Naměřené a vypočítané hodnoty $L_s$ , $C_p$

Naměřené a vypočítané hodnoty indukčnosti všech cívek jsou uvedeny v tab. 3.1. Teoretické hodnoty meandrových cívek byly počítány podle vzorce (2.1) a parametrů uvedených v kapitole 2.1.1. Teoretické hodnoty čtvercových spirál byly počítány podle vzorce (2.2) a parametrů uvedených v kapitole 2.1.2. Do vzorců byly dosazeny hodnoty náležící k daným vzorkům, které jsou vyobrazeny na obr. 2.3 – 2.7. Naměřené hodnoty byly změřeny před namáháním vzorků.

Tab. 3.1 Naměřené a vypočítané hodnoty sériové indukčnosti u cívek podle vzorce (2.1) u meandrových cívek, resp. (2.2) u čtvercových spirál

Vzorek	Teoretická $L_s$ [ $\mu H$ ]	Naměřená $L_s$ [ $\mu H$ ]
A1_I		0,63
A2_I		0,79
A1_II		0,65
A2_II		0,56
A3_II		0,55
<b>A průměr</b>	<b>0,396</b>	<b>0,636</b>
B1_I		0,46
B2_I		0,47
B1_II		0,62
B2_III		0,59
B3_III		0,61
<b>B průměr</b>	<b>0,370</b>	<b>0,55</b>
C1_I		4,04
C2_I		4,59
C1_II		4,20
C2_II		3,97
C3_II		3,74
<b>C průměr</b>	<b>1,254</b>	<b>4,108</b>
D1_I		3,16
D2_I		3,09
D1_II		3,49
D2_II		3,46
D3_II		3,71
<b>D průměr</b>	<b>2,766</b>	<b>3,382</b>
H1_I		3,92
H2_I		3,89
<b>H průměr</b>	<b>1,490</b>	<b>3,905</b>

Naměřené a vypočítané hodnoty kapacity všech kondenzátorů jsou uvedeny v tab. 3.2. Teoretické hodnoty interdigitálních kondenzátorů byly vypočítány podle vzorce (2.3) a parametrů uvedených v kapitole 2.2.1. Do vzorce byly dosazeny hodnoty náležící k daným vzorkům, které jsou vyobrazeny na obr. 2.8 – 2.10. Tloušťka vyšité vodivé vrstvy byla naměřena o velikosti  $t = 0,55$  mm. Relativní permitivita textilního substrátu byla  $\epsilon_r = 4$  [-]. Naměřené hodnoty byly změřeny před namáháním vzorků.

Tab. 3.2 Naměřené a vypočítané hodnoty paralelní kapacity  $C_p$  u kondenzátorů podle vzorce (2.3)

Vzorek	Teoretická $C_p$ [pF]	Naměřená $C_p$ [pF]
E1_I		47,69
E2_I		48,14
E1_II		13,09
E2_II		12,09
E3_II		12,18
<b>E průměr</b>	20,506	26,638
F1_I		7,68
F2_I		7,57
<b>F průměr</b>	6,244	7,625
G1_I		25,07
G2_I		27,19
<b>G průměr</b>	37,695	26,13

### 3.1.2 Zhodnocení měření základních parametrů

Po porovnání naměřených hodnot s teoretickými hodnotami lze určit, že naměřená hodnota indukčnosti byla u všech cívek vyšší než hodnota teoretická. Rozdíl hodnot byl i více než dvojnásobný. Vyšší hodnota indukčnosti mohla být způsobena délkou nitě, zákrutami nebo nepřesným vyšitím vyšíváných součástek.

U kondenzátorů po porovnání naměřených hodnot s teoretickými hodnotami lze určit, že naměřená hodnota kapacity ve zprůměrovaných hodnotách nebyla oproti teoretické tak rozdílná jako hodnota indukčnosti u cívek. Rozdíl hodnot byl v jednotkách pF. Výjimkou byl dvacetiprstový interdigitální kondenzátor vzorek G, u kterého byl rozdíl hodnot v průměru přibližně 1,5 násobný. Značný rozdíl v naměřených hodnotách lze spatřit také u jednotlivých vzorků typu E, kdy byla velikost kapacity naměřena v rozmezí od cca 12 – 48 pF. Tento rozdíl mohl být způsoben nepřesným vyšitím vyšíváných součástek. Výslednou kapacitu velmi ovlivňuje velikost vzduchové mezery mezi jednotlivými prsty, proto je důležité dodržet přesnost rozměrů při vyšití. Přesnost vyšití je limitována přesností vyšívacího stroje.

## 3.2 Měření vlivu ohybu a potu na rezonanční charakteristiky pasivních součástek

Cílem měření bylo ověřit chování vyšíváných pasivních součástek v závislosti na ohybu a vlhkosti. Vlhkost byla reprezentována umělým potem. Celkem bylo měřeno 8 typů pasivních vyšíváných součástek. Typy jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tab. 2.1 a jsou zachyceny na obr. 2.16. Měření vzorků probíhalo v laboratorních podmínkách



při konstantní pokojové teplotě a středoevropském tlaku. Měřicí stanoviště je zachyceno na obr. 3.2.



Obr. 3.2 Měřicí stanoviště.

### 3.2.1 Postup měření vzorků

Před samotným měřením byly vzorky proměřeny Ohmmetrem, kdy se zjišťovalo, zda jsou vzorky schopny vést elektrický signál. K těmto vzorkům byly připájeny drátové vývody tak, aby vzorky mohly být připojeny k měřicímu přístroji. Od každého typu byly měřeny 2 vzorky.

Měření rezonančních charakteristik bylo provedeno na RLC můstku AGILENT 4287 A s měřicí stolicí 16092A. Rezonanční charakteristika je dána závislostí impedance na frekvenci. Měřicí přístroj je zachycen na obr. 3.3. Všechny měřené parametry při tomto měření jsou uvedeny v tab. 3.3.

Tab. 3.3 Měřené parametry

<b>Pro cívky i kondenzátory</b>
Z - impedance
$\phi$ - fázový posuv
Q - činitel jakosti

Před samotným měřením bylo nutné provést kalibraci měřicího přístroje. Poté byla nastavena měřicí frekvence v rozsahu  $f = 1 - 300$  MHz v závislosti na měřeném vzorku. Při tomto měření bylo získáno velké množství dat, tato data byla následně pomocí Microsoft Office Excel vyhodnocena do grafů.

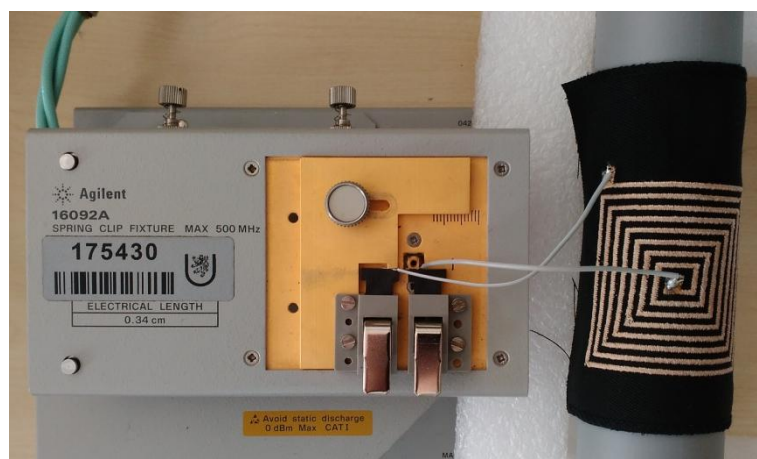


Obr. 3.3 RLC můstek AGILENT 4287.

Všechny vzorky byly změřeny při různém namáhání:

- Rovná podložka
- Ohyb Ø 40 mm
- Ohyb Ø 75 mm
- Ohyb Ø 110 mm
- Rovná podložka + umělý pot s  $pH = 8,0$  [-]

Měření vzorku na ohybu je zachyceno na obr. 3.4. Umělý pot byl aplikován rozprašovačem. Pot se po aplikaci nechal 5 minut působit, aby se vyšíváná struktura dokonale nasákla (obr. 3.5).



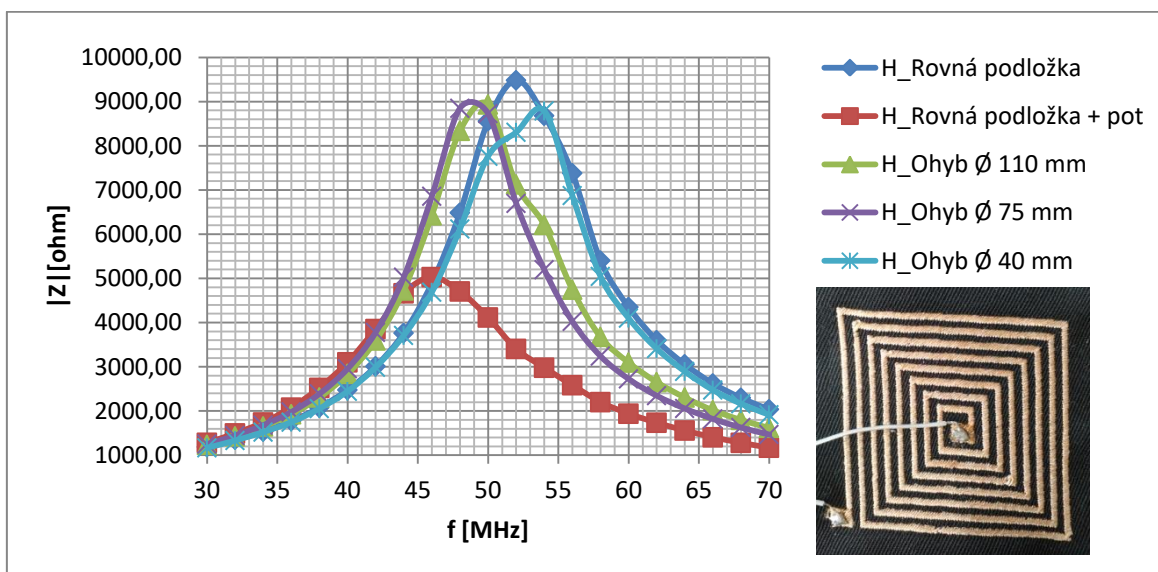
Obr. 3.4 Připojení k RLC můstku AGILENT 4287 A přes měřicí stolici 16092A při měření ohybu o průměru 40 mm.



Obr. 3.5 Měřený vzorek po navlhčení umělým potem

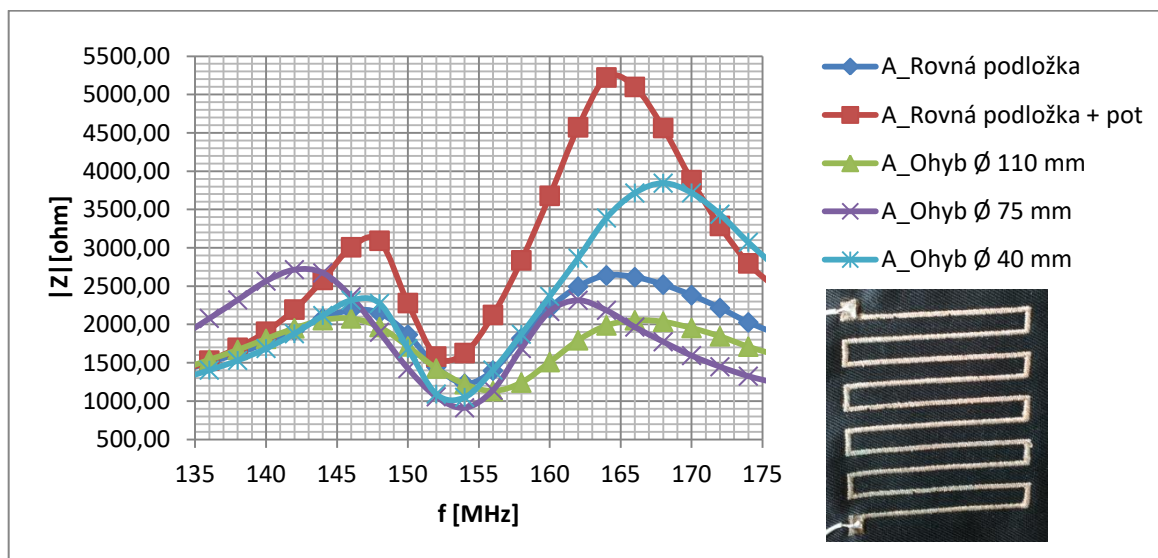
### 3.2.2 Výsledné průběhy

U cívek lze ze zjištěných dat obecně určit, že u zkoumání vlivu ohybu se amplituda při rezonanci snižuje maximálně o 1/3 oproti základnímu měření na rovné podložce. K posuvu rezonanční frekvence dochází maximálně v řádu jednotek MHz v závislosti na zvolené struktuře cívky. Většinou u zkoumaných prvků docházelo k posuvu rezonanční frekvence na levou stranu osy  $x$ . U zkoumání vlivu navlhčení vzorku potem dochází k poklesu amplitudy při rezonanci přibližně o 1/2 a dochází k posuvu rezonanční frekvence přibližně v řádu jednotek MHz v závislosti na zvolené struktuře cívky. K poklesu amplitudy při rezonanci docházelo z důvodu nárůstu elektrického odporu při navlhčení. Většinou u zkoumaných prvků docházelo k posuvu rezonanční frekvence na levou stranu osy  $x$ . Reprezentativní průběh rezonančních charakteristik na cívce je na *obr. 3.6*. Na tomto grafu lze vidět rezonanční charakteristiky na cívce vzorku H, ostatní rezonanční charakteristiky na cívkách při vlivu ohybu a vlivem navlhčení potem lze nalézt v příloze I.



Obr. 3.6 Výsledné průběhy z měření na spirálové cívce – vzorek H.

