

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vyšívané pasivní elektronické součástky**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2016/2017

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin KOVÁŘÍK**  
Osobní číslo: **E14N0017P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Vyšívání pasivní elektronické součástky**  
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 vyšívání pasivních elektronických součástek na textilních substrátech.
3. Navrhněte postup a způsob testování vyšívání elektronických součástek.
4. Proměřte elektrické parametry vyšívání elektronických součástek.
5. Proveďte vyhodnocení naměřených údajů a porovnání s teoretickými výpočty.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

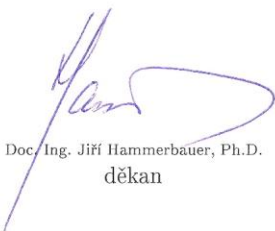
Seznam odborné literatury:

1. Mattila, H.R.: Intelligent textiles and clothing
2. Hoffmann K.: Planární mikrovlnné obvody
3. Internetové zdroje

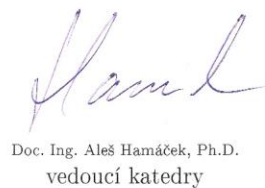
Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Tomáš Blecha, Ph.D.  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 19. května 2017



Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



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

V Plzni dne 14. října 2016

## **Abstrakt**

Předkládaná práce je zaměřena na problematiku vyšívání pasivních elektronických součástek. Je zde uveden přehled technologií pro tvorbu vodivých motivů na textilních substrátech. Nejdůležitější částí práce je návrh, realizace a charakterizace testovacích vzorků vyšitých pasivních elektronických součástek na textilním substrátu pomocí vodivých nití. Naměřené elektrické parametry těchto realizovaných vzorků jsou porovnány s teoretickými výpočty a s testovacími vzorky realizovanými na deskách plošných spojů pomocí fotolitografie.

## **Klíčová slova**

Elektricky vodivé textilie, chytré textilie, textilní substráty, elektricky vodivá vlákna, pasivní součástky, rezistor, induktor, kapacitor, planární technologie, vyšívání, testování, měření

## **Abstract**

The diploma thesis is focused on the issue of the embroidered passive electronic components. Here is an overview of technologies, which are used for creating the conductive designs on the textile substrates. The most important part of the thesis is the realization of the test samples for embroidered passive electronic components on textile substrates. The measured electrical parameters of these samples are compared with the theoretical calculations, and also with the another samples which are made on the printed circuit boards by means of photolithography.

## **Key words**

Electrically conductive textiles, smart textiles, textile substrates, electrically conductive fibers, passive components, resistor, inductor, capacitor, planar technology, embroidering, testing, measuring

## Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 16.5.2017

Bc. Martin Kovářík

## **Poděkování**

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

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 TVORBA ELEKTRICKY VODIVÝCH MOTIVŮ NA TEXTILNÍCH SUBSTRÁTECH</b> .....	<b>11</b>
1.1 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY .....	12
1.1.1 Elektricky vodivá vlákna a vrstvy .....	12
1.1.2 Nevodivá vlákna .....	13
1.2 METODY VYTVÁŘENÍ VODIVÝCH MOTIVŮ .....	14
1.2.1 Vyšívání .....	14
1.2.2 Tkání a pletení .....	16
1.2.3 Nanášení vodivých vrstev na substrát.....	17
<b>2 NÁVRH A REALIZACE TESTOVACÍCH VZORKŮ</b> .....	<b>20</b>
2.1 VÝROBA TESTOVACÍCH VZORKŮ .....	21
2.1.1 Vyšité vzorky .....	21
2.1.2 Vzorky na DPS.....	22
2.2 REALIZOVANÉ TESTOVACÍ VZORKY .....	22
2.2.1 Rezistor .....	23
2.2.2 Meandrový induktor .....	24
2.2.3 Induktor čtvercová spirála.....	27
2.2.4 Interdigitální kapacitor.....	31
<b>3 MĚŘENÍ VYŠITÝCH PASIVNÍCH ELEKTRONICKÝCH SOUČÁSTEK</b> .....	<b>36</b>
3.1 MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ .....	36
3.1.1 Postup měření.....	36
3.1.2 Naměřené hodnoty.....	37
3.1.3 Vyhodnocení naměřených výsledků .....	39
3.2 MĚŘENÍ FREKVENČNÍCH CHARAKTERISTIK .....	40
3.2.1 Postup měření.....	41
3.2.2 Vyhodnocení naměřených výsledků .....	43
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>51</b>
<b>SEZNAM LITERATURY</b> .....	<b>53</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratk

CAD.....	Caomputer-Aided Design
DPS.....	Deska Plošného Spoje
$R$ .....	Elektrický odpor [ $\Omega$ ]
$Z$ .....	Impedance [ $\Omega$ ]
$L$ .....	Indukčnost [ $H$ ]
$L_s$ .....	Sériová indukčnost [ $F$ ]
$C$ .....	Kapacita [ $F$ ]
$C_s$ .....	Sériová kapacita [ $F$ ]
$C_p$ .....	Paralelní kapacita [ $F$ ]
$Q$ .....	Činitel kvality [–]
$D, tg\delta$ .....	Ztrátový činitel [–]
$\emptyset$ .....	Fázový posuv [ $^\circ$ ]
$f$ .....	Frekvence [ $Hz$ ]
$\omega$ .....	Úhlová frekvence [ $rad \cdot s^{-1}$ ]
$\sigma$ .....	Konduktivita (měrná elektrická vodivost) [ $S \cdot m^{-1}$ ]
$\rho$ .....	Rezistivita (měrný elektrický odpor) [ $\Omega \cdot m$ ]
$\varepsilon_r$ .....	Relativní permitivita [–]
$\varepsilon_0$ .....	Permitivita vakua [ $F \cdot m^{-1}$ ]
$p$ .....	Tlak [ $Torr$ ]

## Úvod

Hlavním cílem této práce je navrhnout, realizovat a otestovat vyšívání pasivní elektronické součástky na textilních substrátech. Vyšívání vodivé textilie jsou nová a rychle se rozvíjející technologie, jejímž výzkumem se na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni zabývá řada projektů. Pasivní elektronické prvky mohou být využity jako základní prvky elektronických systémů pro chytré textilie, pasivní frekvenční filtry, pro impedanční přizpůsobení vyšívání antén, nebo pro jiné různé nositelné technologie a aplikace. Z tohoto důvodu je pro výše zmíněné projekty velice důležité otestovat a charakterizovat chování takto vyrobených elektronických pasivních prvků.

První část diplomové práce je zaměřena na popis současných metod a technik užívaných k tvorbě vodivých motivů na textilních substrátech. Mezi tyto metody patří vyšívání, tkaní, pletení a dodatečné nanášení vodivých vrstev na textilní substráty. V této části jsou také uvedeny materiály využívané při tvorbě vodivých motivů na textilních substrátech.

Druhá část se zabývá již samotným návrhem a realizací testovacích vzorků vyšívání elektronických pasivních součástek. V diplomové práci jsou za pomoci návrhů pro planární technologii realizovány vyšíté testovací vzorky rezistorů, meandrových induktorů, spirálních čtvercových induktorů a interdigitálních kapacitorů o různé geometrické složitosti, z nichž vzorky nejsložitější geometrické struktury jsou navíc realizovány tak, aby jejich struktura byla tvořena jen jedním vodivým vláknem. Všechny takto navržené vzorky jsou navíc ještě pro porovnání realizovány pomocí běžné metody fotolitografie na deskách plošných spojů.

Ve třetí části jsou proměřeny elektrické parametry a rezonanční charakteristiky realizovaných testovacích vzorků. Naměřené výsledky testovacích vzorků vyšívání elektronických pasivních součástek jsou vyhodnoceny a porovnány s výpočty pro planární technologii a se vzorky vytvořenými na deskách plošných spojů.

# 1 Tvorba elektricky vodivých motivů na textilních substrátech

Konvenční desky plošných spojů jsou mnohvrstvé struktury, které mají vodivý vzor nanesen přímo na izolační substrát. Desky plošných spojů jsou většinou vyrobeny z mědi potažených vrstvených organických materiálů, jako jsou epoxidové nebo fenolové pryskyřice vyztužené sklem. Vodivé motivy na těchto mědi potažených laminátech jsou tvořeny pomocí fotolitografie nebo elektronové litografie. Běžně používané desky plošných spojů nejsou ale od určitého bodu pružné. V mnoha aplikacích, jako jsou například příruční elektronická zařízení a počítače, je ovšem potřebné mít vodivý obvod, který může být ohnutý nebo může být snadno opakovaně ohýbán. Pro vytvoření flexibilních vodivých motivů se provádí tisk vodivých vzorů na polymerní substráty, jako jsou například filmy. Textilně založené vodivé motivy mohou nabídnout další řadu výhod, jako je větší pružnost ohybu, vyšší odolnost vůči natržení a také větší odolnost proti opotřebení opakovaným namáháním. Je potřeba zmínit, že textilní obvody mohou být použité kdekoli v běžném životě a umožňovat tak funkci velké řadě užitečných aplikací od integrace elektronických prvků do běžně nositelných textilií, až po nenositelné textilie, jako jsou látky pro automobilový interiér, textilie pro obalové materiály, koberce nebo lékařské textilie. Ve výsledku může být oblast použití textilních vodivých motivů ještě mnohem větší. V současné době je prováděn v oblasti vodivých textilií rozsáhlý výzkum snažící se vyvinout elektricky vodivé motivy na textilních substrátech s co nejvyšší úrovní flexibility, mechanické i chemické odolnosti a zároveň s co nejmenšími výrobními náklady. [1] [8]



Obr. 1.1 Elektrický obvod vyšitý do textilního substrátu

K vytvoření elektricky vodivých motivů na textilních substrátech se využívá několik druhů technik, které zahrnují vyšívání elektrických vláken do textilních substrátů, tkaní a pletení vodivých vláken spolu s nevodivými vlákny a chemické nanášení vodivých vrstev přímo na textilní substrát.

## 1.1 Používané materiály

V závislosti na druhu techniky vytváření elektricky vodivého motivu na textilní struktuře, jsou používány různé druhy vodivých a nevodivých materiálů. Tyto materiály zahrnují vodivá vlákna a příze, materiály k tváření tenkých vodivých vrstev nebo organické a anorganické vodivé materiály na povrchu textilních substrátů.

### 1.1.1 Elektricky vodivá vlákna a vrstvy

Obecně používané materiály k vytváření vodivých motivů na textilních substrátech jsou kovové příze, příze vyrobené z vodivých polymerů, polymerní vlákna obsahující velké množství vodivých částic (uhlík, stříbro, mosaz atd.) a vodivé tenké anorganické vrstvy. Základní charakteristické vlastnosti vodivých vláken jsou vodivost, jemnost (průměr), zaplnění (porozita), povrch (chlupatost) a pevnost v tahu. Vnitřně vodivé polymery jako polyanilin, polypyrrol, polyacetylen, polythiofen, poly(p-fenylen), poly(p-fenylen vinylen) a poly(para-fenylen) jsou některé z materiálů, které byly zkoumány pro vytváření vodivých vláken pro vyšívání nebo tkaní vodivých motivů. Vodivost většiny z těchto polymerů je tvořena překryvem orbitalů hliníku a přítomností střídavé jednoduché a dvojité vazby v polymerním řetězci. Přirozeně vodivé polymery jsou dopovány pro dosažení vyšší vodivosti. Elektrická vodivost vnitřně vodivých polymerů se pohybuje od typických izolátorů (do  $10^{-10}$  S/cm) k běžným polovodičům jako je křemík (přibližně  $10^{-5}$  S/cm). Úroveň vodivosti dopovaných vodivých polymerů je mnohem vyšší. Jódem dopovaný acetylen dosahuje vodivosti přibližně  $10^5$  S/cm, to je hodnota velmi blízká kovům. Vodivost těchto vodivých polymerů se zvyšuje dopováním směsí typu P (akceptory) nebo N (donory). [1] [7]

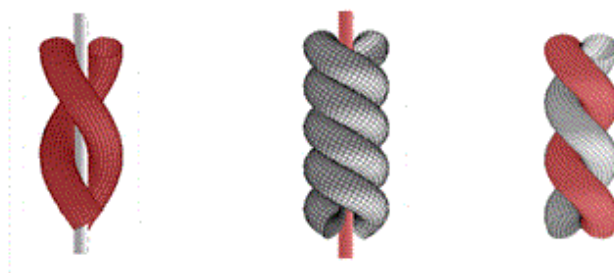
Vodivé polymerní vrstvy mohou být nanášeny na tkané, pletené nebo netkané textilní povrchy a následně vzorované pomocí fotolitografie a chemického leptání. Některé z používaných materiálů pro tyto vodivé vrstvy jsou polyanilin, polypyrrol, polyacetylen a polythiophen. V některých výzkumech nanášejí polymerní vrstvy na textilní substráty tak, že nejprve impregnují substrát monomery, aby dosáhly požadovaných vlastností tkaniny a až následně provádějí polymeraci. [1]

### 1.1.1.1 Přírodně vodivá vlákna

Tyto přírodně vodivé příze mají stejné geometrické uspořádání jednotlivých vláken jako textilní nevodivé příze, ale jsou vyrobeny jen z přírodně vodivých materiálů, jako jsou například kovy, kovové slitiny, zdroje uhlíku a konjugované polymery. Tyto příze mají vysokou hodnotu vodivosti, ale mají vyšší hmotnost a jsou méně flexibilní a pružné než textilně založená vodivá vlákna. [4]