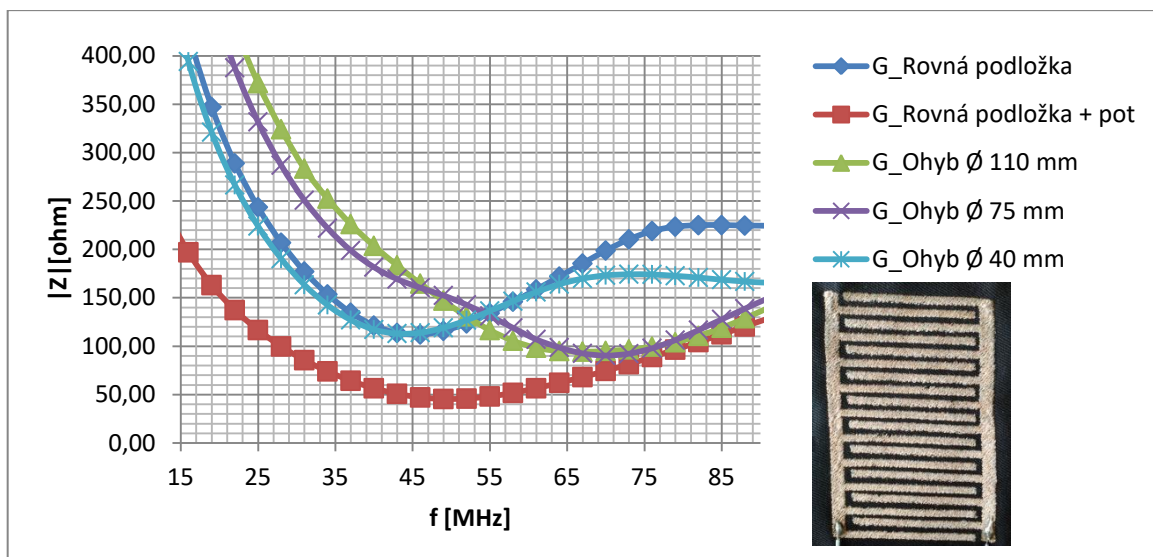
Výjimkou byla cívka vzorku A, u které amplituda při rezonanci u měření vlivu ohybu vzrostla přibližně o 1/4 oproti měření na rovné podložce. Při měření vlivu navlhčení potom vzrostla amplituda při rezonanci přibližně o 1/2 oproti referenčnímu měření na rovné podložce. U tohoto vzorku došlo také k mnohonásobné rezonanci, zřejmě z důvodu projevování kapacitní složky. Do zhodnocení výsledků měření byla porovnávána pouze první rezonance. Rezonanční charakteristiky jsou na *obr. 3.7*. Stejný problém se objevil i u vzorku cívky B, průběh tohoto vzorku je umístěn v příloze I.



Obr. 3.7 Výsledné průběhy z měření na meandrové cívce – vzorek A.

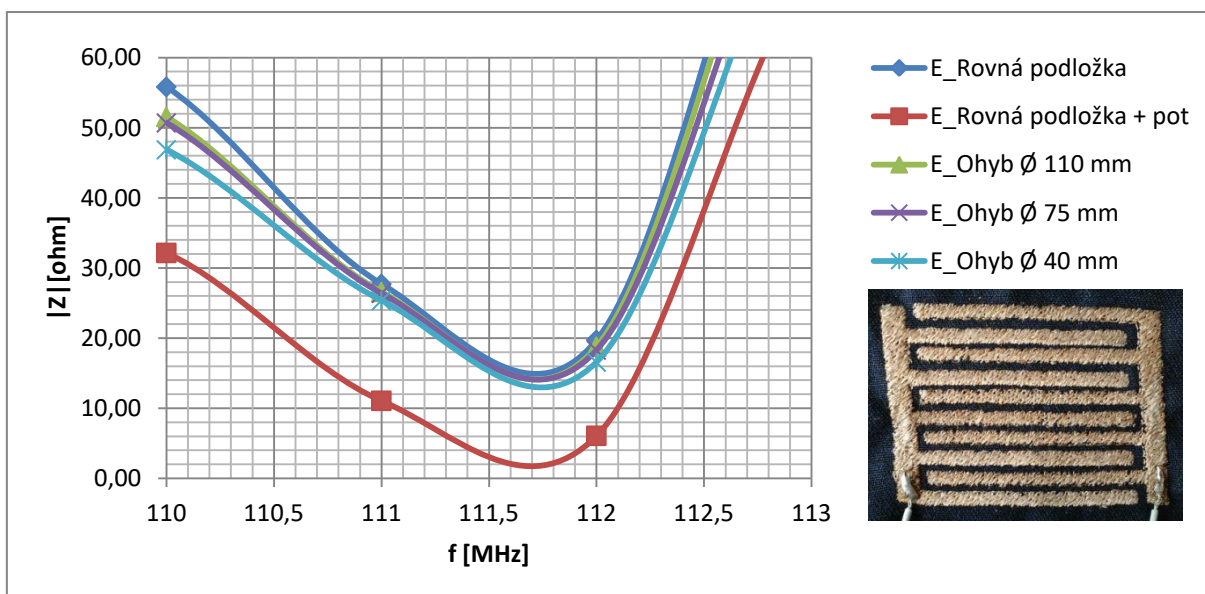
U kondenzátorů lze ze zjištěných dat obecně určit, že u zkoumání vlivu ohybu se amplituda při rezonanci výrazně nemění oproti základnímu měření na rovné podložce. K posuvu rezonanční frekvence dochází maximálně v řádu desítek MHz v závislosti na zvolené struktuře kondenzátoru. U zkoumání vlivu navlhčení vzorku potom dochází k poklesu amplitudy při rezonanci maximálně o 1/2 a dochází k posuvu rezonanční frekvence přibližně v řádu desítek MHz v závislosti na zvolené struktuře kondenzátoru. Reprezentativní rezonanční charakteristiky na kondenzátoru jsou na *obr. 3.8*. Na tomto grafu lze vidět rezonanční charakteristiky na kondenzátoru vzorku G, ostatní rezonanční charakteristiky na kondenzátorech při vlivu ohybu a vlivem navlhčení potom lze nalézt v příloze I.





Obr. 3.8 Výsledné průběhy z měření dvacetiprstového interdigitálního kondenzátoru – vzorek G.

Výjimkou byl kondenzátor vzorku E. U tohoto vzorku nedochází oproti ostatním zkoumaným kondenzátorům k posuvu rezonanční frekvence při ohybu ani při navlhčení vzorku umělým potem. Rezonanční charakteristiky jsou na obr. 3.9.



Obr. 3.9 Výsledné průběhy z měření desetiprstového interdigitálního kondenzátoru – vzorek E.

### 3.2.3 Zhodnocení vlivu ohybu a navlhčení potem na rezonanční charakteristiky

Z výsledků je patrný posuv rezonanční frekvence u jednotlivých ohybů a změna amplitudy při rezonanci u měření ohybu i u měření navlhčené struktury potem. Výsledné průběhy jsou znázorněny na obr. 3.6 – 3.9, případně v příloze I.

U cívek dochází k největším změnám amplitudy při rezonanci a posuvu rezonanční frekvence při navlhčení potem. U vzorků A a B, i když to byly cívky, se při měření projevovala zřejmě i kapacita. Tyto dva vzorky se po celou dobu měření odlišovaly od ostatních měřených cívek a nedocházelo u nich ani k výrazným změnám amplitudy při rezonanci při měření navlhčení potem. U těchto vzorků docházelo také k mnohonásobné rezonanci, tento problém je zřejmě způsoben špatným návrhem vyšívané cívky. Nejméně náchylná struktura cívky se zdá být z hlediska ohybu a navlhčení potem struktura čtvercové spirály, jejíž průběh je např. na *obr. 3.6*.

U kondenzátorů došlo také k největším změnám amplitudy při rezonanci a posuvu rezonanční frekvence při navlhčení potem. Vzorek E, jehož průběh je na *obr. 3.9*, nevykazoval žádné změny rezonanční frekvence při ohybu ani při navlhčení struktury potem, lze ho tedy doporučit k případnému použití do chytrých textilií kvůli své minimální náchylnosti na ohyb a vlhkost.

### 3.3 Měření vlivu údržby vyšíváných pasivních součástek

Třetí částí praktického měření bylo u vybraných struktur ověření chování vyšíváných pasivních součástek v závislosti na pracích cyklech. Tyto vzorky byly vyrobeny znovu, aby nedošlo k ovlivnění vzorků po měření navlhčení vzorků umělým potem. Předem bylo stanoveno 20 pracích cyklů, aby se reálně prověřila výdrž vyšíváných součástek při reálném použití a opotřebení vlivem pracích cyklů. U vzorků byly změřeny hodnoty před 1. pracím cyklem, po 1. – 5. pracím cyklu probíhalo měření vždy po dokončení každého pracího cyklu. Následně byly vzorky měřeny po 10., 15. a 20. pracím cyklu. Přerušené vzorky byly vždy vyřazeny a dále nebyly zařazeny do pracích cyklů. Celkem bylo měřeno 5 typů pasivních vyšíváných součástek. Typy všech vzorků jsou zachyceny na *obr. 2.15*, jejich specifikace je uvedena v *tab. 2.2*. Měření vzorků probíhalo v laboratorních podmínkách při konstantní pokojové teplotě a středoevropském tlaku.

Prací cykly byly prováděny ve standardní bubnové pračce AWG812/PRO Whirlpool a bubnové sušičce značky Whirlpool s použitím pracího prášku značky Bonux na barevné oblečení. Prací cykly byly prány podle normy INTERNATIONAL STANDARD ISO 6330 Textiles — Domestic washing and drying procedures for textile testing [32]. Tato norma definuje minimální hmotnost prádla v pračce, teplotu, dobu trvání pracího cyklu a počet

otáček za minutu. Dle normy byly zvoleny následující parametry pracího programu pro syntetické oblečení:

- teplota 40 °C
- 400 otáček za minutu
- doba trvání programu 1 hodina
- 2 kg prádla

2 kilogramů prádla v pračce bylo dosaženo přidáním nastříhaných textilních pruhů ke vzorkům chytré textilie. Sušení vzorků probíhalo při následujících parametrech programu na syntetické oblečení:

- teplota 60 °C
- doba trvání programu 1 hodina

Vzorky chytré textilie byly chráněny v pracím textilním pouzdře pro praní podprsenek. Toto pouzdro je zachyceno na *obr. 3.10*.



*Obr. 3.10* Textilní pouzdro na podprsenky, ve kterém byly vzorky prány. Na obrázku vpravo lze vidět měřené vzorky.

Od každého typu vzorku byly měřeny 3 exempláře. K vzorkům byly připájeny drátové vývody, aby vzorky mohly být připojeny k měřicímu přístroji. Před samotným měřením byly vzorky proměřeny Ohmmetrem, aby se zjistilo, zda nedošlo během pracích cyklů k přerušení vodivých cest. Vzorky, u kterých již byla přerušena vodivá cesta, byly z dalších pracích cyklů vyřazeny.

### 3.3.1 Měření základních parametrů v závislosti na vlivu údržby

Cílem měření bylo ověřit změnu základních parametrů na navržených pasivních součástkách po jednotlivých pracích cyklech, tyto parametry jsou uvedeny v tab. 3.4.

Tab. 3.4 Měřené základní parametry

Cívky	Kondenzátory
$R$ – elektrický odpor	$R$ – elektrický odpor
$L_s$ – sériová indukčnost	$C_p$ – paralelní kapacita

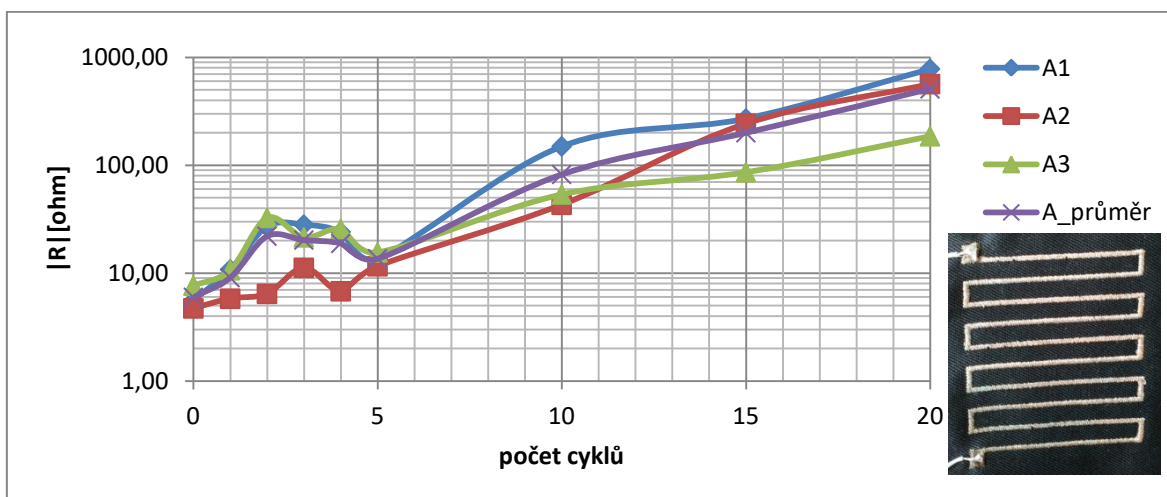
Elektrický odpor  $R$  byl změřen na měřicím přístroji METEX M-3860D. Sériová indukčnost  $L_s$  u cívek a paralelní kapacita  $C_p$  u kondenzátoru byly změřeny na RLC můstku MOTECH MT 4090 při přivedení frekvence  $f = 1$  kHz a napětí  $U = 1$  V. Měřicí přístroj je zachycen na obr. 3.1. Při měření elektrického odporu došlo také k odhalení přerušovaných vzorků.

### 3.3.1.1 Naměřené hodnoty a grafy, měření $R$ , $L_s$ , $C_p$

Při měření cívek lze obecně říci, že s narůstajícími pracími cykly se elektrický odpor zvyšuje, jak lze vidět například na obr. 3.11 a v tab. 3.5.

Tab. 3.5 Hodnoty elektrického odporu  $R$  [ $\Omega$ ] pro všechny zkoumané vzorky typu A pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 20. pracím cyklu.

Počet cyklů	0	1	2	3	4	5	10	15	20
A1	5,58	10,81	27,11	28,17	24,10	13,70	149,90	271,20	782,00
A2	4,72	5,80	6,44	11,21	6,80	11,60	43,10	243,30	566,00
A3	7,66	10,66	32,53	21,50	25,70	15,60	53,70	86,20	185,80
A průměr	5,99	9,09	22,03	20,29	18,87	13,63	82,23	200,23	511,27

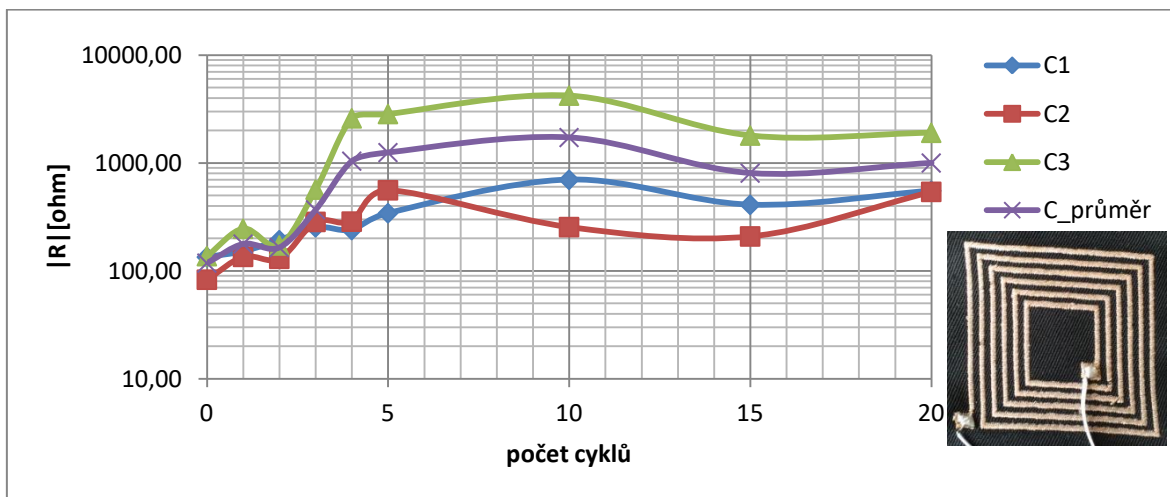
Obr. 3.11 Průběh elektrického odporu  $R$  [ $\Omega$ ] na meandrové cívce – vzorek A pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 20. pracím cyklu.

U vzorku C3 došlo po 3. pracím cyklu k výraznému nárůstu elektrického odporu přibližně na pětinasobek předchozí hodnoty, tento nárůst pokračoval až k 10. pracímu cyklu, kdy elektrický odpor začal klesat, to mohlo souviset se změnou uspořádání vyšitých nití v důsledku deformace při praní v bubnové pračce nebo v důsledku zbylého pracího prostředku ve vodivé struktuře vyšitého motivu (obr. 3.12, tab. 3.6).



Tab. 3.6 Hodnoty elektrického odporu  $R$  [ $\Omega$ ] pro všechny zkoumané vzorky typu C pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 20. pracím cyklu.

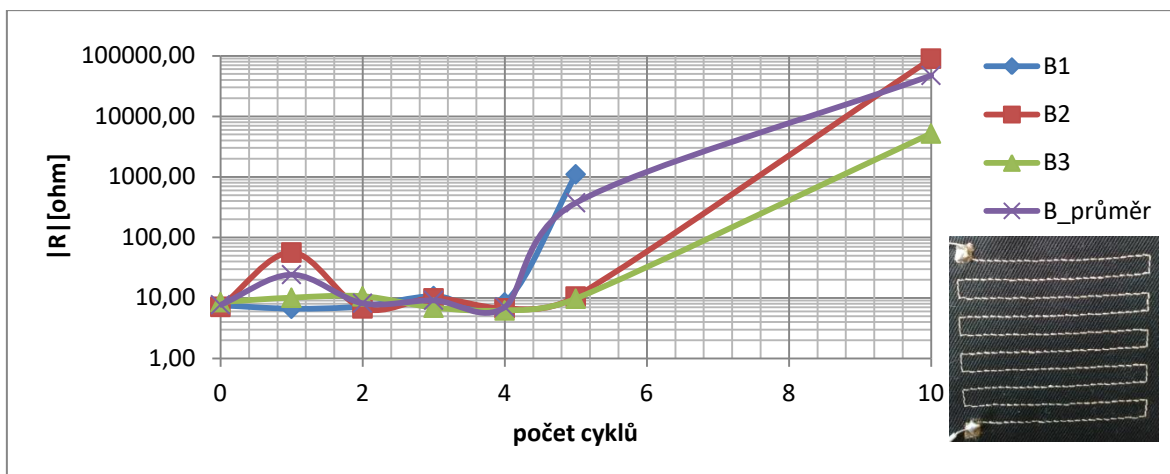
Počet cyklů	0	1	2	3	4	5	10	15	20
<b>C1</b>	134,52	151,82	192,82	254,00	239,40	343,00	700,00	410,00	553,00
<b>C2</b>	83,01	135,22	129,75	285,00	286,70	560,00	255,00	209,00	541,00
<b>C3</b>	137,24	246,10	172,44	568,00	2600,00	2850,00	4220,00	1800,00	1910,00
<b>C průměr</b>	118,26	177,71	165,00	369,00	1042,03	1251,00	1725,00	806,33	1001,33

Obr. 3.12 Průběh elektrického odporu  $R$  [ $\Omega$ ] na spirálové cívce – vzorek C pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 20. pracím cyklu.

U vzorků, u kterých došlo vlivem pracích cyklů k nevratnému přerušení vodivé cesty, se elektrický odpor zvyšoval o řády, viz. vzorky B a D, vodivá cesta u těchto vzorků byla tvořena jednou vodivou nití. Hodnoty patřící ke vzorku B jsou uvedeny v tab. 3.7 a průběh je znázorněn na obr. 3.13. Průběhy a tabulky s hodnotami elektrického odporu náležící ke vzorku D lze nalézt v příloze II.

Tab. 3.7 Hodnoty elektrického odporu  $R$  [ $\Omega$ ] pro všechny zkoumané vzorky typu B pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 15. pracím cyklu, kdy došlo k přerušení všech vzorků.

Počet cyklů	0	1	2	3	4	5	10	15
<b>B1</b>	7,51	6,61	7,22	10,70	8,40	1100,00	-	-
<b>B2</b>	7,11	56,11	6,71	9,80	6,70	10,50	89600,00	-
<b>B3</b>	8,51	10,06	10,61	6,90	6,20	9,70	5200,00	-
<b>B průměr</b>	7,71	24,26	8,18	9,13	7,10	373,40	47400,00	-



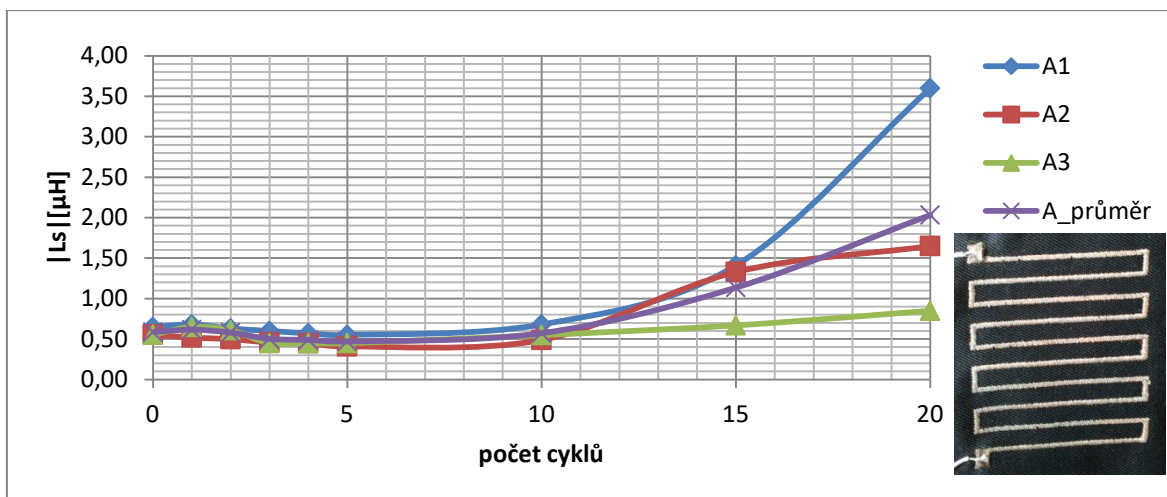
Obr. 3.13 Průběh elektrického odporu  $R$  [ $\Omega$ ] na meandrové cívce – vzorek B pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 10. pracím cyklu, kdy bylo naposledy možné nalézt měřitelnou hodnotu.

Elektrický odpor u kondenzátoru vzorku E byl stále neměřitelný, což značí správnou funkčnost kondenzátoru, a proto nedošlo například k přetržení některé z vodivých nití, která by se mohla dotýkat protilehlé elektrody.

Sériová indukčnost se s přibývajícimi pracími cykly mění pouze mírně, a pokud nedochází k poškození nebo částečnému přerušení vodivé cesty, tak se nemění v jednotkách řádů. Reprezentativní průběh sériové indukčnosti v závislosti na počtu pracích cyklů lze vidět na obr. 3.14 a v tab. 3.8, kde je zachycen průběh na vzorku A. Průběhy a tabulky s hodnotami sériové indukčnosti u ostatních vzorků lze vidět v příloze II.

Tab. 3.8 Hodnoty sériové indukčnosti  $L_s$  [ $\mu H$ ] pro všechny zkoumané vzorky typu A pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 20. pracím cyklu.

Počet cyklů	0	1	2	3	4	5	10	15	20
A1	0,65	0,68	0,63	0,60	0,57	0,55	0,68	1,41	3,60
A2	0,56	0,52	0,50	0,46	0,45	0,41	0,49	1,33	1,65
A3	0,55	0,65	0,61	0,45	0,45	0,45	0,55	0,67	0,85
A průměr	0,59	0,62	0,58	0,50	0,49	0,47	0,57	1,14	2,03

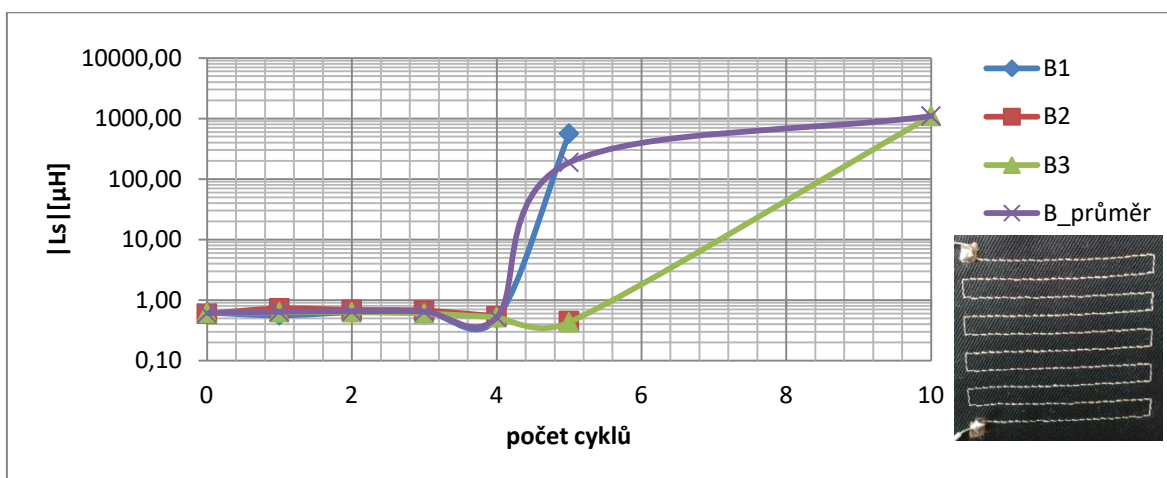


Obr. 3.14 Průběh sériové indukčnosti  $L_s$  [ $\mu\text{H}$ ] na meandrové cívice – vzorek A pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 20. pracím cyklu.

U vzorků, u kterých došlo vlivem pracích cyklů k nevratnému přerušení vodivé cesty, se sériová indukčnost zvyšovala o řády, viz. vzorky B a D, vodivá cesta u těchto vzorků byla tvořena jednou vodivou nití. Vzorek vykazoval nereálné hodnoty, a proto ho lze označit za nefunkční již před úplným přerušením vodivé cesty. Hodnoty patřící ke vzorku B jsou uvedeny v tab. 3.9 a průběh je znázorněn na obr. 3.15. Průběhy a tabulky s hodnotami sériové indukčnosti náležící ke vzorku D lze nalézt v příloze II.

Tab. 3.9 Hodnoty sériové indukčnosti  $L_s$  [ $\mu\text{H}$ ] pro všechny zkoumané vzorky typu B pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 15. pracím cyklu, kdy došlo k přerušení všech vzorků.

Počet cyklů	0	1	2	3	4	5	10	15
<b>B1</b>	0,62	0,56	0,63	0,66	0,50	563,00	-	-
<b>B2</b>	0,59	0,73	0,69	0,67	0,54	0,45	neměřitelné	-
<b>B3</b>	0,61	0,63	0,63	0,60	0,52	0,43	1100,00	-
<b>B průměr</b>	0,61	0,64	0,65	0,64	0,52	187,96	1100,00	-

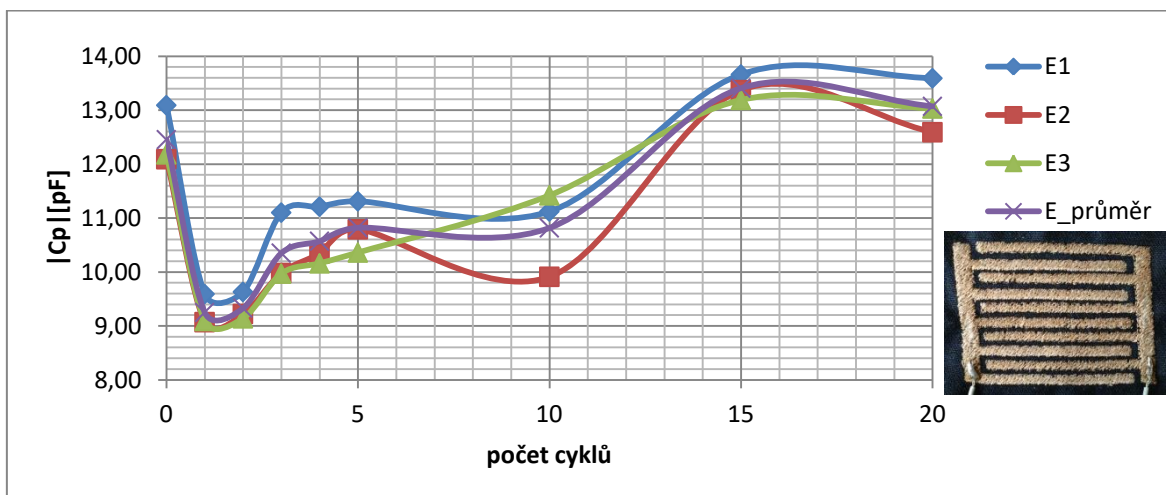


Obr. 3.15 Průběh sériové indukčnosti  $L_s$  [ $\mu\text{H}$ ] na meandrové cívice – vzorek B pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 10. pracím cyklu, kdy bylo naposledy možné nalézt měřitelnou hodnotu.