### 1.1.1.2 Textilní vodivá vlákna

Tato vlákna mohou být vyrobeny kombinací dvou nebo více vodivých i nevodivých materiálů. Vodivé příze mohou být tvořeny různými strukturami, jako jsou například nevodivá textilní vlákna spředená s vlákny kovovými, tenké vodivé vlákno pokryté textilními nevodivými vlákny nebo příze, která není tvořena strukturou jádro-plášť, ale vodivé vlákno je upředeno přímo do struktury příze. Na obrázku *Obr. 1.2* jsou ukázány tyto struktury ve zmiňovaném pořadí. Dalším druhem jsou vodivé příze vytvořené přidáním vodivých plniv, jako jsou kovový prášek, saze, uhlíkové nanotrubičky nebo konjugované polymery k nevodivým polymerům jako je polypropylen, polystyren nebo polyethylen. K výrobě se obvykle používá technika zvlákňování z taveniny nebo rozpouštění. Základní materiály musí být před spřádacím procesem dobře smíchány, aby se dosáhlo homogenního rozvrstvení vodivých částic v polymerech. Textilní vodivá vlákna jsou charakteristická vysokou flexibilitou, pružností a životností. U vodivých textilních vláken je důležitý poměr podílu vodivých a nevodivých složek, aby vlákna zaručovala vysokou flexibilitu, životnost a zároveň aby vlákna splňovala požadavky na dobrou elektrickou vodivost. [4]



*Obr. 1.2* Struktury elektricky vodivých přízí [6]

### 1.1.2 Nevodivá vlákna

Některé materiály používané při výrobě vodivých motivů na textilních substrátech (nylon, polyesterová nebo akrylová vlákna, příze nebo tkaniny) jsou nevodivé. Tato nevodivá vlákna

slouží k oddělení (izolaci) vodivých vláken a zamezení zkratu mezi nimi. Existují i vysoce teplotně odolné izolační materiály jako například Nomex. Tyto materiály jsou vhodné k vytvoření elektricky i tepelně izolačního materiálu pro vlákna vedoucí signál, která se vlivem průtoku vysokého proudu mohou zahřívat. Nomexová vlákna mohou být použita při výrobě vodivého substrátu tkaním nomexové příze podél ocelových vláken. Hlavní faktory při výběru nevodivého vlákna jsou snadné zpracování, požadavky na teplotu a hlavně požadavky na primární funkci substrátu. V závislosti na aplikaci může primární funkcí substrátu být například ochrana nebo komfort. [1]

## 1.2 Metody vytváření vodivých motivů

### 1.2.1 Vyšívání

Vyšívání je tradiční způsob vytváření obvykle dekorativních motivů, ve kterém se pomocí nitě vyšívá vzor přímo do textilního substrátu. Elektricky vodivé motivy mohou být vyšity ručně nebo pomocí numericky řízeného stroje do izolačního substrátu. Izolační substrát může být tkaný, netkaný nebo pletený. Velkou výhodou této techniky vytváření vodivých textilních motivů je, že vodivé vlákno může být do textilie vyšité v libovolném tvaru bez ohledu na cestu příze v textilním substrátu. Další výhodou je, že není potřeba provádět mnoho úprav šicího stroje před vyšitím vodivého vzoru do textilního substrátu. V porovnání s tvorbou elektrického obvodu pomocí tkaní popsaného v kapitole 1.2.2, kde musí být vodivá vlákna ve směru osnov umístěna na vhodných pozicích. Strojové šití je ale proces, ve kterém dochází k velkému mechanickému namáhání textilií. Při vyšívání vodivých přízí do textilního substrátu prochází vlákna různými úrovněmi namáhání a tření. To klade vysoké nároky na pevnost a pružnost příze, která prochází klikatou cestou a velkým množstvím záhybů tak, aby byl vytvořen vyrovnaný a pevný steh. Další nevýhodou této technologie je, že neumožňuje vytvoření vícevrstvých obvodů z vodivých vláken vedených napříč různými vrstvami, jako v případě tkaných obvodů. Návrhem a realizací vzorků pro testování vyrobených metodou šití se zabývá kapitola 2. [1]

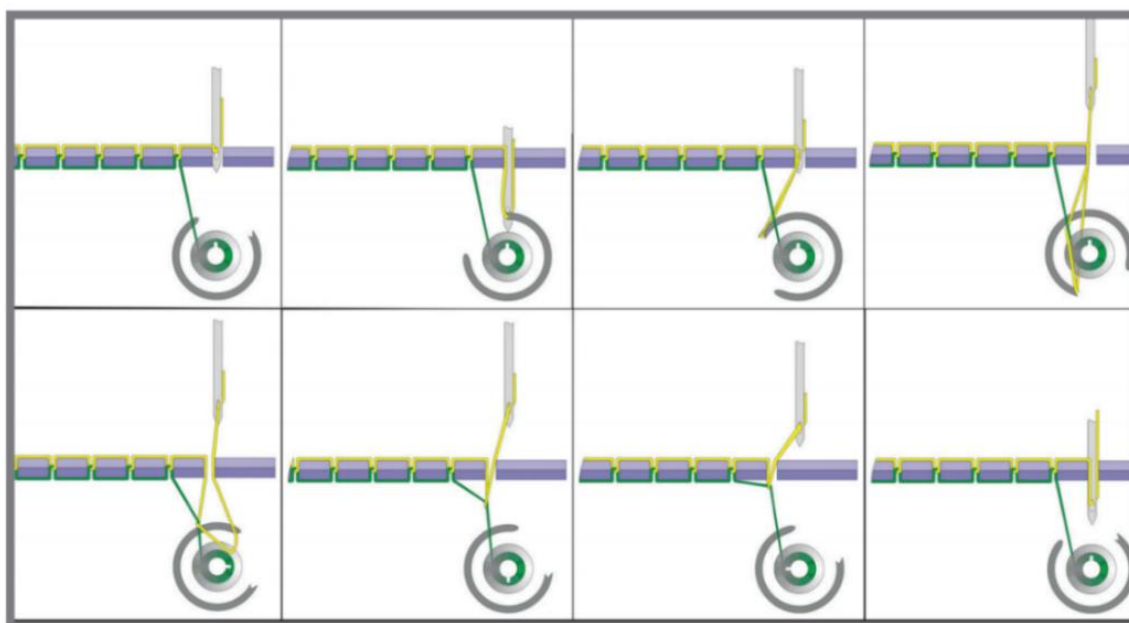
Další technikou, kde se také můžeme setkat s pojmem šití je metoda takzvaného obšívání. Obšívání je technika, kde je vodič k textilnímu substrátu jen přiložen a přišit pomocí nevodivých nití. Při tomto procesu výroby nedochází k tak velkému namáhání vodivých vláken jako u vyšívání, ale takto vyrobené elektricky vodivé motivy však nedosahují takových možností integrace.



Obr. 1.3 Detail vyšitého motivu pomocí vodivé příze s mosaznými drátky

### Princip šicího stroje

Na obrázku *Obr. 1.4* je vidět princip šicího stroje, který využívá vázaný steh s dvojí nití. Jehla provlékne vodivou přízi (znázorněna žlutě) skrze textilní tkaninu a při opačném pohybu vytvoří na přízi očko, které zachytí rotační chapač. Chapač převine vodivou přízi přes podkladovou niť (znázorněna zeleně) a poté napínací mechanismus utáhne steh tak, aby byly nitě překříženy co nejbližě středu tloušťky látky. Nitě jsou odvíjeny z malých cívek, protahovány okem jehly a proplétány chapačem ve vysoké rychlosti. Je patrné, že při tomto procesu dochází k velkému namáhání nití v tahu i stříhu. Pro běžné nitě tento princip nepředstavuje problém, ale u vodivé příze může dojít k přerušení vodivých drátků, což se může projevit zvýšenou rezistivitou, sníženou vodivostí, nebo přímo přerušením vytvořeného obvodu. [11]



Obr. 1.4 Princip šicího stroje [10]

## 1.2.2 Tkaní a pletení

Pro vytvoření vodivého obvodu mohou být vodivá vlákna vetkána nebo vpletena přímo do struktury textilního substrátu podél nevodivých vláken.

Proces tkaní je tvořen pomocí dvou sad navzájem kolmých nití (osnov), které jsou navzájem protkány a tvoří takzvané útkové vazné body. V procesu tkaní jsou osnovy ležící v podélném směru tkaniny odděleny do dvou vrstev, které vytváří ortogonálně prokládanou cestu, kterou je možné prokládat druhou sadou nití, takzvanými úteky. Tkaní elektrických obvodů může být prováděno na běžných tkacích strojích za předpokladu, že jsou na nich provedeny potřebné úpravy pro tkaní vodivých vláken. Jedna z modifikací může mít vysoký stupeň kontroly při umístování vodivých elementů v těchto obvodech použitím žakárového systému tkaní. Žakárový systém tkaní umožňuje řešit každou osnovu vlákna individuálně a tím zpřesnit kontrolu pořadí proplétání vláken. Další modifikace umožňuje vytvořit tkaný elektrický vzor na základě návrhu elektrického obvodu, který je nahrán do řídicí jednotky žakárového tkacího stroje. To umožňuje vytvořit složité vzory do textilie automatizovaným způsobem. Jedním z omezení techniky tkaní je, že vodivá vlákna musí být umístěná na předem určených pevně daných místech během nastavování stroje. Různé druhy vodivých vláken mohou být dodávány v útku nebo plnicím směru. Ty jsou poté vkládány pomocí útkových vazných bodů zajištěných tkacím strojem. V případě, tužších vodivých vláken, může být zapotřebí také modifikovat dodávací systém samotného vlákna. Nevýhodou vytváření vodivých motivů metodou tkaní a pletení oproti technice šití je právě omezenost geometrie vodivého motivu, kvůli nutnosti pevné pozice vláken ve tkanině. Výhodou je naopak menší namáhání vodivých vláken během výroby, vyšší flexibilita, prodyšnost a nízká hmotnost. [1]



Obr. 1.5 Vetkané elektricky vodivé příze [5]



Při procesu pletení se využívá plochých nebo okrouhlých útkových pletacích strojů, pomocí kterých mohou být vodivé nitě vpleteny pouze v jednom směru. Výhoda pletených elektricky vodivých textilních obvodů spočívá ve vyšší flexibilitě a roztažitelnosti pleteniny.



Obr. 1.6 Vpletené elektricky vodivé příze [5]

### 1.2.3 Nanášení vodivých vrstev na substrát

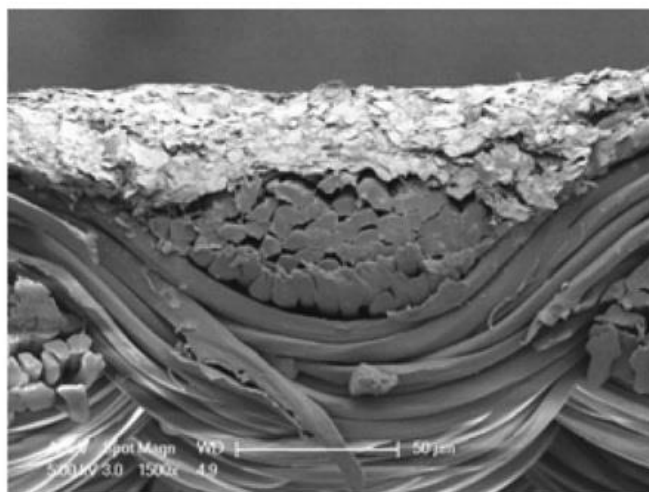
Tento proces tvorby vodivých motivů spočívá v dodatečném nanesení polymerních i nepolymerních vodivých materiálů na textilní substrát. Takto navrstvené materiály mohou být vzorovány pomocí fotolitografie a následným leptáním, zeslabením nebo fyzickým odstraněním těchto vodivých materiálů v určitých oblastech. To znamená, že vodivý materiál, který zůstane neodstraněn, vytváří vzorovaný elektrický motiv nebo oblast s vyšší vodivostí. Největším problémem spojeným s fotolitografickým vzorováním je právě v použití leptacího prostředku pro vytvoření vzoru vodivého motivu. Dochází totiž k nerovnoměrnému leptání, protože část leptací kapaliny je absorbována vlákny textilního substrátu. Vodivé motivy je také možné vytvářet na textilní substráty pomocí sítotisku (tlustovrstvé technologie) nebo pomocí naprašování (tenkovrstvá technologie). Hlavní nevýhodou nanášení vodivých vrstev na textilní substráty je, že ohýbáním textilie může dojít k nerovnoměrné vodivosti v určitých bodech. Tento problém se vyskytuje u motivů tištěných pomocí vodivých inkoustů a past, které jsou vyplněny kovovými částicemi. Tyto vodivé inkousty a pasty jsou po vytištění na textilní substrát tuhé a náchylné na tvorbu prasklin při ohýbání. [1]