U kondenzátoru reprezentovaného vzorkem E nastala výraznější změna kapacity po 1. pracím cyklu, kdy došlo k jejímu snížení přibližně o 1/4. V dalších cyklech se kapacita zvyšovala nebo se oproti předchozí hodnotě výrazně neměnila. Po 15. pracím cyklu se kapacita dostala nad původní referenční hodnotu před pracími cykly. Výkyvy kapacity na kondenzátorech byly v jednotkách pF, nedocházelo ke změnám v jednotkách řádů. Naměřené hodnoty jsou uvedené v tab. 3.10 a průběh kapacity v závislosti na počtu pracích cyklů je znázorněn v obr. 3.16. Změna velikosti kapacity mohla souviset se změnou uspořádání vyšitých vodivých nití nebo se zbytkem pracího prostředku ve struktuře vyšitého motivu.

Tab. 3.10 Hodnoty kapacity  $C_p$  [pF] pro všechny zkoumané vzorky typu C pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 20. pracím cyklu.

Počet cyklů	0	1	2	3	4	5	10	15	20
E1	13,09	9,59	9,63	11,10	11,21	11,31	11,12	13,66	13,59
E2	12,09	9,07	9,22	9,98	10,34	10,79	9,91	13,37	12,59
E3	12,18	9,09	9,14	9,97	10,16	10,36	11,42	13,19	13,03
E průměr	12,45	9,25	9,33	10,35	10,57	10,82	10,82	13,41	13,07



Obr. 3.16 Průběh paralelní kapacity  $C_p$  [pF] na interdigitálním kondenzátoru – vzorek E pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 20. pracím cyklu.

### 3.3.1.2 Zhodnocení změny elektrického odporu, indukčnosti a kapacity při pracích cyklech

Z výsledků jsou patrné změny základních parametrů cívek a kondenzátorů po jednotlivých pracích cyklech. Po provedení všech 20 pracích cyklů ztratily funkčnost všechny součástky, u kterých vodivou cestu tvořila pouze jedna vodivá nit. Výsledné průběhy jsou znázorněny na obr. 3.11 – 3.16, případně v příloze II.

Ze získaných hodnot lze říci, že u cívek dochází po jednotlivých pracích cyklech k nárůstu elektrického odporu v jednotkách až desítkách Ohmů po každém pracím cyklu. Někdy došlo dokonce k poklesu elektrického odporu, což mohlo být zapříčiněno zbylým pracím prostředkem ve vodivé cestě dané vyšité struktury či změnou uspořádání vyšitých nití v důsledku deformace při praní v bubnové pračce. V případě, že došlo k úplnému přerušení vodivé cesty u vzorku, tak se hodnota elektrického odporu zvyšovala o řády. Tento vzorek tak ztrácel svoji funkčnost již před úplným přerušením vodivé cesty. U kondenzátorů byl elektrický odpor stále neměřitelný, a proto po všech pracích cyklech vykazovaly kondenzátory své původní hodnoty před pracími cykly.

Sériová indukčnost u cívek se rostoucím počtem pracích cyklů měnila jen mírně, docházelo ke změnám o několik desetin případně jednotek. Byla zde zjištěna závislost, kdy se zvyšujícím se elektrickým odporem vzrostla mírně také indukčnost. V případě, že došlo k úplnému přerušení vodivé cesty u vzorku, tak se hodnota sériové indukčnosti zvyšovala o řády. Tento vzorek ztrácel svoji funkčnost již před úplným přerušením vodivé cesty.

Kondenzátory nevykazovaly výrazné změny hodnoty naměřené paralelní kapacity po jednotlivých pracích cyklech. Výkyvy v naměřených hodnotách byly v desetinách případně jednotkách pF. Změna velikosti kapacity mohla souviset se změnou uspořádání vyšitých nití v důsledku deformace při praní v bubnové pračce nebo v důsledku zbylého pracího prostředku ve vodivé struktuře vyšitého motivu.

### **3.3.2 Měření vlivu údržby na rezonanční charakteristiky pasivních součástek**

Cílem měření bylo ověřit změnu rezonančních charakteristik navržených pasivních součástek po jednotlivých pracích cyklech. Rezonanční charakteristika je dána závislostí impedance na frekvenci. Měření rezonančních charakteristik bylo provedeno na RLC můstku AGILENT 4287 A s měřicí stolicí 16092A. Všechny měřené parametry jsou uvedeny v tab. 3.11. Měřicí přístroj je zachycen na *obr. 3.3*. Před samotným měřením bylo nutné provést kalibraci měřicího přístroje. Poté byla nastavena měřicí frekvence v rozsahu  $f = 1 - 300$  MHz v závislosti na měřeném vzorku. Všechny vzorky byly měřeny v základní poloze na rovné podložce. Při tomto měření bylo získáno velké množství dat, data byla následně pomocí Microsoft Office Excel vyhodnocena do grafů.

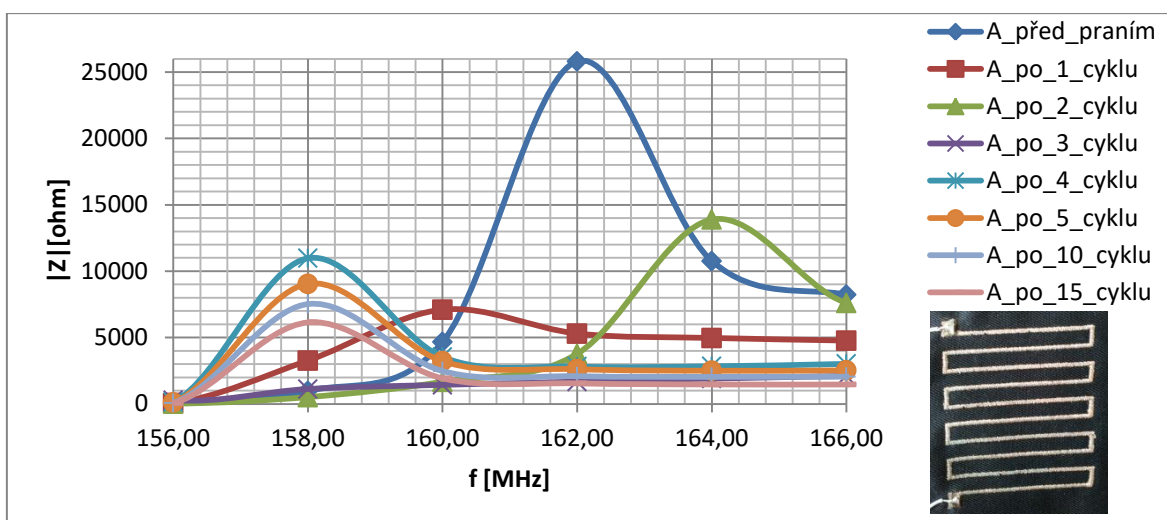
Tab. 3.11 Měřené parametry

<b>Cívky</b>	<b>Kondenzátory</b>
<i>Z - impedance</i>	<i>Z - impedance</i>
$\phi$ – fázový posuv	$\phi$ – fázový posuv
<i>Q – činitel jakosti</i>	<i>Q – činitel jakosti</i>
<i>Ls – sériová indukčnost</i>	<i>Cp – paralelní kapacita</i>

### 3.3.2.1 Výsledné rezonanční charakteristiky

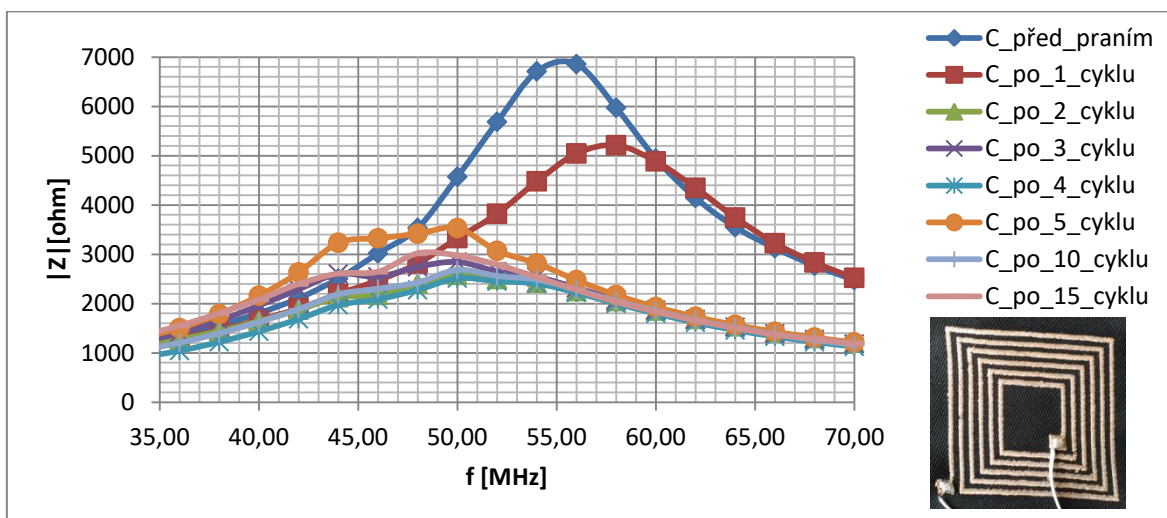
Výsledné průběhy vznikly zprůměrováním hodnot ze všech tří vzorků každého typu.

U cívek je z výsledných průběhů patrný pokles amplitudy při rezonanci po každém pracím cyklu. K největšímu poklesu oproti hodnotě před 1. pracím cyklem došlo po 1. pracím cyklu, kdy amplituda klesla i o více než 1/2 v závislosti na zvolené struktuře vyšívané cívky, tento pokles souvisí se zvýšením elektrického odporu. Po dalších pracích cyklech již oproti předchozí naměřené hodnotě nedocházelo k tak velkému poklesu amplitudy. V průběhu pracích cyklů došlo občas i ke zvýšení amplitudy při rezonanci oproti předchozí naměřené hodnotě, to mohlo souviset se změnou uspořádání vyšitých nití v důsledku deformace při praní v bubnové pračce nebo vlivem zbylého pracího prostředku ve vodivé struktuře vyšitého motivu. Po provedení všech pracích cyklů klesla amplituda při rezonanci oproti referenční hodnotě před pracími cykly až o 80 % u vzorků, u kterých nedošlo k trvalému přerušení vodivé cesty. Pokles velikosti amplitudy při rezonanci souvisí se zvyšováním elektrického odporu vyšívané vodivé struktury. K posuvu rezonanční frekvence oproti referenční hodnotě před 1. pracím cyklem docházelo nejvíce po 1. pracím cyklu, kdy došlo k posuvu přibližně až o 15 MHz v závislosti na zvolené struktuře. K dalšímu posuvu rezonanční frekvence došlo po 2. a 3. pracím cyklu. Po 4. pracím cyklu nedošlo až do konce měření k posuvu rezonanční frekvence. Reprezentativní rezonanční charakteristiky na cívce náležící ke vzorku A jsou znázorněny na obr. 3.17. Tato cívka byla typu meandr. Ostatní rezonanční charakteristiky lze nalézt v příloze III.



Obr. 3.17 Výsledné rezonanční charakteristiky na meandrové cívce – vzorek A.

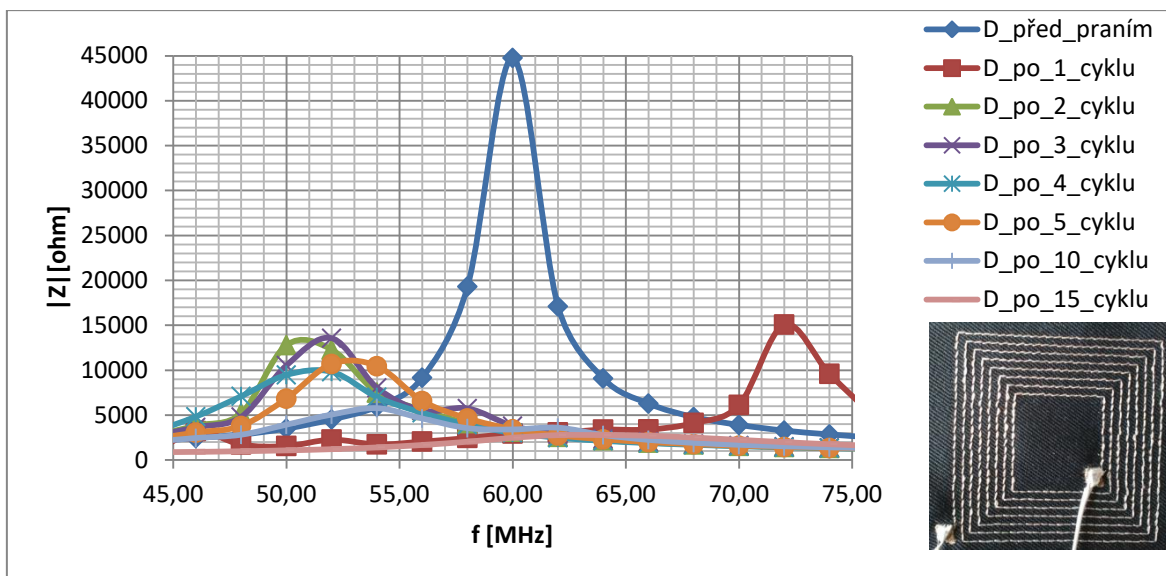
K nejmenším změnám amplitudy při rezonanci docházelo u vzorků C. Po provedení všech pracích cyklů došlo k poklesu o cca 60 % oproti referenční hodnotě před 1. pracím pracím cyklem. Tento vzorek byl typu spirálové cívky. U tohoto vzorku také nedocházelo k výraznému posuvu rezonanční frekvence. Rezonanční charakteristiky na vzorku C jsou znázorněny na obr. 3.18.



Obr. 3.18 Výsledné rezonanční charakteristiky na spirálové cívce – vzorek C.