V některých výzkumech zlepšují vlastnosti textilního substrátu tím, že mezi textilní substrát a elektricky vodivou vrstvu nanášejí ještě vrstvu polyuretanu. Tato impregnační vrstva vyrovnává strukturní nerovnosti textilie a zlepšuje tak podmínky pro tisk vodivých motivů na substrát. Na vytvořený elektricky vodivý motiv je poté nanášena další vrstva polyuretanu, která

jej zapouzdří. Vytvrzení těchto polyuretanových vrstev se provádí působením ultrafialového světla. Nanesení polyuretanových vrstev zvyšuje trvanlivost a odolnost vůči praskání těchto tištěných elektricky vodivých vrstev. [3]

### 1.2.3.1 Sítotisk

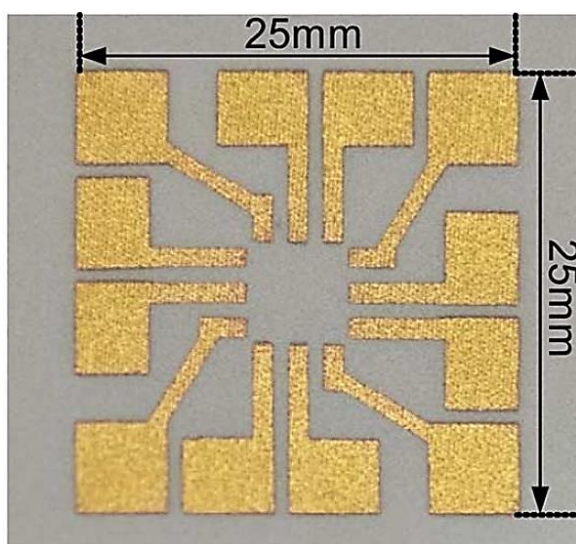
Sítotisk je jednoduchá tlustovrstvá nízkonákladová technika, která se v elektrotechnickém průmyslu ve velké míře využívá k vytváření komplikovaných elektrických obvodů na deskách plošných spojů. Technika sítotisku se dá také využít k nanesení vodivých motivů na textilní substrát. Postup sítotisku se skládá ze samotného tisku, následného sušení a výpalu. Sítotisk se v textilním průmyslu ve velké míře používal k nanesení barevných potisků na textil dávno před tím, než se začal používat k nanesení vodivých vrstev na textilní substráty. Rozdíl je v použití speciální vodivé pasty namísto běžné textilní barvy. Stejně jako při běžném sítotisku je tato vodivá pasta pomocí třerky protlačována oky předem vytvořené šablony (síta) na textilní substrát. Vodivá pasta se skládá ze stříbra, polymeru, polyesteru, rozpouštědla a cyklohexanonu, díky kterým má vysokou vodivost a přilnavost na textilních substrátech. Přilnavost je možné měnit s množstvím lepidla v pastě. Proces vypalování probíhá při teplotě do 150°C, po dobu 20-30 minut, aby se zabránilo deformaci textilního substrátu. Obrázek *Obr. 1.7* ukazuje příklad sítotiskem vytištěných vodivých pruhů různé šířky na textilním substrátu. Nejmenší lineární rozlišení, kterého lze dosáhnout je 200  $\mu\text{m}$ . [2]



*Obr. 1.7* Detail sítotiskem nanesené vodivé vrstvy na textilním substrátu [2]

### 1.2.3.2 Naprašování

Naprašování je vakuová tenkovrstvá metoda, která se používá se k nanesení vodivého motivu na textilní tkaninu ve vysokém rozlišení. Tato technika může využívat kovy jako je zlato, platina, měď, nikl nebo stříbro. Částice těchto kovů jsou naprašovány pomocí argonové inertní plynové plazmy na textilní substrát, který je odvíjen na válec ve vakuové komoře. Tyto částice kovu jsou naprašovány skrze stínící masku s motivem, která je umístěna na textilním substrátu. Při této technice dosahuje úroveň vakua  $10^{-3}$  Torr a teplota textilního substrátu se pohybuje kolem  $150^{\circ}$  C. Nejmenší dosažitelné lineární rozlišení je  $100\ \mu\text{m}$  a tloušťka je  $1\ \mu\text{m}$ . Na obrázku *Obr. 1.8* je ukázka vodivého motivu vytvořeného pomocí naprašování. Naprašované motivy poskytují dobré vodivé spojení a odolnost při omývání, ale ve srovnání se sítotiskem je to poměrně drahý a časově náročný proces. [2]



*Obr. 1.8 Vodivý motiv vytvořený naprašováním zlatých částic na textilní substrát [2]*

## 2 Návrh a realizace testovacích vzorků

Jelikož vyšívání pasivní elektronické součástky jsou novou technologií, v době psaní diplomové práce tak neexistovala žádná pravidla pro jejich návrh či výpočet. Proces návrhu, výroby a testování součástek je tak na experimentální úrovni. Při vytváření návrhu součástek se vycházelo z návrhu součástek pro planární technologii. Planární technologie je v elektronice využívána k výrobě různých druhů elektronických součástek na deskách plošných spojů. Planární součástky se vyznačují rovinností a malou profilovou výškou, tyto vlastnosti jsou podobné i u textilně založených součástek, a proto se v práci vychází právě z těchto výpočtů. Výzkumem vyšívání vodivých textilií se v současné době na univerzitě zabývá několik projektů. Pasivní elektronické prvky mohou být v těchto řešených projektech využity jako základní prvky elektronických systémů pro chytré textilie, pasivní frekvenční filtry, pro impedanční přizpůsobení vyšívání antén, nebo pro jiné různé nositelné technologie a aplikace. Z tohoto důvodu je tedy důležité otestovat a charakterizovat chování takto vyrobených pasivních součástek. Cílem praktické části této diplomové práce je tedy pomocí planární technologie navrhnout pasivní elektronické prvky vyšíté do textilní tkaniny, proměřit jejich základní elektrické parametry, porovnat je s výpočty a planárními součástkami realizovanými konvenční metodou fotolitografie na deskách plošných spojů podle stejných návrhů tak, aby řešené projekty mohly na tyto poznatky navázat a dále je potom rozvíjet.

V diplomové práci jsou navrženy rezistory, meandrové a spirální čtvercové indukory, interdigitální kapacitory. U jednotlivých induktorů a kapacitorů je vždy navrženo více prvků stejných struktur o různé geometrické složitosti, z nichž ten nejsložitější prvek je vždy ještě navržen tak, aby jeho struktura byla tvořena jen jedním vláknem. Je důležité zjistit chování i takto jedno-vláknově vytvořených prvků, protože by mohly být dobře uplatněny v navazujících projektech díky své snadnější výrobě, flexibilitě, nižší hmotnosti, nižším výrobním nákladům, lepší prodyšnosti a integraci. Nejsložitější prvky jsou vyrobeny třikrát, aby byly ověřeny jejich elektrické parametry. Spirální čtvercové indukory a interdigitální kapacitory byly nejprve navrženy s 1 mm izolační mezerou mezi vodivými částmi. Při testování těchto vzorků bylo zjištěno, že 1 mm izolační mezera není dostatečně velká, protože vlivem třepení vodivých vláken přize dochází ke zkratům v těchto místech. Tyto návrhy byly následně přepracovány tak, aby byla izolační mezera 2 mm, při které již ke zkratům nedochází. Všechny tyto prvky byly navrženy také pro desky plošných spojů (DPS). U všech vzorků byly vytvořeny plošky pro kontaktování o rozměru 4 x 4 mm. Návrh testovaných vzorků byl realizován

v programu AutoCAD 2016 pro výrobu desek plošných spojů, a poté byl importován a upraven pro vyšívání prvky programem CorelDRAW X6.

## 2.1 Výroba testovacích vzorků

### 2.1.1 Vyšité vzorky

K vyšítí testovacích vzorků byl použit přístroj Bernina 750 QE, který vlastní katedra technologií a měření fakulty elektrotechnické. Je to vyšívací stroj větších rozměrů, který je opatřen dotykovým displejem a systémem horního podávání. Tento stroj nabízí 837 druhů stehů včetně 6 abeced a je také vybavený BSR senzorem, který hlídá rychlost pohybu látky při volném šití a podle toho upravuje rychlost šití. Pro možnost vyšívání je tento stroj ještě dovybaven modulem Bernina 8XX / 7XX, který umožňuje vyšívat i složité vzory různých velikostí.



Obr. 2.1 Šicí stroj Bernina 750 QE vybavený vyšívacím modulem Bernina 8XX / 7XX

Návrhy vzorků pro vyšítí byly vytvořeny v programu AutoCAD a poté byly importovány a upraveny v programu CorelDraw X6. S těmito návrhy, ale neumí vyšívací stroj Bernina přímo pracovat, proto bylo nutné využít další software, který návrhy emuloval do potřebné formy. Emulace návrhů pro vyšívací stroj byla provedena v programu Bernina Designer Plus\_7.0.

K vyšítí testovaných vzorků byla použita vodivá příze s interním označením 25A, na jejímž vývoji se podílela Fakulta elektrotechnická Západočeské univerzity v Plzni. Jádro této příze tvoří polyesterová vlákna, která jsou spředená s 8 mosaznými drátky. Průměr každého drátku je 30  $\mu\text{m}$ . Přízi tvoří ze 69 % mosaz a 31 % polyester. Jemnost příze je 72 *tex* a její elektrický odpor je 7,7  $\Omega/\text{m}$ .

Jako textilní substrát byla použita nejkvalitnější 100% vlněná tkanina vyrobená podnikem Nová Mosilana v Brně. Nová Mosilana je největším výrobním závodem italského koncernu Marzotto group a největším výrobcem vlněných tkanin v Evropě.



Obr.2.2 Detail použitého vlněného textilního substrátu Nová Mosilana

### 2.1.2 Vzorky na DPS

Vzorky plošných spojů byly vyrobeny pomocí techniky fotolitografie na mědi potažený sklo-epoxidový laminátový substrát FR4 o tloušťce 0,6 mm s tloušťkou měděné vrstvy 18  $\mu\text{m}$ . Proces fotolitografie spočívá v zamaskování substrátu v místech, kde není požadována vodivá plocha (nanesení fotorezistu, expozice přes masku, vyvolání) a následném odleptání měděné vrstvy v těchto místech tak, aby na substrátu zůstal jen požadovaný motiv. Ukázka těchto vyrobených vzorků je na obrázku Obr. 2.3.



Obr. 2.3 Ukázka realizovaných vzorků DPS

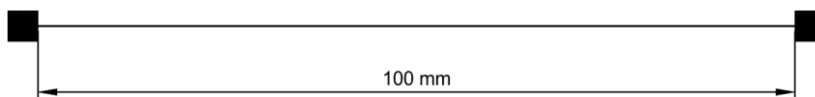
## 2.2 Realizované testovací vzorky

V této kapitole je vždy uveden návrh testovaného vzorku, jeho realizace, výpočet a skutečně naměřená hodnota. Hodnoty byly naměřeny při frekvenci 1 kHz RLC měřičem Keysight E4980A. Průběh tohoto měření je popsán v kapitole 3.1.1. Porovnání vypočtených a naměřených hodnot je diskutováno v kapitole 3.1.3.

## 2.2.1 Rezistor

Rezistory jsou řešeny vyšítím přize s určitou hodnotou odporu o délce 100 mm a 200 mm. Elektrický odpor použité přize je 7,7  $\Omega/m$ .

1) Navržený rezistor:  $l = 100\text{ mm}$ .



Obr. 2.4 Návrh rezistoru - 100 mm

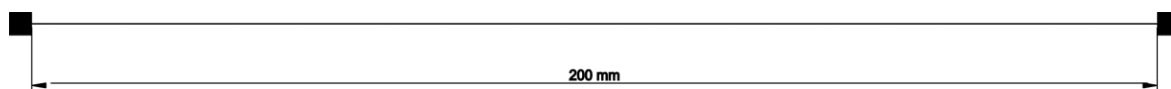


Obr. 2.5 Realizovaný vyšitý rezistor – 100 mm

$$R = 7,7 \cdot 0,1 = 0,77\ \Omega \quad (2.1)$$

Na vyšitém rezistoru byl naměřen elektrický odpor 1,21  $\Omega$ .

2) Navržený rezistor:  $l = 200\text{ mm}$ .



Obr. 2.6 Návrh rezistoru – 200 mm



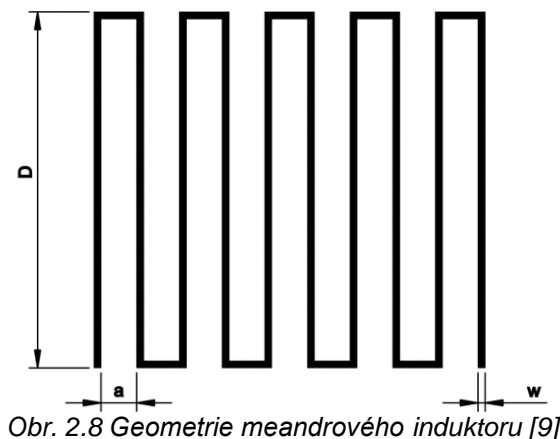
Obr. 2.7 Realizovaný vyšitý rezistor – 200 mm

$$R = 7,7 \cdot 0,2 = 1,54\ \Omega \quad (2.2)$$

Na vyšitém rezistoru byl naměřen elektrický odpor 2,56  $\Omega$ .