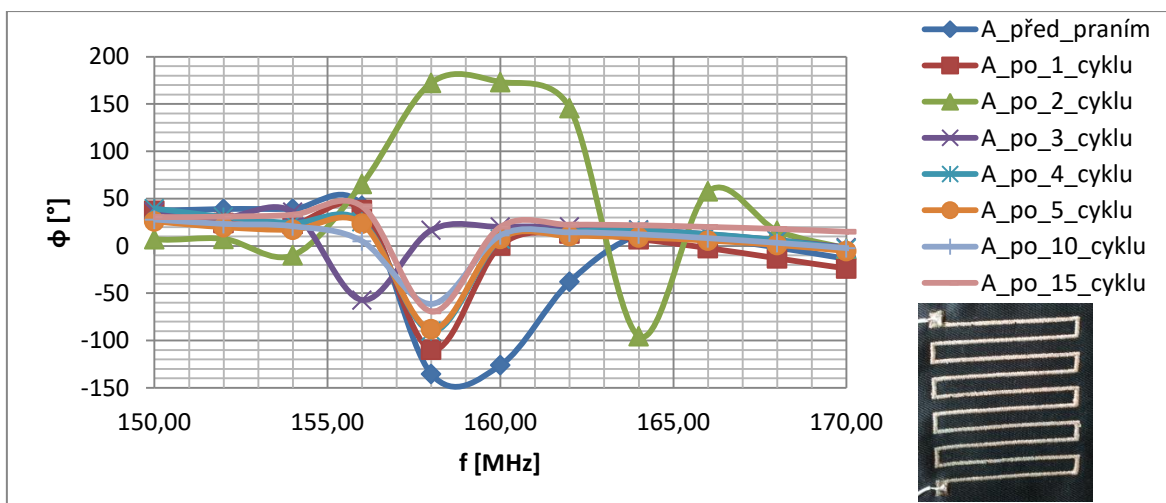
U cívek vzorků B a D došlo u všech třech exemplářů obou typů k trvalému přerušení vodivé cesty, proto nebylo možné dokončit měření rezonančních charakteristik po všech 20 pracích cyklech. U vzorku typu D již po 15. cyklu nebyla znatelná rezonance u žádného ze tří vzorků, i když ještě nebyla vodivá cesta úplně přerušena. Došlo k poklesu amplitudy o 95% oproti referenční hodnotě zjištěné před provedením 1. pracího cyklu. Rezonanční charakteristiky na vzorku typu D jsou znázorněny na obr. 3.19. Rezonanční charakteristiky vzorku typu B po jednotlivých pracích cyklech jsou umístěny v příloze III.





Obr. 3.19 Výsledné rezonanční charakteristiky na spirálové cívce – vzorek D.

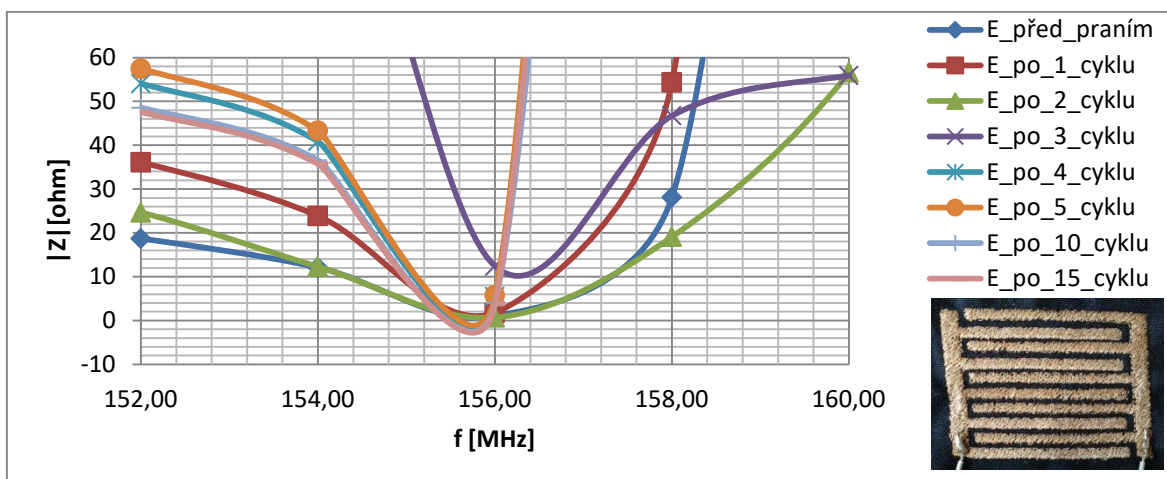
U cívek se fázový posuv po jednotlivých cyklech výrazně nemění. Po jednotlivých pracích cyklech dochází ke snižování velikosti úhlu, zřejmě v závislosti s narůstajícím elektrickým odporem. Po provedení všech pracích cyklů došlo k poklesu maximální velikosti úhlu o přibližně 1/3 v závislosti na zvolené struktuře cívky. K frekvenčnímu posuvu dochází v řádech jednotek, maximálně desítek MHz. Reprezentativní průběh fázového posuvu v závislosti na frekvenci po jednotlivých pracích cyklech je znázorněn na obr. 3.20. Na tomto průběhu je zachycen průběh na meandrové cívce vzorku A. Výrazná změna na tomto vzorku nastala po 2. pracím cyklu, kdy došlo k neobvyklému nárůstu úhlu do kladných hodnot a až poté k poklesu do záporných hodnot úhlu, jak to bylo obvyklé po ostatních pracích cyklech. Tento problém mohl souviset se změnou uspořádání vyšitých nití v důsledku deformace při praní v bubnové pračce nebo v důsledku zbylého pracího prostředku ve vodivé struktuře vyšitého motivu.



Obr. 3.20 Výsledné průběhy fázového posuvu na meandrové cívce – vzorek A.

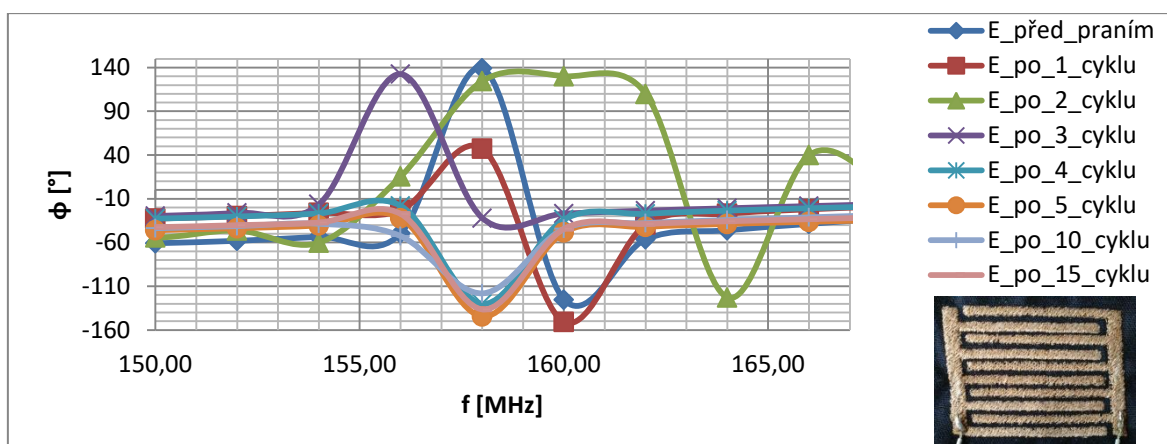


U kondenzátoru je z výsledných průběhů patrné, že nedochází k výrazné změně amplitudy při rezonanci, ani nedochází k posuvu rezonanční frekvence po jednotlivých pracích cyklech. K mírné změně amplitudy dochází nezávisle na počtu pracích cyklů, to mohlo být z důvodu změny uspořádání vyšitých nití v důsledku deformace při praní v bubnové pračce nebo v důsledku zbylého pracího prostředku ve vodivé struktuře vyšitého motivu. Po provedení všech pracích cyklů vzrostla amplituda při rezonanci oproti referenční hodnotě před pracími cykly cca o 5 Ohmů. Rezonanční charakteristiky na kondenzátoru, který byl značený jako vzorek E, jsou znázorněny na obr. 3.21.



Obr. 3.21 Výsledné rezonanční charakteristiky na interdigitálním kondenzátoru – vzorek E.

Při měření fázového posuvu u kondenzátoru se minimální velikost úhlu po všech provedených pracích cyklech výrazně nemění. K frekvenčnímu posuvu dochází v řádech jednotek, maximálně desítek MHz. Průběh fázového posuvu v závislosti na frekvenci po jednotlivých pracích cyklech je znázorněn na obr. 3.22. Na tomto grafu je zachycen průběh na interdigitálním desetiprstovém kondenzátoru – vzorek E. Výrazná změna na tomto vzorku nastala po 4. pracím cyklu, kdy již nedocházelo k výraznému nárůstu úhlu do kladných hodnot a až poté k poklesu na minimální hodnotu. Od tohoto pracího cyklu až do konce měření nedocházelo k žádným frekvenčním posuvům amplitudy úhlu. Tento problém mohl souviset se změnou uspořádání vyšitých nití v důsledku deformace při praní v bubnové pračce nebo v důsledku zbylého pracího prostředku ve vodivé či nevodivé struktuře vyšitého motivu.



Obr. 3.22 Výsledné průběhy fázového posuvu na interdigitálním kondenzátoru – vzorek E.

### 3.3.2.2 Zhodnocení vlivu údržby na rezonanční charakteristiky

Z výsledků je patrný posuv rezonanční frekvence, změna amplitudy při rezonanci a změny fázového posuvu po jednotlivých pracích cyklech. Výsledné průběhy jsou znázorněny na obr. 3.17 – 3.22, případně v příloze III.

U cívek dochází k největším změnám amplitudy při rezonanci a posuvu rezonanční frekvence po 1. pracím cyklu. Po 4. pracím cyklu při porovnání s předchozím pracím cyklem již nedocházelo k posuvu rezonanční frekvence, ale pouze k mírné změně amplitudy rezonanční charakteristiky. Pokles velikosti amplitudy při rezonanci souvisí se zvyšováním elektrického odporu vyšívané vodivé struktury. U vzorků B a D nebylo možné dokončit celé měření, protože ještě před dokončením všech pracích cyklů došlo u všech vzorků k trvalému přerušení vodivé cesty. Nejvíce odolná struktura cívky se zdá být, z hlediska vlivu údržby, struktura vyšité čtvercové spirály vzorku C, jejíž průběh je např. na obr. 3.18. Fázový posuv u cívek se po jednotlivých cyklech výrazně nemění. Po jednotlivých pracích cyklech dochází ke snižování velikosti úhlu, zřejmě v závislosti s narůstajícím elektrickým odporem. K frekvenčnímu posuvu dochází v řádech jednotek, maximálně desítek MHz.

U interdigitálního desetiprstového kondenzátoru nedocházelo vlivem údržby k žádnému posuvu rezonanční frekvence. Změna amplitudy při rezonanci byla minimální. Tento vzorek, jehož průběh je znázorněn na obr. 3.21, lze tedy doporučit k případnému použití do chytrých textilií kvůli své minimální náchylnosti na vliv údržby. Při měření fázového posuvu u kondenzátoru se minimální velikost úhlu po všech provedených pracích

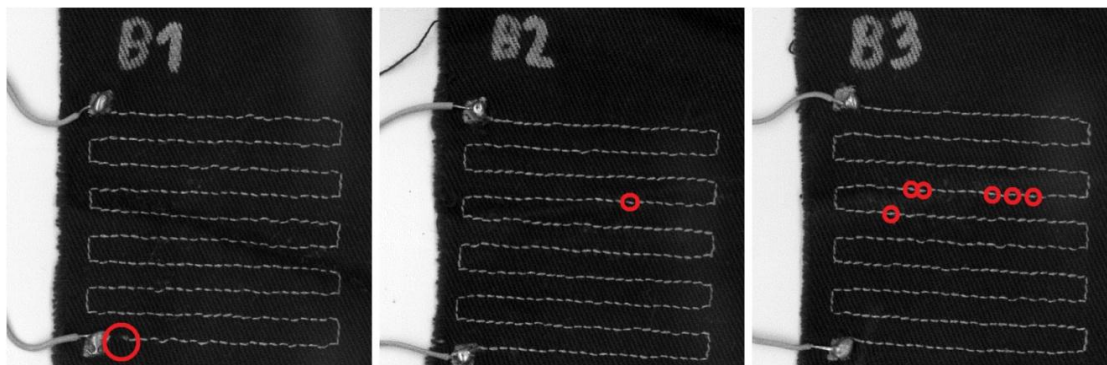
cyklech výrazně nemění. K frekvenčnímu posuvu dochází v řádech jednotek, maximálně desítek MHz.

### 3.3.3 Zhodnocení vlivu údržby na pasivní součástky

Grafické vyhodnocení funkčnosti všech vzorků po jednotlivých pracích cyklech je uvedeno v tab. 3.12. Po provedení všech 20 pracích cyklů ztratily funkčnost všechny součástky, u kterých vodivou cestu tvořila pouze jedna vodivá nit.

U meandrových cívek vzorků A nedošlo ani po 20 pracích cyklech k přerušení vodivé cesty, a proto i po 20 pracích cyklech vykazovaly, i když trochu změněné, původní vlastnosti tzn. vytvářet indukčnost. Po 20 pracích cyklech došlo k nárůstu elektrického odporu a indukčnosti. Rezonance byla také stále rozlišitelná, i když došlo oproti referenční hodnotě k poklesu amplitudy a změně rezonanční frekvence. Pokles velikosti amplitudy při rezonanci souvisí se zvyšováním elektrického odporu vyšívané vodivé cesty.

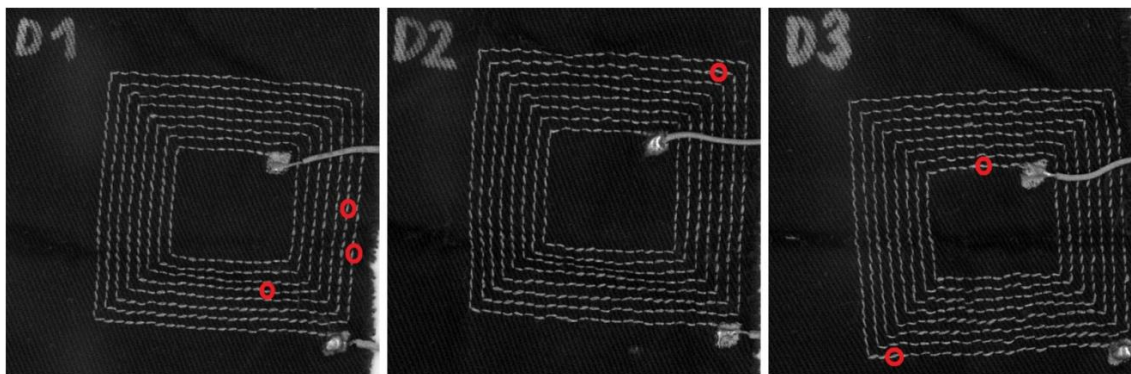
U meandrových cívek vyšitých jednou nití vzorků B došlo už po 15 pracích cyklech k přerušení u všech tří vzorků. U vzorku B1 dokonce už po 10 pracích cyklech, kdy došlo k přetržení vodivé cesty. Toto přetržení bylo i vizuálně viditelné. U vzorků B2 a B3 došlo k přerušení vodivé cesty po 15. pracím cyklu. Přerušení u těchto vzorků nebylo vizuálně viditelné, ale bylo odhaleno při měření elektrického odporu na měřicím přístroji METEX M-3860D. Tímto přístrojem došlo také k lokalizování přesného místa přerušení vodivé cesty. U vzorku B2 došlo k přerušení vodivé cesty pouze na 1 místě. U vzorku B3 došlo k přerušení vodivé cesty na 6 místech. Přesná lokace přerušovaných míst vodivé cesty na vzorcích je viditelná na *obr. 3.23*. Pracími cykly došlo zřejmě k přetržení měděných vláken vodivé nitě. Po zjištění, že byla vodivá cesta přerušena, tak byly vzorky ihned vyjmuty z dalších pracích cyklů.