## 2.2.2 Meandrový induktor

Hodnota indukčnosti meandrového induktoru je závislá na parametrech  $D$ ,  $a$ ,  $w$  a počtu úseků  $n$ . Geometrie tohoto prvku je na obrázku *Obr. 2.8*. U prvku s jedno-vláknovou strukturou je vodivá tloušťka struktury dána tloušťkou použité vodivé přize, tedy  $8 \times 30 \mu\text{m}$ . Tloušťka jedno-vláknové struktury pro vzorek realizovaný na desce plošného spoje je  $0,13 \text{ mm}$ .



Vztah pro výpočet indukčnosti [9]:

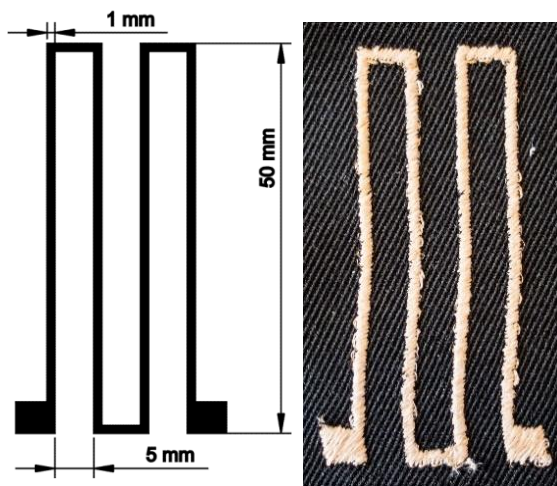
$$L = 0,1 \cdot D \cdot \left[ 4 \cdot n \cdot \ln \cdot \frac{2(a + w)}{w} - Kn \right]. \quad [nH; \text{mm}] \quad (2.3)$$

Pro konstantu  $Kn$  platí tabulka *Tab. 3.1*:

*Tab. 3.1 Hodnoty konstanty  $Kn$  v závislosti na počtu úseků [9]*

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

### 1) Meandrový induktor – 4 úseky



*Obr. 2.9 Návrh a realizovaný vyšitý meandrový induktor – 4 úseky*



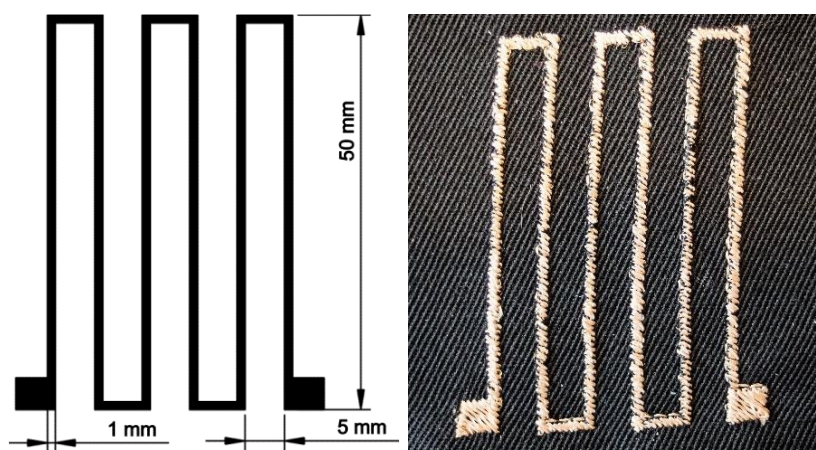
Parametry:  $n = 4, w = 1 \text{ mm}, a = 5 \text{ mm}, D = 50 \text{ mm}$ .

Výpočet indukčnosti:

$$L = 0,1 \cdot 50 \cdot \left[ 4 \cdot 4 \cdot \ln \cdot \frac{2(5 + 1)}{1} - 6,22 \right] = 167,69 \text{ nH} \quad (2.4)$$

Naměřená indukčnost je pro vyšitý vzorek  $200 \text{ nH}$  a  $156 \text{ nH}$  pro vzorek na DPS.

## 2) Meandrový induktor – 6 úseků



Obr. 2.10 Návrh a realizovaný meandrový induktor – 6 úseků

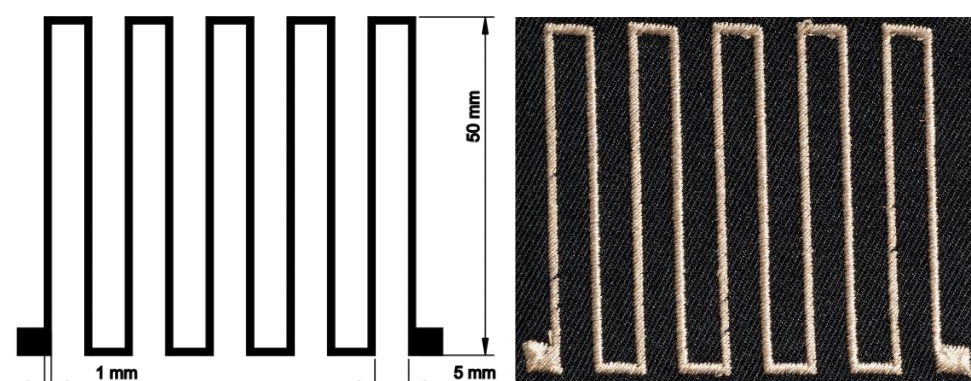
Parametry:  $n = 6, w = 1 \text{ mm}, a = 5 \text{ mm}, D = 50 \text{ mm}$ .

Výpočet indukčnosti:

$$L = 0,1 \cdot 50 \cdot \left[ 4 \cdot 6 \cdot \ln \cdot \frac{2(5 + 1)}{1} - 9,7 \right] = 249,69 \text{ nH} \quad (2.5)$$

Naměřená indukčnost je pro vyšitý vzorek  $280 \text{ nH}$  a  $270 \text{ nH}$  pro vzorek na DPS.

## 3) Meandrový induktor – 10 úseků



Obr. 2.11 Návrh a realizovaný meandrový induktor – 10 úseků

Parametry:  $n = 10$ ,  $w = 1 \text{ mm}$ ,  $a = 5 \text{ mm}$ ,  $D = 50 \text{ mm}$ .

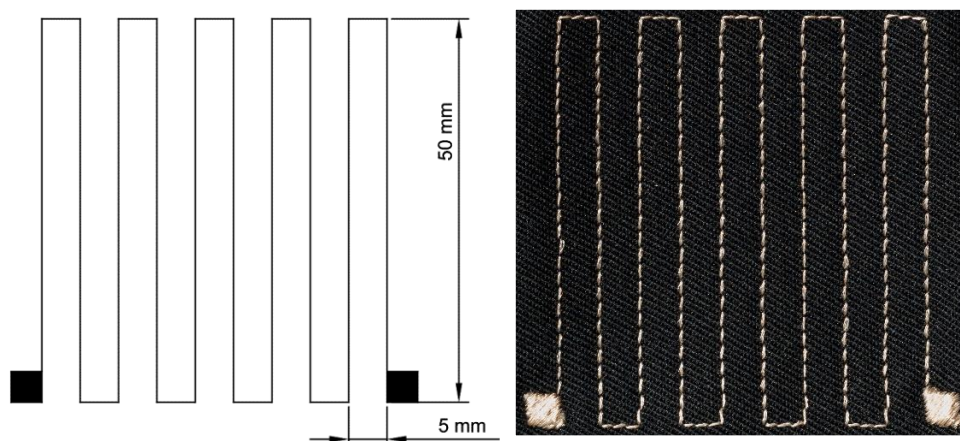
Výpočet indukčnosti:

$$L = 0,1 \cdot 50 \cdot \left[ 4 \cdot 10 \cdot \ln \cdot \frac{2(5 + 1)}{1} - 16,86 \right] = 412,68 \text{ nH} \quad (2.6)$$

Tab. 2.2 Naměřené indukčnosti realizovaných vzorků

	Induktor - 10 úseků			
	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek DPS
Ls [nH]	470	460	432	430

## 4) Meandrový induktor – 10 úseků, jedno-vláknový



Obr. 2.12 Návrh a realizovaný meandrový induktor – 6 úseků

Společné parametry:  $n = 10$ ,  $a = 5 \text{ mm}$ ,  $D = 50 \text{ mm}$ .

Výpočet indukčnosti pro vyšitý vzorek:  $w = 0,24 \text{ mm}$ .

$$L = 0,1 \cdot 50 \cdot \left[ 4 \cdot 10 \cdot \ln \cdot \frac{2(5 + 0,24)}{0,24} - 16,86 \right] = 671 \text{ nH} \quad (2.7)$$

Výpočet indukčnosti pro vzorek na DPS:  $w = 0,13 \text{ mm}$ .

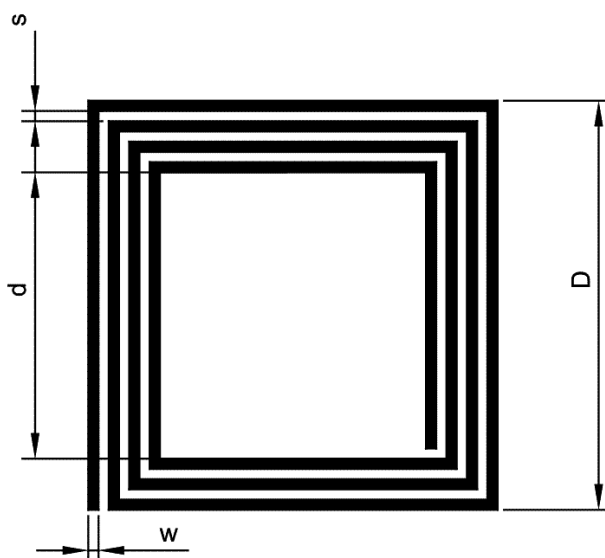
$$L = 0,1 \cdot 50 \cdot \left[ 4 \cdot 10 \cdot \ln \cdot \frac{2(5 + 0,13)}{0,13} - 16,86 \right] = 789,39 \text{ nH} \quad (2.8)$$

Tab. 2.3 Naměřené indukčnosti realizovaných vzorků

	Induktor - 10 úseků, jedno-vláknový			
	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek DPS
Ls [nH]	436	412	440	620

### 2.2.3 Induktor čtvercová spirála

Hodnota indukčnosti spirálního induktoru je závislá na parametrech  $D, w, d, s$  a počtu závitů  $n$ . Geometrie tohoto prvku je na obrázku *Obr. 2.13*.



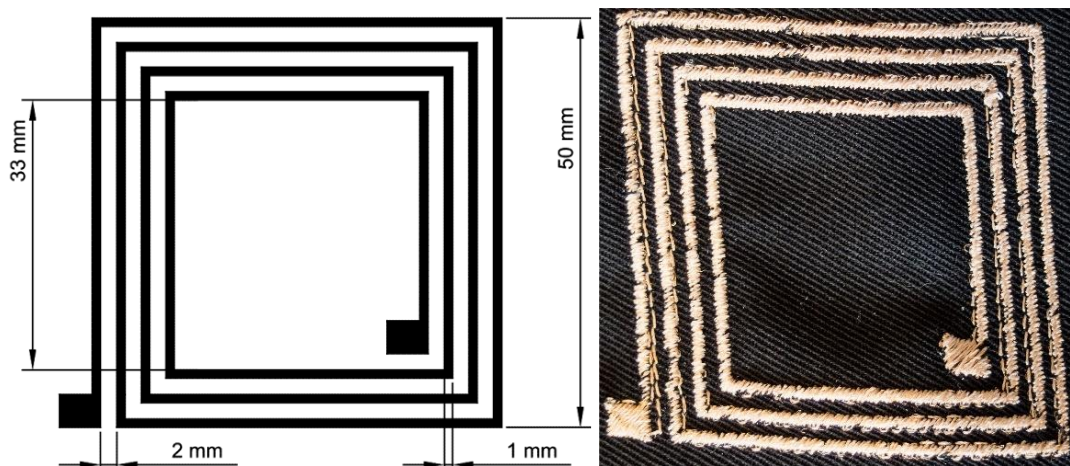
Obr. 2.13 Geometrie Induktoru čtvercová spirála [9]

Vztah pro výpočet indukčnosti: [9]

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

$$D = d + 2n(w + s) + w - s. \quad [mm] \quad (2.9)$$

### 1) Induktor čtvercová spirála – 3 závity



Obr. 2.14 Návrh a realizovaný induktor čtvercová spirála – 3 závity

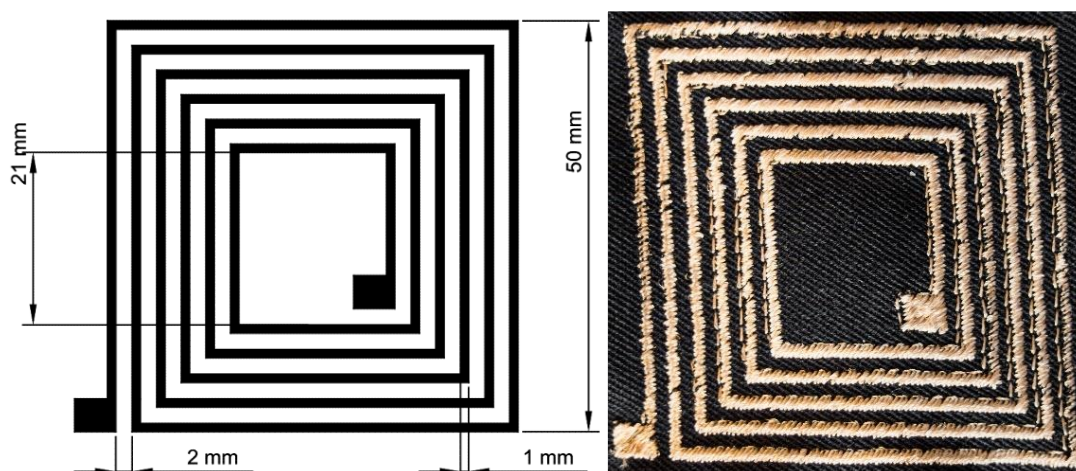
Parametry:  $n = 3$ ,  $d = 33 \text{ mm}$ ,  $w = 1 \text{ mm}$ ,  $s = 2 \text{ mm}$ ,  $D = 50 \text{ mm}$ .