Obr. 3.23 Všechny měřené vzorky typu B. Přerušená místa jsou vyznačená červenou barvou.

U spirálových cívek vzorků C nedošlo ani po 20 pracích cyklech k přerušení vodivé cesty, a proto i po 20 pracích cyklech vykazovaly, i když trochu změněné, původní vlastnosti tzn. vytvářet indukčnost. Po 20 pracích cyklech došlo k nárůstu elektrického odporu a indukčnosti. Rezonance byla také stále rozlišitelná, i když došlo oproti referenční hodnotě k poklesu amplitudy a změně rezonanční frekvence. Pokles amplitudy byl nižší než u cívky vzorku A.

U spirálových cívek vyšitých jednou nití vzorků D došlo k úplnému přerušení vodivé cesty po 15. pracím cyklu u vzorku D3 a u vzorků D1 a D2 po 20. pracím cyklu. Přerušení u těchto vzorků nebylo vizuálně viditelné, ale bylo odhaleno při měření elektrického odporu na měřicím přístroji METEX M-3860D. Tímto přístrojem došlo také k lokalizování přesného místa přerušení vodivé cesty. U vzorku D1 došlo k přerušení vodivé cesty na 3 místech. U vzorku B2 došlo k přerušení vodivé cesty pouze na 1 místě a u vzorku B3 došlo k přerušení vodivé cesty na 2 místech. Přesná lokace přerušených míst vodivé cesty na vzorcích je viditelná na *obr. 3.24*. Pracími cykly došlo zřejmě k přetržení měděných vláken vodivé nitě. Po zjištění, že byla vodivá cesta přerušena, byly vzorky ihned vyjmuty z dalších pracích cyklů.



*Obr. 3.24* Všechny měřené vzorky typu B. Přerušená místa jsou vyznačena červenou barvou.

U vzorků E interdigitálních desetiprstových kondenzátorů nedošlo ani po 20 pracích cyklech k výrazné změně ve vykazování původních vlastností, tzn. vytvářet kapacitu. Tyto vzorky byly navrženy jako kondenzátory, proto nehrozilo takové riziko ztráty vlastností jako u cívek. U měření rezonance nedošlo po provedení všech pracích cyklů k výraznějším změnám amplitudy ani ke změně rezonanční frekvence.

Tab. 3.12 Zhodnocení funkčnosti vzorků (alespoň jeden ze tří vzorků byl funkční)

Počet cyklů	1	2	3	4	5	10	15	20
<b>A</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>B</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X
<b>C</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>D</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X
<b>E</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

## **Závěr**

Diplomová práce se zabývá vlivem údržby textilií a parametrů prostředí na elektrické vlastnosti vyšíváných pasivních součástek. Cílem diplomové práce bylo navrhnout vyšívané pasivní součástky a proměřit vliv údržby textilií a parametrů prostředí na elektrické vlastnosti těchto vyšíváných pasivních součástek, aby byly co nejvěrohodněji napodobeny reálné provozní podmínky používání v chytrých textiliích. Navrženými pasivními součástkami jsou planární cívky a kondenzátory.

V první kapitole jsou popsány důležité aspekty chytrých textilií, jejich historie, vodivé nitě a technologie používané při výrobě chytrých textilií. Mezi tyto technologie patří technologie tkaní, pletení, netkané textilie, vyšívání, vodivé pasty pro tisk na chytré textilie, vodivá folie a tkanina, tažení drátků a senzory. Kapitola se dále věnuje kontaktování na chytrých textiliích a popisu současného stavu v problematice vlivu prostředí a údržby na chytré textilie. Ve druhé kapitole jsou popsány jednotlivé typy vyšíváných pasivních součástek, jejich návrh a výroba pro testování v praktickém měření. Bylo vyrobeno celkem 8 různých motivů, jednalo se o 2 meandrové cívky, 3 spirálové cívky a 3 interdigitální kondenzátory. Vyrobené vzorky byly jak plné, kde byla velká spotřeba vodivé nitě, tak jednovláknovité, u kterých byla nižší spotřeba, ale bylo vyšší riziko jejich poškození.

Třetí kapitola pojednává o praktické části. Praktická část se zabývá měřením hodnot vlivu ohybu, vlhkosti a vlivu údržby textilií na elektrické vlastnosti vyšíváných pasivních součástek. Před namáháním vzorků byly změřeny hodnoty sériové indukčnosti u cívek a paralelní kapacity u kondenzátorů, tyto hodnoty byly porovnány s teoretickými vypočítanými hodnotami. Z výsledků vyplývá, že u cívek byla naměřená indukčnost vyšší než teoretická hodnota, u kondenzátorů byly rozdíly ve velikosti kapacity nižší. Rozdílné hodnoty mohly být způsobeny délkou nitě, zákrutami nebo nepřesným vyšítím vyšíváných součástek. Dalším testem byl vliv ohybu a navlhčení potem na rezonanční charakteristiku. Z tohoto měření vyplynula změna rezonanční frekvence u jednotlivých ohybů a změna amplitudy při rezonanci u měření ohybu i u měření navlhčené struktury umělým potem. K největšímu poklesu amplitudy při rezonanci došlo u měření vzorku navlhčeného umělým potem, kdy došlo k poklesu amplitudy až o cca 50%.

Poslední částí praktického měření bylo ověřit chování vyšíváných pasivních součástek v závislosti na pracích cyklech u vybraných struktur. Měřen byl vliv údržby na elektrický odpor, sériovou indučnost u cívek, paralelní kapacitu u kondenzátorů a rezonanční charakteristiku. Předem bylo stanoveno 20 pracích cyklů, aby se reálně prověřila výdrž vyšíváných součástek při reálném použití a opotřebením vlivem pracích cyklů. Prací cykly byly provedeny s použitím pracího prostředku ve standardní bubnové pračce a bubnové sušičce pro domácnosti. Z výsledků jsou patrné změny základních parametrů cívek a kondenzátorů po jednotlivých pracích cyklech. Po provedení všech 20 pracích cyklů ztratily funkčnost všechny součástky, u kterých vodivou cestu tvořila pouze jedna vodivá nit'. Ze získaných hodnot lze říci, že po jednotlivých pracích cyklech dochází k nárůstu elektrického odporu po každém pracím cyklu. Někdy došlo dokonce k poklesu elektrického odporu, což mohlo být zapříčiněno zbylým pracím prostředkem ve vodivé cestě dané vyšité struktury, či změnou uspořádání vyšitých nití v důsledku deformace při praní v bubnové pračce. U velikosti indukčnosti a kapacity dochází pouze k mírným změnám, větší výkyvy souvisí s nárůstem elektrického odporu. U cívek dochází k poklesu amplitudy při rezonanci po každém pracím cyklu, pokles velikosti amplitudy při rezonanci souvisí se zvyšováním elektrického odporu vyšívané vodivé cesty. U cívek, u kterých nenastalo přerušení vodivé cesty, dochází po provedení všech pracích cyklů k poklesu amplitudy při rezonanci přibližně až o 80 %. U interdigitálního desetiprstového kondenzátoru nedocházelo vlivem údržby k žádnému posuvu rezonanční frekvence. Změna amplitudy při rezonanci byla minimální.

Z cívek se zdá být nejodolnější spirálová cívka s vyšitou vodivou cestou o šířce 1 mm, u této cívky došlo k poklesu amplitudy při rezonanci o cca 60 %. Na interdigitální kondenzátor s vyšitými prsty nemají prací cykly skoro žádný vliv. Nízká odolnost byla zjištěna u vzorků, které měly vodivou cestu vyšitou pouze jednou nití, tyto vzorky ztrácely funkčnost již po 10. pracím cyklu. Tyto vzorky mohly být zajímavé pro své další použití z důvodu nižší ekonomické náročnosti.

Všechny vytyčené body zadání diplomové práce byly splněny.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *What Are Smart Clothes?* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.lifewire.com/what-are-smart-clothes-4176103>
- [2] *Tale 2—A History of Smart Fabric* [online]. LOOMIA [cit. 2018-11-5]. Dostupné z: <https://medium.com/@LoomiaCo/tale-2-a-history-of-e-textiles-and-conductive-fabrics-dbe9c4a0cb03>
- [3] SCHNEEGASS, Stefan a Oliver AMFT. *Smart Textiles*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-50123-9.
- [4] *FLORA - Wearable electronic platform: Arduino-compatible - v3* [online]. [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <https://www.adafruit.com/product/659>
- [5] *Adafruit Holiday Gift Guide 2012 – Blinky* [online]. 19. 11. 2012 [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: <https://blog.adafruit.com/2012/11/19/adafruit-holiday-gift-guide-2012-blinky/>
- [6] ATWA, Yahya a Irene A. GOLDTHORPE. Metal-nanowire coated threads for conductive textiles. In: *14th IEEE International Conference on Nanotechnology* [online]. IEEE, 2014, 1. 12. 2014 [cit. 2018-12-02]. DOI: 10.1109/NANO.2014.6967994. ISBN 978-1-4799-5622-7. ISSN 1944-9399. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6967994>
- [7] E-Textiles For Wearability: Review Of Integration Technologies. *Textile World* [online]. 20. 4. 2012 [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <https://www.textileworld.com/textile-world/features/2010/04/e-textiles-for-wearability-review-of-integration-technologies/>
- [8] MAZIZ, Ali, Alessandro CONCAS, Alexandre KHALDI, Jonas STÅLHAND, Nils-Krister PERSSON a Edwin W. H. JAGER. Knitting and weaving artificial muscles. *Science Advances* [online]. 25. 1. 2017, 3(1) [cit. 2019-05-05]. DOI: 10.1126/sciadv.1600327. ISSN 2375-2548. Dostupné z: <https://advances.sciencemag.org/content/3/1/e1600327>
- [9] Smart Textiles of the Future. *NONWOVEN Technical Textiles Technology* [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <http://www.nonwoventechnology.com/en/smart-textiles-of-the-future/>
- [10] SHREVE, Kristine. An Introduction to Embroidery. *The Engravers Journal* [online]. 6. 2014, 39(12) [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.engraversjournal.com/article.php/3048/index.html>
- [11] HART, Jenny. How-To: Back Stitch. *Sublime Stitching* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://sublimestitching.com/pages/how-to-back-stitch>
- [12] INOUE, Masahiro, Yosuke ITABASHI a Yasunori TADA. Development of bimodal electrically conductive pastes with Ag micro- and nano-fillers for printing stretchable E-textile systems. In: *2015 European Microelectronics Packaging Conference (EMPC)* [online]. IEEE, 2016, 28. 1. 2016 [cit. 2019-01-20]. ISBN 978-0-9568-