Výpočet indukčnosti:

$$L = 6 \cdot \frac{(50 + 33)^2 \cdot 3^2}{(15 \cdot 50) - (7 \cdot 33)} = 716,77 \text{ nH} \quad (2.10)$$

Naměřená indukčnost je pro vyšitý vzorek  $1200 \text{ nH}$  a  $1060 \text{ nH}$  pro vzorek na DPS.

## 2) Induktor čtvercová spirála – 5 závitů



Obr. 2.15 Návrh a realizovaný induktor čtvercová spirála – 5 závitů

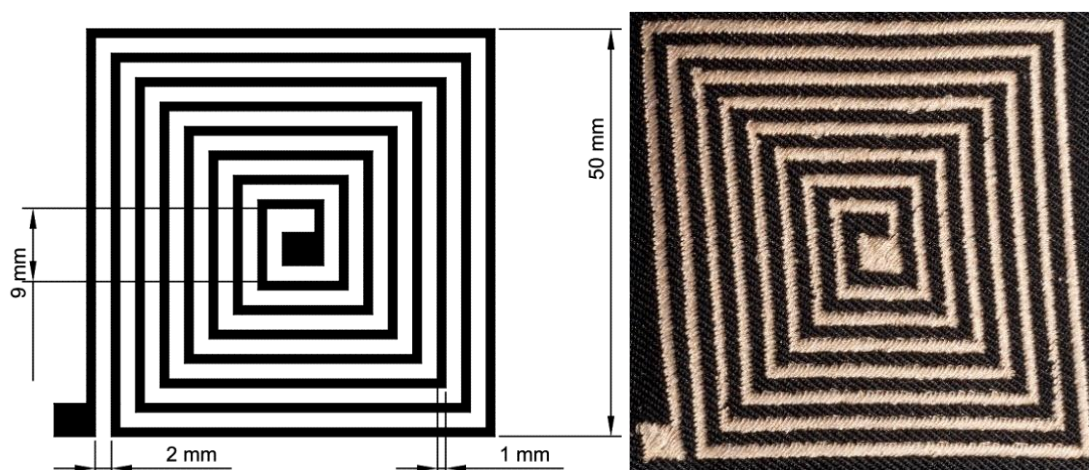
Parametry:  $n = 5$ ,  $d = 21 \text{ mm}$ ,  $w = 1 \text{ mm}$ ,  $s = 2 \text{ mm}$ ,  $D = 50 \text{ mm}$ .

Výpočet indukčnosti:

$$L = 6 \cdot \frac{(50 + 21)^2 \cdot 5^2}{(15 \cdot 50) - (7 \cdot 21)} = 1253,98 \text{ nH} \quad (2.11)$$

Naměřená indukčnost je pro vyšitý vzorek  $1600 \text{ nH}$  a  $1400 \text{ nH}$  pro vzorek na DPS.

## 3) Induktor čtvercová spirála – 7 závitů



Obr. 2.16 Návrh a realizovaný induktor čtvercová spirála – 7 závitů

Parametry:  $n = 7, d = 9 \text{ mm}, w = 1 \text{ mm}, s = 2 \text{ mm}, D = 50 \text{ mm}$ .

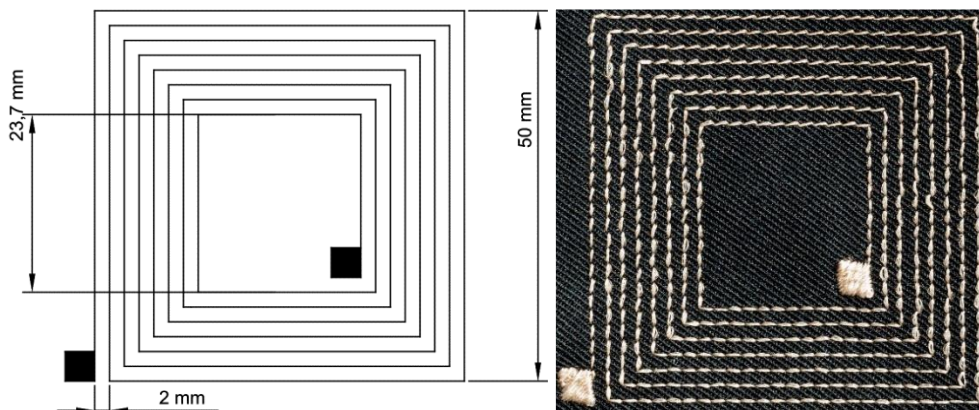
Výpočet indukčnosti:

$$L = 6 \cdot \frac{(50 + 9)^2 \cdot 7^2}{(15 \cdot 50) - (7 \cdot 9)} = 1489,69 \text{ nH} \quad (2.12)$$

Tab. 2.4 Naměřené indukčnosti realizovaných vzorků

	Induktor – 7 závitů			
	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek DPS
Ls [nH]	3500	4000	4000	1700

#### 4) Induktor čtvercová spirála – 7 závitů, jedno-vláknový



Obr. 2.17 Návrh a realizovaný induktor čtvercová spirála – 7 závitů, jedno-vláknový

Parametry:  $n = 7, w = 0,24 \text{ mm}, d = 24 \text{ mm}, w = 0,24 \text{ mm}, s = 2 \text{ mm}, D = 50 \text{ mm}$ .

Výpočet indukčnosti:

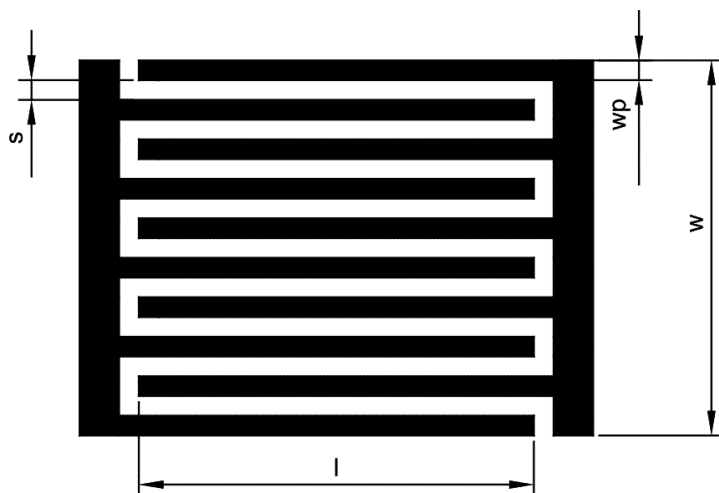
$$L = 6 \cdot \frac{(50 + 23,7)^2 \cdot 7^2}{(15 \cdot 50) - (7 \cdot 23,7)} = 2733,98 \text{ nH} \quad (2.13)$$

Tab. 2.5 Naměřené indukčnosti realizovaných vzorků

	Induktor - 7 závitů, jedno-vláknový			
	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek DPS
Ls [nH]	3400	3530	3490	3500

## 2.2.4 Interdigitální kapacitor

Hodnota kapacity interdigitálního kapacitoru je dána geometrickými parametry  $w$ ,  $wp$ ,  $s$ ,  $l$ , počtem elektrod (prstů) kapacitoru  $n$ , tloušťkou vodivé vrstvy  $t$  a relativní permitivitou substrátu  $\epsilon_r$ . Kde  $\epsilon_0$  je permitivita vakua s hodnotou  $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ . Geometrie tohoto prvku je na obrázku *Obr. 2.18*. Jelikož u tohoto prvku je kapacita závislá i na dielektriku substrátu a výšce vodivé vrstvy, tedy na parametrech  $\epsilon_r$  a  $t$ , je nutno provést výpočty vyšíváních vzorků a vzorků na DPS zvlášť. Geometrie tohoto prvku je na obrázku *Obr. 2.18*.

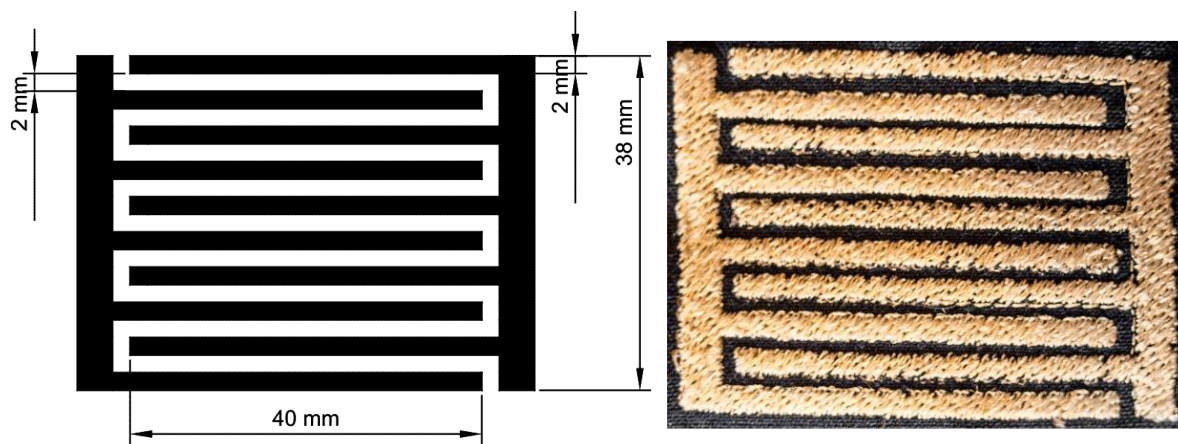


*Obr. 2.18 Geometrie interdigitálního kapacitoru [12]*

Vztah pro výpočet kapacity [12]:

$$C_s = \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r + 1}{\ln\left(\frac{\pi \cdot s}{wp + t} + 1\right)} \cdot l \cdot \frac{n}{2} \quad [F; m] \quad (2.14)$$

### 1) Interdigitální kapacitor - 10 prstů



*Obr. 2.19 Návrh a realizovaný interdigitální kapacitor – 10 prstů*

Společné parametry:  $n = 10, s = 2 \text{ mm}, l = 40 \text{ mm}, wp = 2 \text{ mm}$ .

Výpočet kapacity pro vyšitý vzorek:  $\epsilon_r = 4, t = 0,48 \text{ mm}$ .

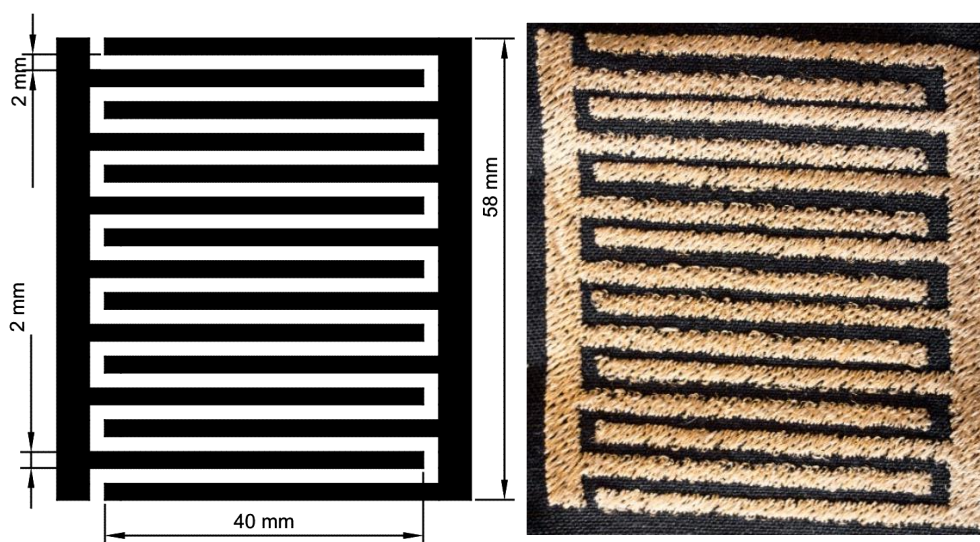
$$C_s = \frac{3,14 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{4+1}{2}}{\ln\left(\frac{3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3} + 0,48 \cdot 10^{-3}} + 1\right)} \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{10}{2} = 11,01 \text{ pF} \quad (2.15)$$

Výpočet kapacity pro vzorek na DPS:  $\epsilon_r = 4,2, t = 0,018 \text{ mm}$ .

$$C_s = \frac{3,14 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{4,2+1}{2}}{\ln\left(\frac{3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3} + 0,018 \cdot 10^{-3}} + 1\right)} \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{10}{2} = 10,23 \text{ pF} \quad (2.16)$$

Naměřená kapacita kondenzátoru je pro vyšitý vzorek  $46,5 \text{ pF}$  a  $9,5 \text{ pF}$  pro vzorek na DPS.