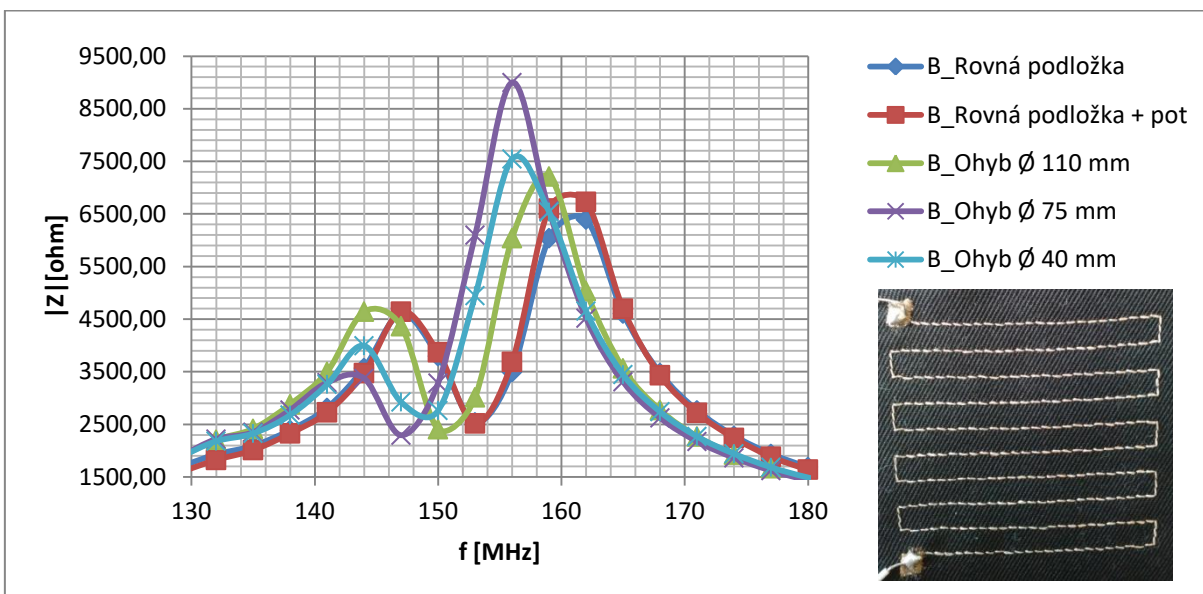


- 0862-2. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7390727>
- [13] MATSUHISA, Naoji, Martin KALTENBRUNNER, Tomoyuki YOKOTA, Hiroaki JINNO, Kazunori KURIBARA, Tsuyoshi SEKITANI a Takao SOMEYA. Printable elastic conductors with a high conductivity for electronic textile applications. *Nature Communications* [online]. 2015, 25. 6. 2015, 6(7461) [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/ncomms8461>
- [14] Making Smart Clothing Easier to Design, Manufacture, Wash and Wear. *DuPont* [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/products-and-services/electronic-electrical-materials/printed-electronics/products/stetchable-inks-for-wearable-electronics.html>
- [15] *DUPONT™ INTEXAR™ PE671* [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/electronic-and-electrical-materials/documents/prodlib/PE671.pdf>
- [16] *DUPONT™ PE873* [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/electronic-and-electrical-materials/documents/prodlib/PE873.pdf>
- [17] *DUPONT™ PE971* [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/electronic-and-electrical-materials/documents/prodlib/PE971.pdf>
- [18] *DUPONT™ PE773* [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/electronic-and-electrical-materials/documents/prodlib/PE773.pdf>
- [19] MONTI, Giuseppina, Laura CORCHIA a Luciano TARRICONE. Fabrication techniques for wearable antennas. In: *2013 European Microwave Conference* [online]. IEEE, 2013, 23. 12. 2013 [cit. 2018-12-18]. DOI: 10.23919/EuMC.2013.6687015. ISBN 978-2-87487-031-6. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6687015>
- [20] Řada 4711 Vodivá textilie. *Holland Shielding Systems BV* [online]. [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: <https://hollandshielding.cz/Vodivá-textilie>
- [21] CHO, Gilsoo, Keesam JEONG, Min Joo PAIK, Youngeun KWUN a Moonsoo SUNG. Performance Evaluation of Textile-Based Electrodes and Motion Sensors for Smart Clothing. *IEEE Sensors Journal* [online]. IEEE, 2011, 8. 9. 2011, 11(12), 3183 - 3193 [cit. 2018-11-25]. DOI: 10.1109/JSEN.2011.2167508. ISSN 1558-1748. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6015519>
- [22] MASSICART, Alexandre, Maxime GUIBERT, Jeremie TORRES, Xiaochen CHEN, Han HE, Leena UKKONEN a Johanna VIRKKI. Fabrication and moisture reliability of painted and electro-textile tags for wearable RFID applications. In: *2017 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)* [online]. IEEE, 2018, 8. 1. 2018 [cit. 2018-11-27]. DOI: 10.1109/IMWS-AMP.2017.8247425. ISBN 978-1-5386-0480-9. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8247425>

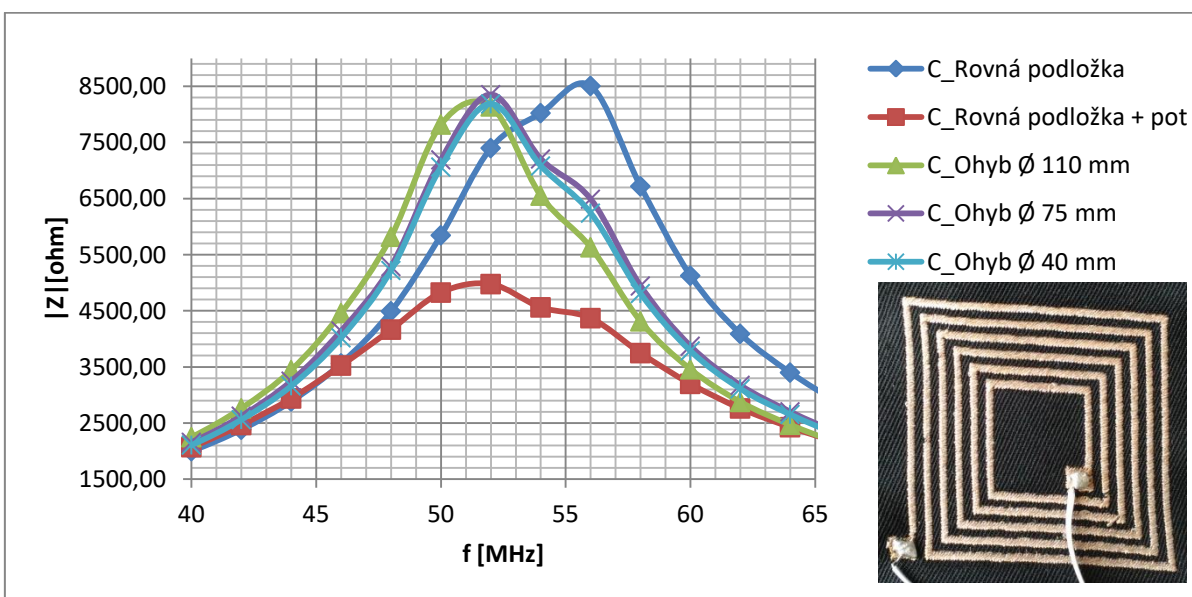
- [23] GUIBERT, Maxime, Alexandre MASSICART, Xiaochen CHEN, Han HE, Jeremie TORRES, Leena UKKONEN a Johanna VIRKKI. Washing reliability of painted, embroidered, and electro-textile wearable RFID tags. In: *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)* [online]. IEEE, 2018, 19. 2. 2018 [cit. 2018-11-27]. DOI: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293249. ISBN 978-1-5386-1211-8. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8293249>
- [24] TOIVONEN, Mikko, Toni BJÖRNINEN, Lauri SYDÄNHEIMO, Leena UKKONEN a Yahya RAHMAT-SAMII. Impact of Moisture and Washing on the Performance of Embroidered UHF RFID Tags. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* [online]. IEEE, 2013, 28. 11. 2013, **12**, 1590 - 1593 [cit. 2018-11-28]. DOI: 10.1109/LAWP.2013.2293334. ISSN 1548-5757. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6677514>
- [25] FU, Yan Yan, Yuk Lam CHAN, Ming Hao YANG, Yan-Cheong CHAN, Johanna VIRKKI, Toni BJÖRNINEN, Lauri SYDÄNHEIMO a Leena UKKONEN. Experimental Study on the Washing Durability of Electro-Textile UHF RFID Tags. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* [online]. IEEE, 2014, 7. 11. 2014, **14**, 466 - 469 [cit. 2018-11-29]. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2368212. ISSN 1548-5757. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6949620>
- [26] CHEN, X., H. HE, Y. LU, H. LAM, L. UKKONEN a J. VIRKKI. Fabrication and reliability evaluation of passive UHF RFID t-shirts. In: *2018 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)* [online]. IEEE, 2018, 11. 6. 2018 [cit. 2018-11-30]. DOI: 10.1109/IWAT.2018.8379146. ISBN 978-1-5386-1851-6. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8379146>
- [27] MYNÁŘOVÁ, Věra a Jiří ČENGERY. *Elektronické součástky: cvičení*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001. ISBN 80-708-2778-5.
- [28] BLECHA, Tomáš. *Pasivní součástky*, Dostupné z: *1. přednáška z předmětu KET/ Fyzikální elektronika (FE)*, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015
- [29] KOVÁŘÍK, Martin. *Vyšívané pasivní elektronické součástky* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/32465/1/DP\\_Kovarik\\_Martin\\_E14N0017P.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/32465/1/DP_Kovarik_Martin_E14N0017P.pdf). Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [30] HOFFMANN, Karel. *Planární mikrovlnné obvody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-010-2115-7.
- [31] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [32] *INTERNATIONAL STANDARD ISO 6330 Textiles — Domestic washing and drying procedures for textile testing*. Švýcarsko: ISO 2012, 2012.

## Přílohy

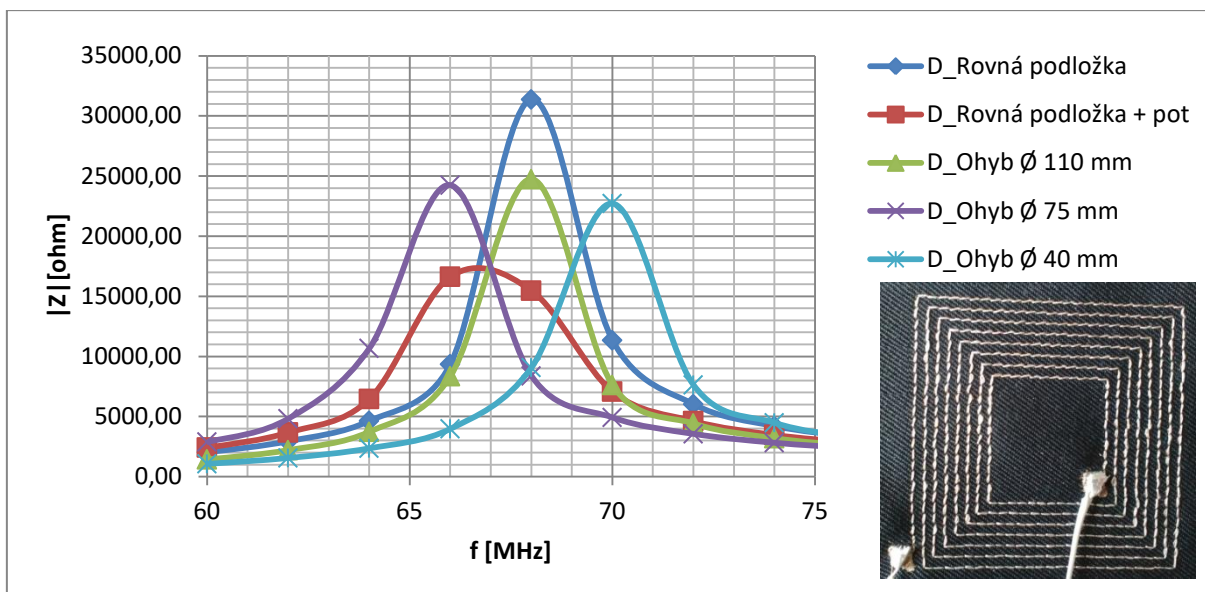
### Příloha I – Výsledné rezonanční charakteristiky při měření ohybu a měření vlivu navlhčení potem



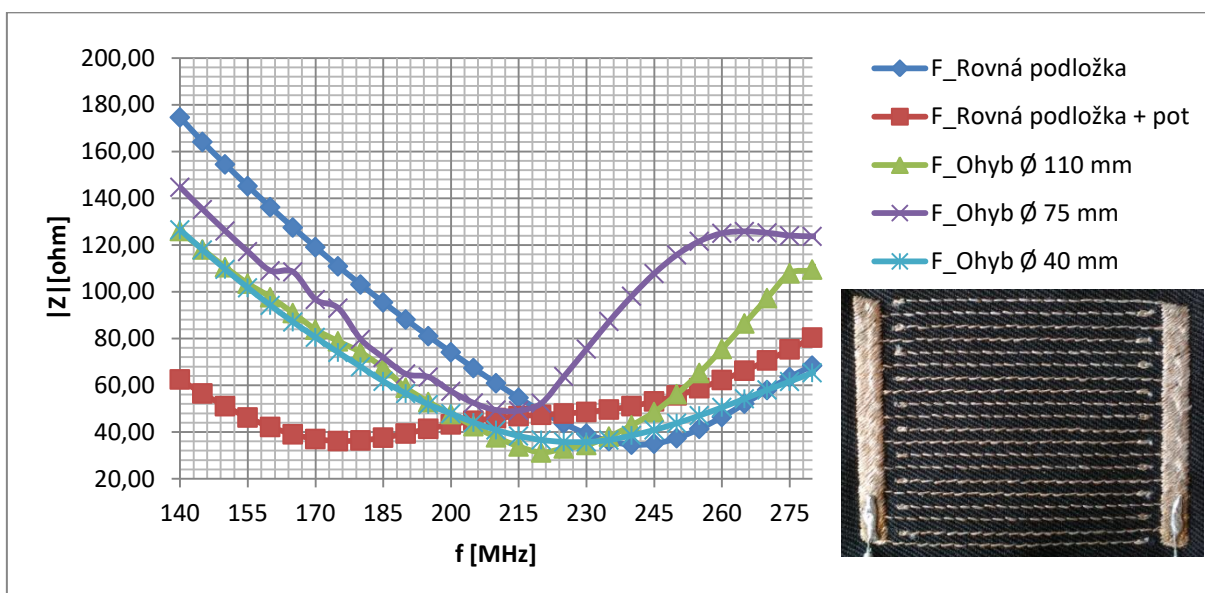
Obr. I.1 Výsledné průběhy z měření na meandrové cívce – vzorek B.



Obr. I.2 Výsledné průběhy z měření na spirálové cívce – vzorek C.



Obr. 1.3 Výsledné průběhy z měření na spirálové cívce – vzorek D.



Obr. 1.4 Výsledné průběhy z měření na interdigitálním kondenzátoru – vzorek F.

## Příloha II – Tabulky a výsledné průběhy základních parametrů při měření vlivu údržby

Tab. II.1 Hodnoty elektrického odporu  $R$  [ $\Omega$ ] pro všechny zkoumané vzorky typu D pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 20. pracím cyklu.

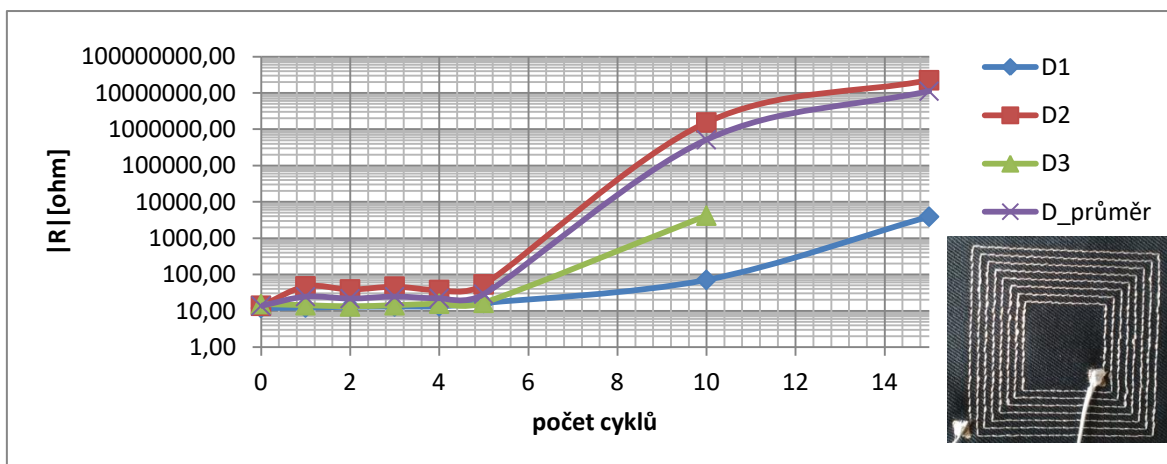
Počet cyklů	0	1	2	3	4	5	10	15	20
D1	12,01	12,36	13,01	13,20	13,40	16,50	71,40	3920,00	-
D2	13,84	47,25	38,91	46,55	37,60	53,60	1540000,00	22400000,00	-
D3	15,34	14,30	13,27	14,30	15,80	16,70	4190,00	-	-
D_průměr	13,73	24,64	21,73	24,68	22,27	28,93	514753,80	11201960,00	-

Tab. II.2 Hodnoty sériové indukčnosti  $L_s$  [ $\mu H$ ] pro všechny zkoumané vzorky typu C pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 20. pracím cyklu.