## 2) Interdigitální kapacitor - 15 prstů



Obr. 2.20 Návrh a realizovaný interdigitální kapacitor – 15 prstů

Společné parametry:  $n = 15, wp = 2 \text{ mm}, s = 2 \text{ mm}$ .



Výpočet kapacity pro vyšitý vzorek:  $\epsilon_r = 4$ ,  $t = 0,48 \text{ mm}$ .

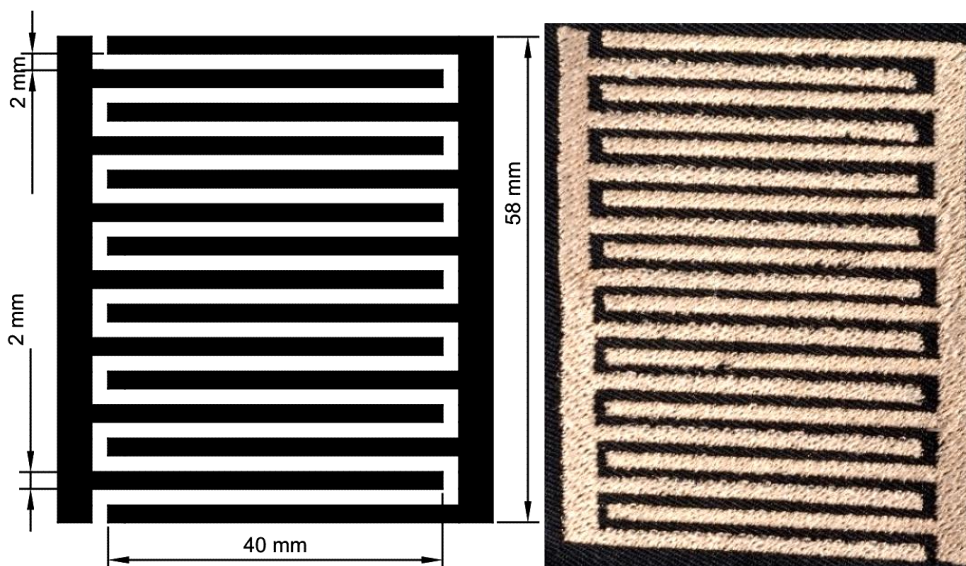
$$C_s = \frac{3,14 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{4+1}{2}}{\ln\left(\frac{3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3} + 0,48 \cdot 10^{-3}} + 1\right)} \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{15}{2} = 16,53 \text{ pF} \quad (2.17)$$

Výpočet kapacity pro vzorek na DPS:  $\epsilon_r = 4,2$ ,  $t = 0,018 \text{ mm}$ .

$$C_s = \frac{3,14 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{4,2+1}{2}}{\ln\left(\frac{3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3} + 0,018 \cdot 10^{-3}} + 1\right)} \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{15}{2} = 15,34 \text{ pF} \quad (2.18)$$

Naměřená kapacita kondenzátoru je pro vyšitý vzorek  $62 \text{ pF}$  a  $11,8 \text{ pF}$  pro vzorek na DPS.

### 3) Interdigitální kapacitor – 20 prstů



Obr. 2.21 Návrh a realizovaný interdigitální kapacitor – 20 prstů

Společné parametry:  $n = 20$ ,  $w_p = 2 \text{ mm}$ ,  $s = 2 \text{ mm}$ .

Výpočet kapacity pro vyšitý vzorek:  $\epsilon_r = 4$ ,  $t = 0,48 \text{ mm}$ .

$$C_s = \frac{3,14 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{4+1}{2}}{\ln\left(\frac{3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3} + 0,18 \cdot 10^{-3}} + 1\right)} \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{20}{2} = 22,04 \text{ pF} \quad (2.19)$$

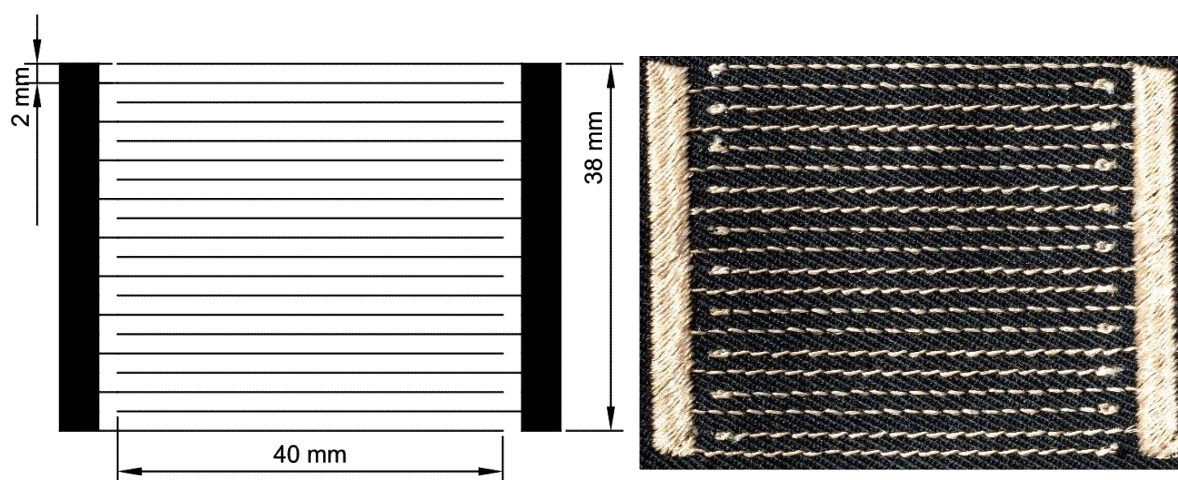
Výpočet kapacity pro vzorek na DPS:  $\epsilon_r = 4,2$ ,  $t = 0,018$  mm.

$$C_s = \frac{3,14 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{4,2 + 1}{2}}{\ln\left(\frac{3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3} + 0,018 \cdot 10^{-3}} + 1\right)} \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{20}{2} = 20,45 \text{ pF} \quad (2.20)$$

Tab. 2.6 Naměřené kapacity realizovaných vzorků

	Kapacitor - 20 prstů			
	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek DPS
Cp [pF]	76	23,4	23,7	16

#### 4) Interdigitální kapacitor – 20 prstů, jedno-vláknový



Obr. 2.22 Návrh a realizovaný interdigitální kapacitor – 20 prstů, jedno-vláknový

Společné parametry:  $n = 20$ ,  $s = 2$  mm.

Výpočet kapacity pro vyšitý vzorek:  $w_p = 0,024$  mm,  $\epsilon_r = 4$ ,  $t = 0,24$  mm.

$$C_s = \frac{3,14 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{4 + 1}{2}}{\ln\left(\frac{3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{0,02 \cdot 10^{-3} + 0,24 \cdot 10^{-3}} + 1\right)} \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{20}{2} = 10,51 \text{ pF} \quad (2.21)$$

Výpočet kapacity pro vzorek na DPS:  $w_p = 0,13 \text{ mm}$ ,  $\varepsilon_r = 4,2$ ,  $t = 0,018 \text{ mm}$ .

$$C_s = \frac{3,14 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{4,2 + 1}{2}}{\ln\left(\frac{3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{0,13 \cdot 10^{-3} + 0,018 \cdot 10^{-3}} + 1\right)} \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{20}{2} = 7,67 \text{ pF} \quad (2.22)$$

Tab. 2.7 Naměřené kapacity realizovaných vzorků

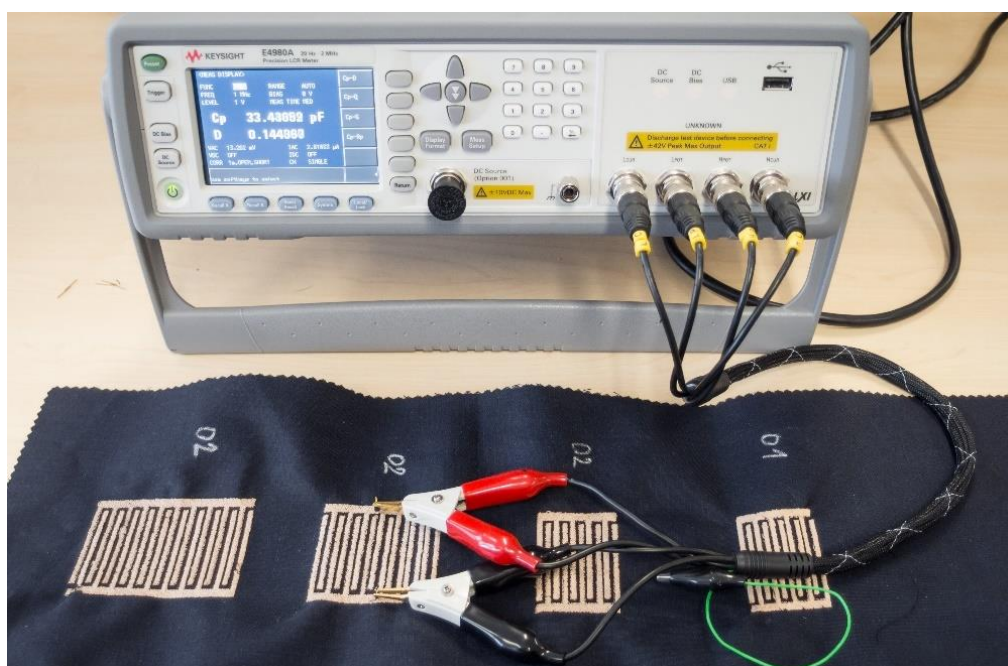
	Kapacitor - 20 prstů, jedno-vláknový			
	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek DPS
<b>C<sub>p</sub> [pF]</b>	12,5	12,3	12,5	8,81

### 3 Měření vyšitých pasivních elektronických součástek

#### 3.1 Měření základních elektrických parametrů

##### 3.1.1 Postup měření

U všech testovaných vzorků byly nejprve proměřeny jejich základní elektrické parametry. Tato měření byla provedena na měřicím přístroji Keysight E4980A Precision LCR Meter. Přístroj umožňuje měřit RLC parametry v rozsahu  $20 \text{ Hz} - 2 \text{ MHz}$ . Naměřené hodnoty byly odečítány a ručně zapisovány do tabulkového editoru Microsoft Excel. Měřicí sestava je na *Obr. 3.1*.



*Obr. 3.1 Měření elektrických parametrů přístrojem Keysight E4980A*

U testovaných vzorků byly na frekvencích 1kHz, 10kHz a 100kHz měřeny následující elektrické parametry:

- Rezistory
  - $L_s$  – sériová indukčnost
  - $R_{dc}$  – elektrický odpor
- Induktory
  - $L_s$  – sériová indukčnost
  - $Q$  – činitel kvality
  - $R_{dc}$  – elektrický odpor

- Kapacity
  - $C_p$  – paralelní kapacita
  - $D$  – ztrátový činitel
  - $R_{dc}$  – elektrický odpor

Kontaktování vyšíváných elektrických motivů je v době tvorby práce problémové a na fakultě současně probíhá výzkum v této oblasti. Pro potřeby této práce bylo využito mosazného špendlíku provlečeného mezi vodivá vlákna vyšitých testovacích vzorků. Toto řešení však mohlo zejména na vyšších frekvencích zapříčinit určité zkreslení naměřených výsledků. Měření probíhalo v laboratoři za běžných provozních podmínek.

### 3.1.2 Naměřené hodnoty

V této podkapitole jsou uvedeny výsledky naměřené přístrojem Keysight E4980A. V tabulce *Tab. 3.1* jsou uvedeny naměřené hodnoty indukčnosti a odporu testovaných rezistorů. V tabulkách *Tab. 3.2 – Tab. 3.7* jsou uvedeny naměřené hodnoty indukčnosti, činitele kvality a činného odporu testovaných meandrových a spirálních čtvercových induktorů. V tabulkách *Tab. 3.8 – Tab. 3.10* jsou naměřené hodnoty kapacity, ztrátového činitele a činného odporu interdigitálních kapacitorů.

#### Rezistory

*Tab. 3.1 Naměřené hodnoty rezistorů*

	100 mm		200 mm
	Vzorek 1	DPS	Vzorek 1
f [kHz]	$L_s$ [nH]	$L_s$ [nH]	$L_s$ [nH]
1	124	183	215
10	131	184,8	223
100	135	184,8	225
$R_{dc}$ [ $\Omega$ ]	1,21	1,27	2,56

### Meandrové induktory

Tab. 3.2 Naměřené hodnoty pro meandrový induktor - 4 a 6 úseků

	4 úseky				6 úseků			
	Vzorek 1		Vzorek DPS		Vzorek 1		Vzorek DPS	
f [kHz]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]
1	200	0	156	0	280	0	270	0
10	187	0	150	0,03	270	0	216	0,03
100	187	0,04	151	0,28	276	0,03	215	0,32
Rdc [Ω]	5		0,272		5,8		0,42	

Tab. 3.3 Naměřené hodnoty pro meandrový induktor - 10 úseků

	10 úseků							
	Vzorek 1		Vzorek 2		Vzorek 3		Vzorek DPS	
f [kHz]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]
1	470	0	460	0	432	0	430	0
10	450	0	446	0	405	0	362	0,03
100	443	0,03	447	0,04	405	0,05	361	0,32
Rdc [Ω]	10,8		8,9		7,1		0,72	

Tab. 3.4 Naměřené hodnoty pro meandrový induktor - 10 úseků, jedno-vláknový

	10 úseků, jedno-vláknový							
	Vzorek 1		Vzorek 2		Vzorek 3		Vzorek DPS	
f [kHz]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]
1	436	0	412	0	440	0	620	0
10	463	0	454	0	470	0	560	0,01
100	465	0,03	422	0,04	465	0,05	561	0,06
Rdc [Ω]	7,3		5,9		6		6,19	

### Spirální čtvercové induktory

Tab. 3.5 Naměřené hodnoty pro spirální čtvercový induktor - 3 a 5 závitů

	3 závity				5 závitů			
	Vzorek 1		Vzorek DPS		Vzorek 1		Vzorek DPS	
f [kHz]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]
1	1200	0	1060	0,08	1600	0	1400	0,01
10	1200	0	1080	0,85	1660	0	1570	0,1
100	1200	0,6	1100	8,51	1640	0,03	1580	0,96
Rdc [Ω]	16,2		0,796		5,57		1,03	

Tab. 3.6 Naměřené hodnoty pro spirální čtvercový induktor 7 závitů

	7 závitů							
	Vzorek 1		Vzorek 2		Vzorek 3		Vzorek DPS	
f [kHz]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]
1	3500	0	4000	0	4000	0	1600	0
10	3530	0	4050	0	4150	0	1640	0,02
100	3570	0,03	4000	0,2	4180	0,02	1630	0,17
Rdc [Ω]	98		180		168		16,2	

Tab. 3.7 Naměřené hodnoty pro spirální čtvercový induktor 7 závitů, jedno-vláknový

	7 závitů, jedno-vláknový							
	Vzorek 1		Vzorek 2		Vzorek 3		Vzorek DPS	
f [kHz]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]	Ls [nH]	Q [-]
1	3400	0	3530	0	3490	0	3500	0
10	3370	0,02	3490	0,01	3440	0,01	3540	0,02
100	3370	0,19	3500	0,15	3440	0,16	3540	0,17
Rdc [Ω]	11		14,57		12,89		12,85	

### Interdigitální kapacitory

Tab. 3.8 Naměřené hodnoty pro interdigitální kapacitor – 10 a 15 prstů

	Kapacitor - 10 prstů				Kapacitor - 15 prstů			
	Vzorek 1		DPS		Vzorek 1		Vzorek DPS	
f [kHz]	Cp [pF]	D [-]	Cp [pF]	D [-]	Cp [pF]	D [-]	Cp [pF]	D [-]
1	46,5	0,2	9,5	0,001	62,4	0,193	11,8	0,001
10	34,5	0,25	9,22	0,002	47,7	0,24	11,6	0,002
100	20,17	0,4	8,97	0,01	29,3	0,4	11,42	0,007
Rdc [MΩ]	Větší než 100 MΩ							

Tab. 3.9 Naměřené hodnoty pro interdigitální kapacitor – 20 prstů

	20 prstů							
	Vzorek 1		Vzorek 2		Vzorek 3		Vzorek DPS	
f [kHz]	Cp [pF]	D [-]	Cp [pF]	D [-]	Cp [pF]	D [-]	Cp [pF]	D [-]
1	76	0,17	23,4	0,01	23,7	0,01	16	0,007
10	60	0,22	23,22	0,01	23,5	0,01	16,55	0,01
100	36,6	0,383	22,95	0,02	22,9	0,02	16	0,02
Rdc [MΩ]	Větší než 100 MΩ							

Tab.3.10 Naměřené hodnoty pro interdigitální kapacitor – 20 prstů, jedno-vláknový

	20 prstů, jedno-vláknový							
	Vzorek 1		Vzorek 2		Vzorek 3		Vzorek DPS	
f [kHz]	Cp [pF]	D [-]	Cp [pF]	D [-]	Cp [pF]	D [-]	Cp [pF]	D [-]
1	12,5	0,15	12,3	0,06	12,5	0,04	8,81	0,002
10	10,2	0,24	8	0,09	11,6	0,06	8,73	0,007
100	7,9	0,22	7,6	0,03	8,9	0,06	6,61	0,01
Rdc [MΩ]	Větší než 100 MΩ							

### 3.1.3 Vyhodnocení naměřených výsledků

Naměřené výsledky ukazují, že u jedno-vláknových struktur se naměřené hodnoty vyšitých vzorků přibližují vzorkům na DPS mnohem více než v případě plných struktur. Toto platí zejména pro naměřený elektrický odpor součástek. Z měření vyplývá, že na rozdíl od vzorků realizovaných na DPS se u vyšitých vzorků hodnota elektrického odporu zvyšuje spolu se šířkou struktury. To může být způsobeno vzájemným propletením vodivých vláken a

nevodivých vláken textilního substrátu. Dále to také může být zapříčiněno porušením vodivých vláken při mechanicky náročném procesu vyšívání popsaném v kapitole 1.2.1. Tento jev je nejvíce patrný u 7 závitového spirálního čtvercového induktoru a 10 úsekového meandrového induktoru, kde je u vyšitých vzorků s jedno-vláknovou strukturou naměřený elektrický odpor s přihlédnutím na chybu měření téměř srovnatelný s vzorkem na DPS. U plné struktury ale dosahuje naměřená hodnota elektrického odporu vyšitých vzorků i více než desetinásobku hodnoty naměřené na vzorku DPS. Taktéž naměřené hodnoty sériové indukčnosti vyšitých vzorků spirálních čtvercových i meandrových induktorů tvořených jedno-vláknovou strukturou se nejvíce blíží hodnotám vzorků na DPS. Stejně tak to platí i pro naměřené paralelní kapacity interdigitálních kapacitorů. Zde je potřeba zmínit, že rozdíly kapacit mezi vyšitými vzorky a vzorky na DPS jsou do určité míry dány také rozdílnou hodnotou permitivity dielektrika substrátu a rozdílnou tloušťkou vodivé vrstvy.

Z porovnání vypočtených a naměřených výsledků (hodnoty v kapitole 2.2) je patrné, že neměřená hodnota činného odporu testovaných rezistorů je větší než vypočtená teoretická hodnota, to je způsobeno tím, že všitá vodivá příze u vzorků prochází velkou řadou záhybů a reálná délka příze je tak další než v případě návrhu. Naměřená indukčnost vyšitých testovaných induktorů je taktéž vyšší, než v případě výpočtů pro planární technologii. Je to způsobeno tím, že u vyšitých vzorků se do celkové indukce přidává i vzájemné působení jednotlivých vyšitých vláken ve struktuře prvku. Hodnoty naměřené kapacity vyšitých testovacích kapacitorů dosahují taktéž vyšších hodnot, než v případě výpočtů pro planární technologii. Do celkové kapacity vyšitých testovacích vzorků se taktéž přidává vzájemné působení jednotlivých vyšitých vláken ve struktuře prvku. Vyšité testovací vzorky induktorů i kapacitorů tvořené jedno-vláknovou strukturou dosahují nejmenších rozdílů od vypočtených teoretických hodnot.

### 3.2 Měření frekvenčních charakteristik

Pro každou reálnou pasivní elektronickou součástku R, L a C (nezávisle na funkčním a konstrukčním řešení) platí, že má svůj jistý odpor, indukčnost a kapacitu. Přičemž vlastní kapacita rezistoru a cívky je jejich parazitní nežádoucí parametr. Podobně má rezistor i kondenzátor svojí vlastní parazitní indukčnost. Hodnoty těchto parazitních parametrů jsou do jisté míry závislé na konstrukci součástek. Z toho vyplývá, že elektrické parametry reálných pasivních elektronických součástek jsou závislé na frekvenci. Každá reálná pasivní elektronická součástka má také svoji rezonanční frekvenci. To je stav, kdy dojde k vzájemnému vyrušení



induktivní a kapacitní reaktance součástky. Při této rezonanční frekvenci se součástka chová jako činný odpor a impedance součástky dosahuje maximální nebo minimální hodnoty. Abychom mohli testované vzorky charakterizovat, je nutné proměřit frekvenční závislosti elektrických parametrů a zjistit rezonance těchto vzorků. Velikost vlivu parazitních parametrů pasivních součástek udává činitel kvality  $Q$ .

Výpočet činitele kvality pro induktor:

$$Q = \frac{\omega \cdot L}{R} \cdot [-] \quad (3.1)$$

Výpočet činitele kvality pro kapacitor:

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta}, \quad [-]$$

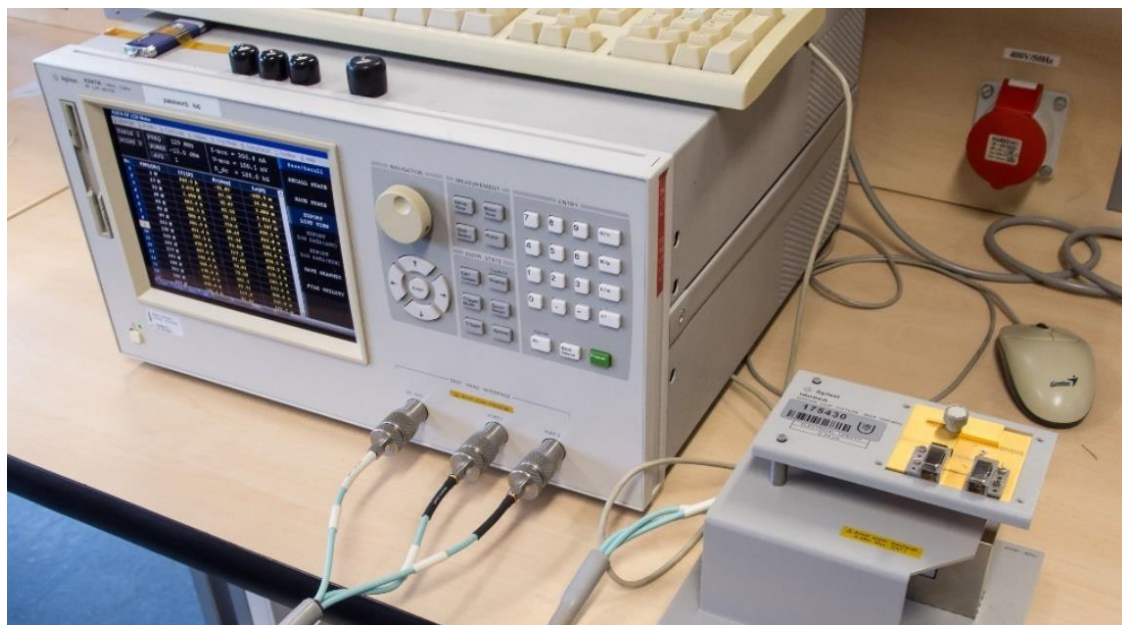
$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_s \cdot R_s = \frac{1}{\omega \cdot C_p \cdot R_p} \cdot [-] \quad (3.2)$$

### 3.2.1 Postup měření

K měření frekvenčních charakteristik byl nejprve použit stejný měřicí přístroj, jako byl použit pro měření základních elektrických parametrů testovaných vzorků, tedy LCR měřič Keysight E4980A. Tento přístroj umožňuje také sekvenčně proměřovat elektrické parametry při frekvenci 20 Hz – 2 MHz. Na těchto frekvencích byly proměřeny frekvenční závislosti impedance, sériové indukčnosti a činitele kvality testovacích induktorů a rezistorů a dále impedance, paralelní kapacity a činitele kvality testovacích interdigitálních kapacitorů. Naměřené výsledky ukázaly, že naměřené parametry se při frekvenci do 2 MHz mění jen nepatrně a vlastní rezonanční kmitočet testovacích vzorků se nachází na vyšších frekvencích. K proměření frekvenčních závislostí testovaných vzorků byl tedy použit další přístroj umožňující měření elektrických parametrů LCR na vyšších frekvencích.

K měření frekvenčních závislostí elektrických parametrů na vyšších frekvencích byl použit měřicí přístroj Agilent 4287A spolu s měřicí stolicí s označením 16092A. Tento měřicí přístroj umožňuje měřit frekvenční závislosti LCR parametrů na frekvenčním rozsahu 1 MHz – 3 GHz.

Měřicí stolice 16092A je určena pro měření do frekvence 500 MHz. Kompletní měřicí sestava je na obrázku *Obr. 3.3*.