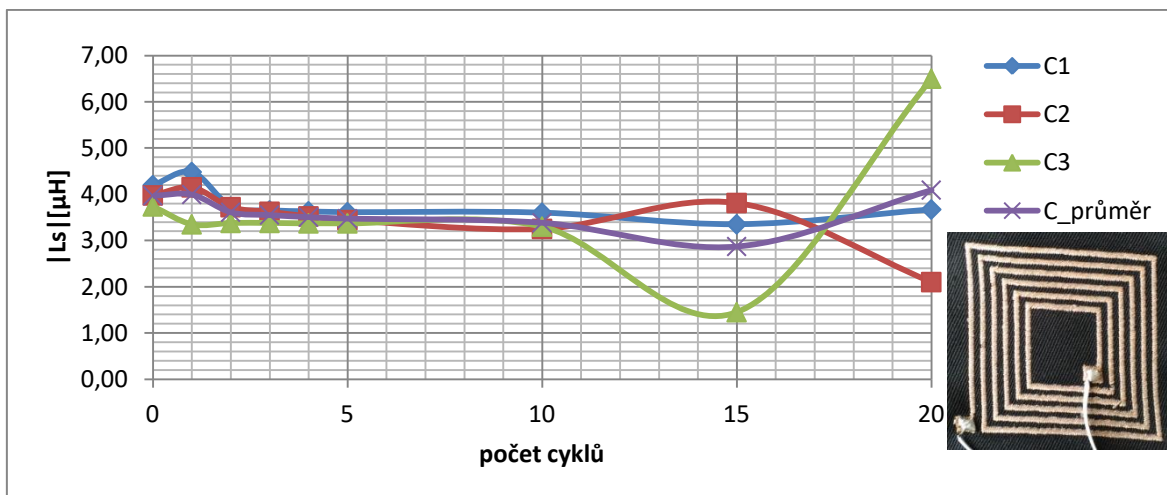
Počet cyklů	0	1	2	3	4	5	10	15	20
C1	4,20	4,48	3,73	3,65	3,63	3,61	3,60	3,35	3,67
C2	3,97	4,15	3,72	3,62	3,52	3,44	3,25	3,81	2,10
C3	3,74	3,35	3,38	3,38	3,37	3,37	3,30	1,45	6,50
C_průměr	3,97	3,99	3,61	3,55	3,51	3,47	3,38	2,87	4,09

Tab. II.3 Hodnoty sériové indukčnosti  $L_s$  [ $\mu H$ ] pro všechny zkoumané vzorky typu D pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 20. pracím cyklu.

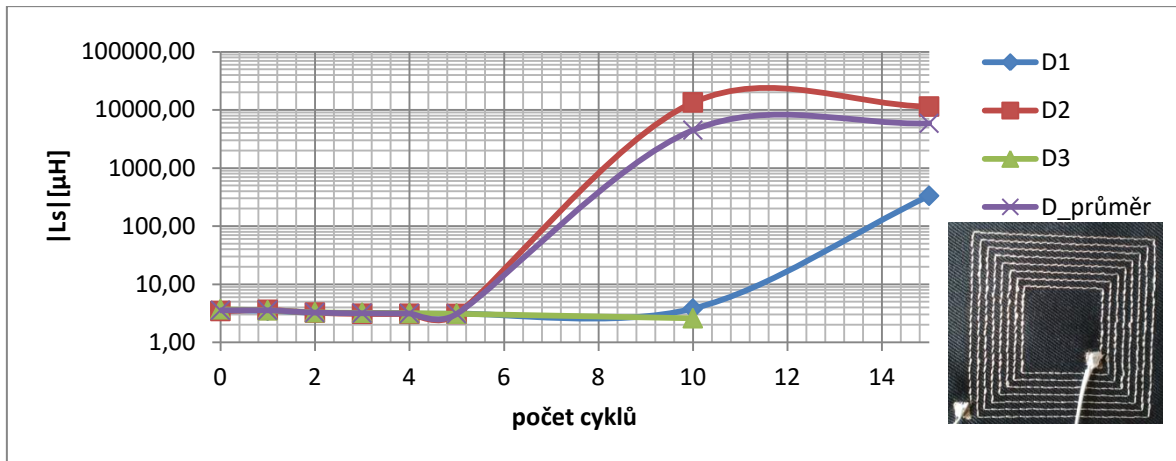
Počet cyklů	0	1	2	3	4	5	10	15	20
D1	3,49	3,49	3,21	3,17	3,13	3,11	3,80	332,60	-
D2	3,46	3,62	3,25	3,10	3,10	3,08	13450,00	11420,00	-
D3	3,71	3,56	3,29	3,24	3,18	3,11	2,60	-	-
D_průměr	3,56	3,56	3,25	3,17	3,14	3,10	4485,47	5876,30	-



Obr. II.1 Průběh elektrického odporu  $R$  [ $\Omega$ ] na spirálové cívce – vzorek D pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 15. pracím cyklu, kdy bylo naposledy možné nalézt měřitelnou hodnotu.

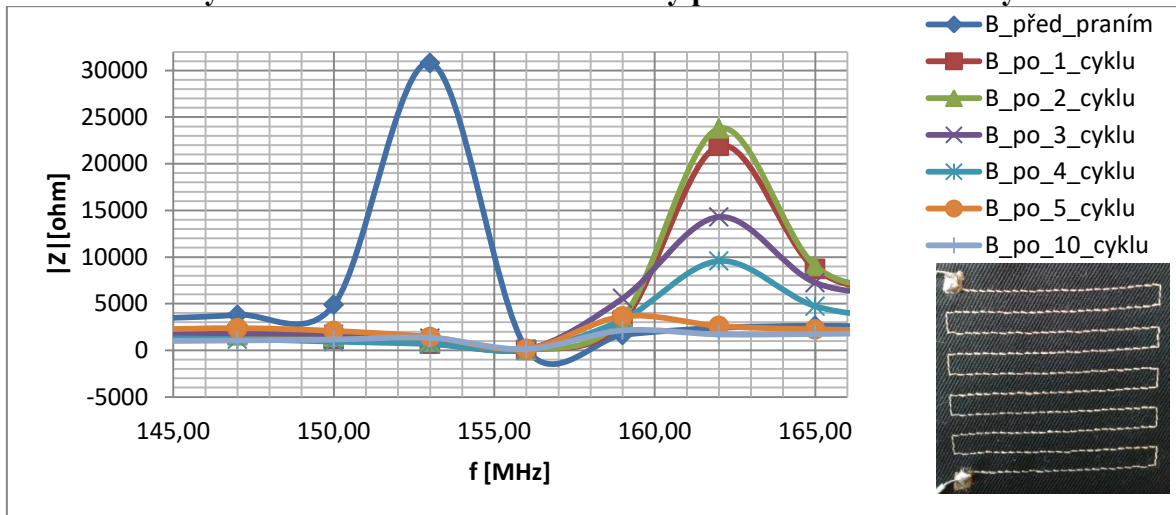


Obr. II.2 Průběh indukčnosti  $L_s$  [ $\mu H$ ] na spirálové cívce – vzorek C pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 20. pracím cyklu.

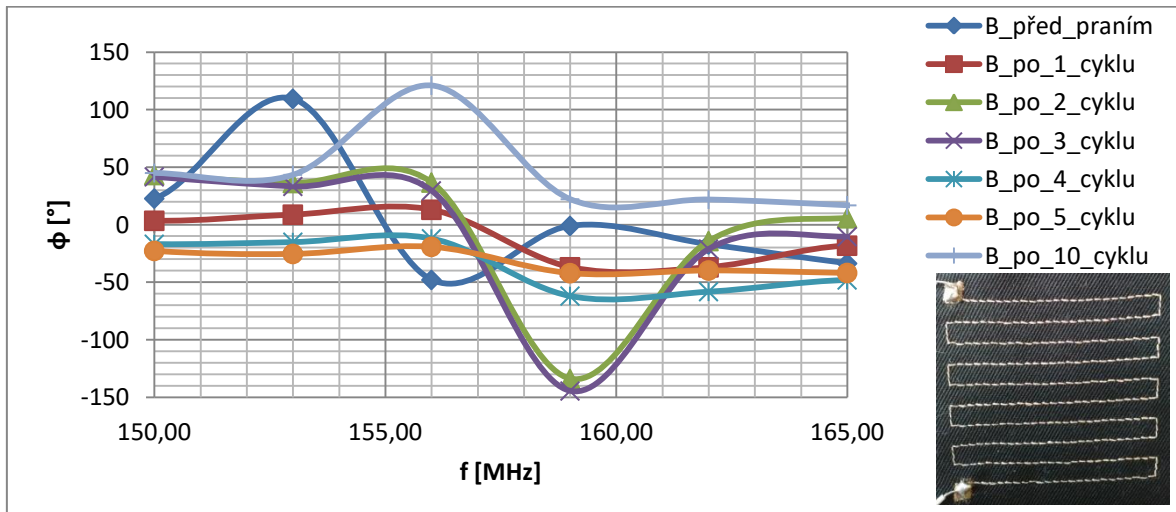


Obr. II.3 Průběh indukčnosti  $L_s$  [ $\mu\text{H}$ ] na spirálové cívce – vzorek D pro měření před 1. pracím cyklem až po měření po 15. pracím cyklu, kdy bylo naposledy možné nalézt měřitelnou hodnotu.

**Příloha III – Výsledné rezonanční charakteristiky při měření vlivu údržby**

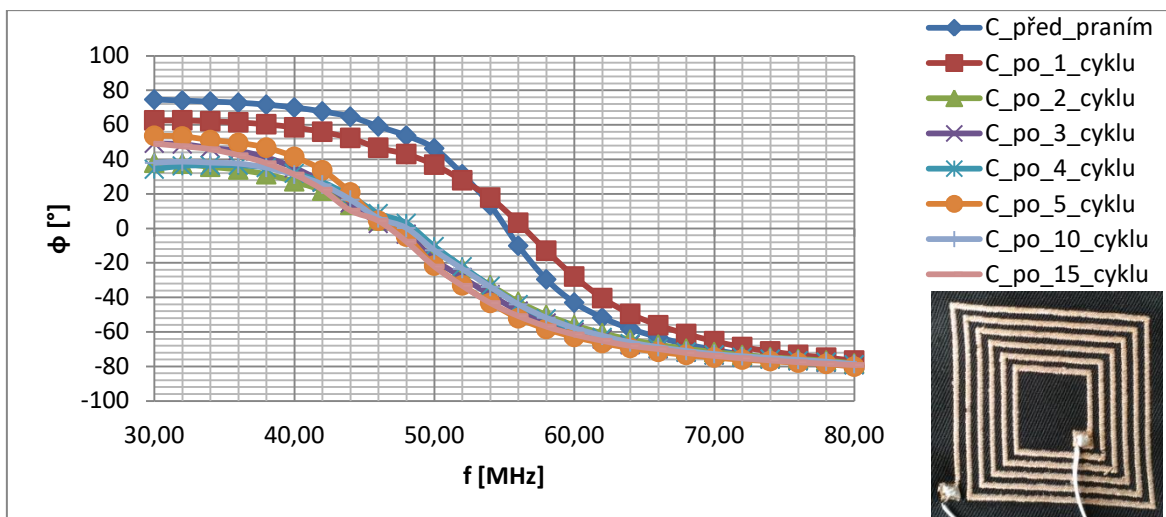


Obr. III.1 Výsledné rezonanční charakteristiky na meandrové cívce – vzorek B.

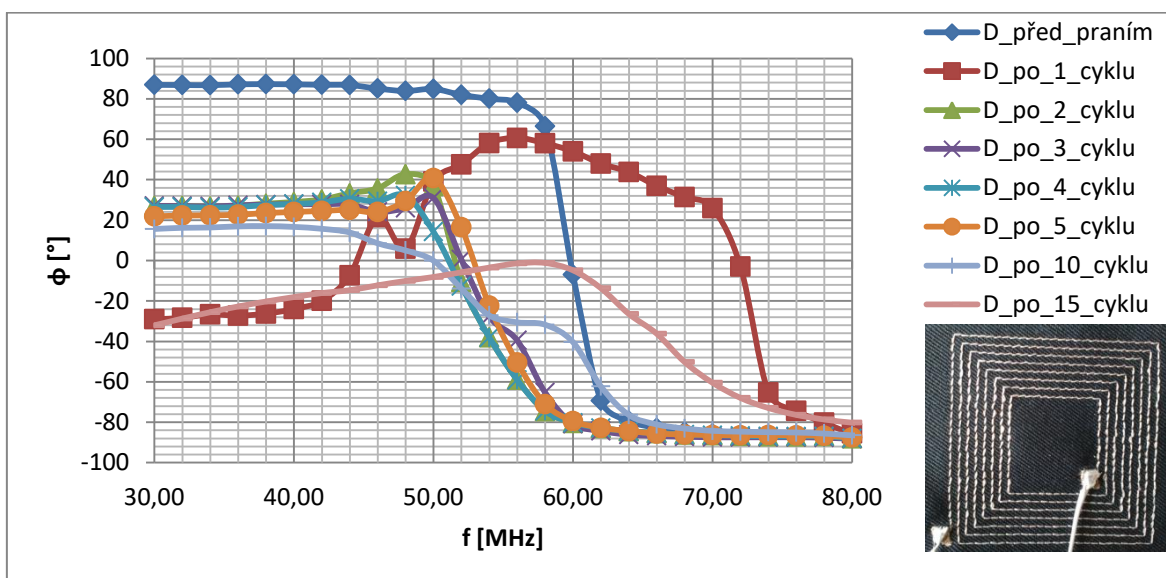


Obr. III.2 Výsledné průběhy fázového posuvu na meandrové cívce – vzorek B.





Obr. III.3 Výsledné průběhy fázového posuvu na spirálové cívce – vzorek C.



Obr. III.4 Výsledné průběhy fázového posuvu na spirálové cívce – vzorek D.