*Obr. 3.3 kompletní sestava měřicího přístroje Agilent 4287A a měřicí stolice 16092A*

Na měřicím přístroji byl nejprve nastaven hrubý měřicí rozsah 1 MHz – 500 MHz na kterém byly zjištěny přibližné rezonanční frekvence všech testovaných vzorků. V závislosti na těchto zjištěných vlastních rezonančních frekvencích byl rozsah měřicího přístroje upraven pro každý druh testovaných vzorků zvlášť tak, aby bylo dosaženo co nejpřesnějšího proměření výsledných průběhů. Při každé změně měřicího rozsahu byla měřicí sestava překalibrována. U testovaných vzorků byly měřeny frekvenční závislosti následujících parametrů:

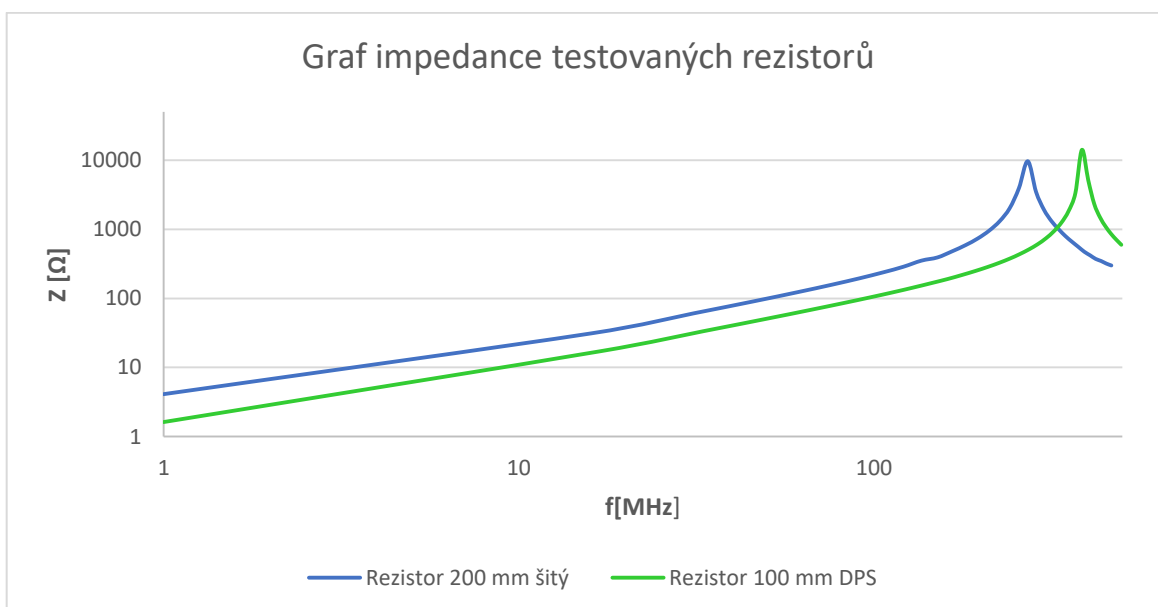
- Rezistory a induktory
  - Z – impedance
  - $\Phi$  – fázový posuv
  - $L_s$  – sériová indukčnost
  
- Kapacity
  - Z – impedance
  - $\Phi$  – fázový posuv
  - $C_p$  – paralelní kapacita

### 3.2.2 Vyhodnocení naměřených výsledků

V této části jsou zhodnoceny naměřené frekvenční charakteristiky testovaných vzorků. Výsledné grafy byly zhotoveny pomocí tabulkového editoru Microsoft Excel. Vzhledem k obsáhlosti měření jsou v této kapitole uvedeny vybrané grafy frekvenčních závislostí testovaných vzorků. Zbylé grafy všech testovaných vzorků se nachází v příloze (rezistory *příloha A*, meandrové indukory *příloha B*, spirální čtvercové indukory *příloha C*, interdigitální kapacitory *příloha D*).

#### 3.2.2.1 Rezistory

V *grafu 3.1* jsou uvedeny frekvenční závislosti impedance testovacích vzorků rezistoru.



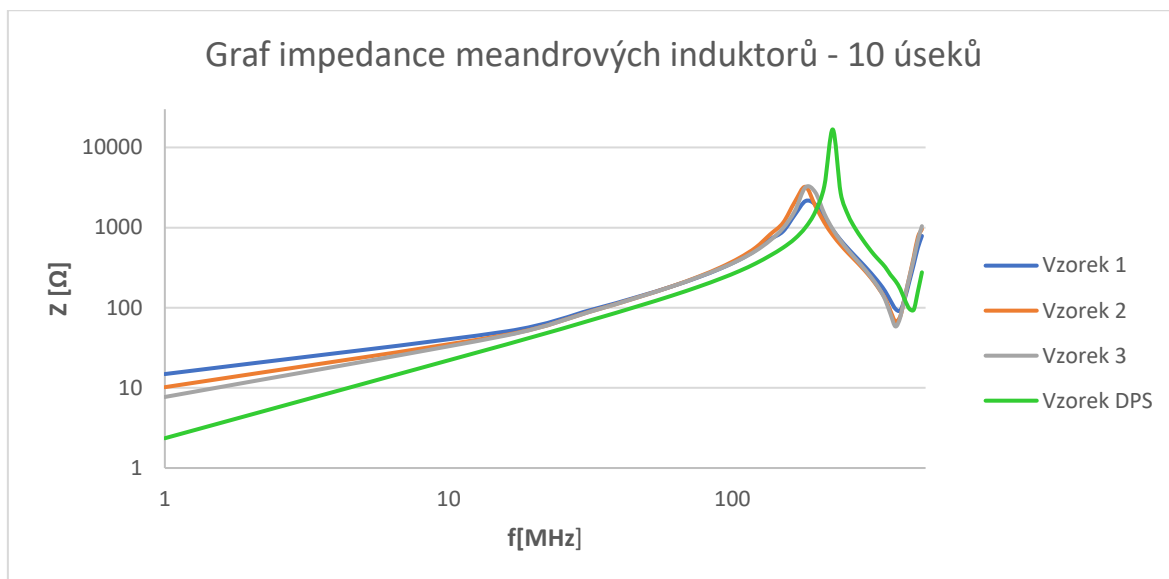
Graf 3.1 Frekvenční závislost impedance testovaných rezistorů

Vyšitý rezistor o délce 200 mm dosahuje vlastní rezonance při frekvenci přibližně 270 MHz a rezistor vytvořený na DPS při frekvenci přibližně 385 MHz. Dále je z grafu možné vyzorovat, že tvar rezonanční křivky vyšitého vzorku je velice blízký vzorku vytvořeném na DPS.

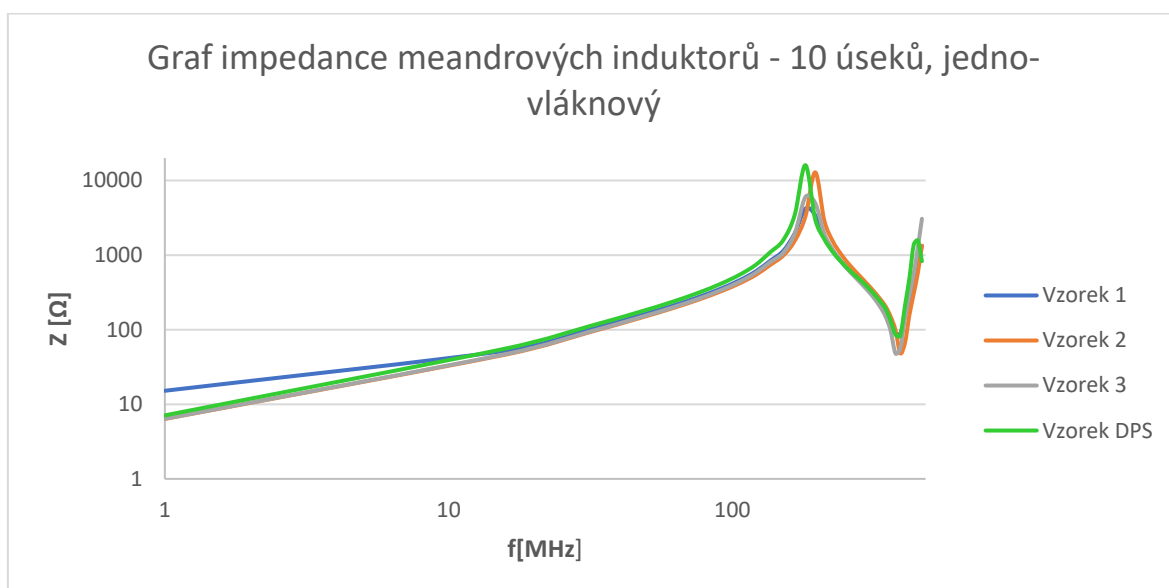
#### 3.2.2.2 Meandrové indukory

*Grafy 3.3 a 3.4* ukazují frekvenční závislosti impedance všech vyšitých testovacích vzorků určité složitosti meandrového indukory v porovnání s testovacím vzorkem

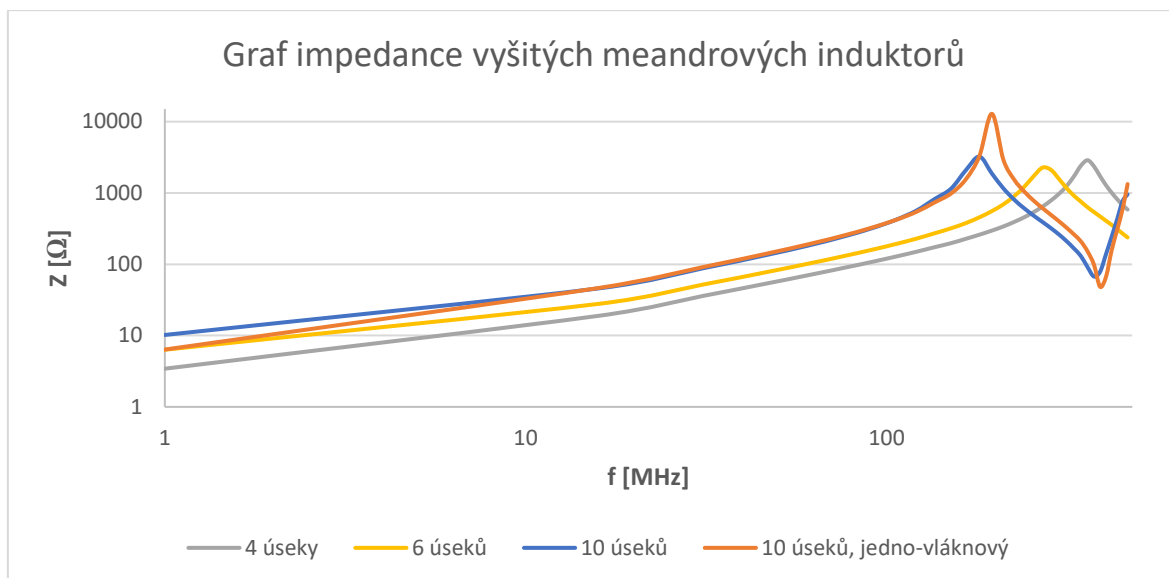
realizovaným na DPS. Graf 3.5 ukazuje vzájemné porovnání frekvenční závislosti impedance vyšitých testovacích vzorků o různém počtu úseků.



Graf 3.3 Frekvenční závislost impedance všech vzorků meandrového induktoru – 10 úseků



Graf 3.4 Frekvenční závislost impedance všech vzorků meandrového induktoru – 10 úseků, jednovláknový



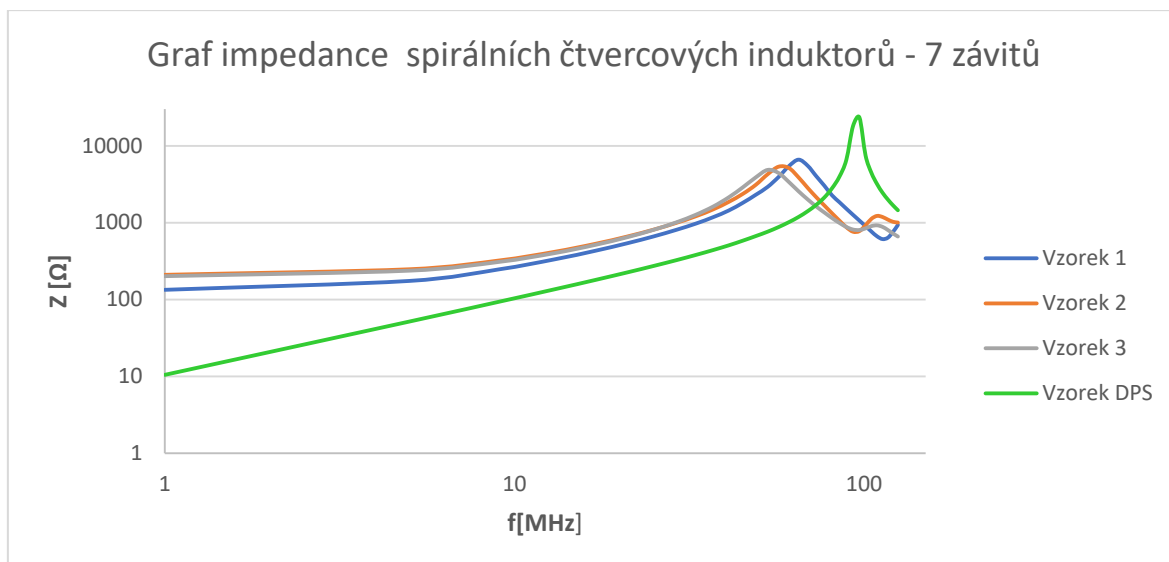
Graf 3.5 Frekvenční závislost impedance vyšitých vzorků meandrového induktoru

Z grafů 3.3 a 3.4 je patrné, že vzorky vyšité jedno-vláknovou strukturou mají téměř srovnatelné průběhy se vzorkem realizovaným na DPS. To neplatí u vyšitých vzorků plných struktur, kde vzorek na DPS dosahuje vlastní rezonance na vyšší frekvenci a její průběh má oproti vyšitým vzorkům větší strmost a dosahuje vyšší hodnoty činitele kvality.

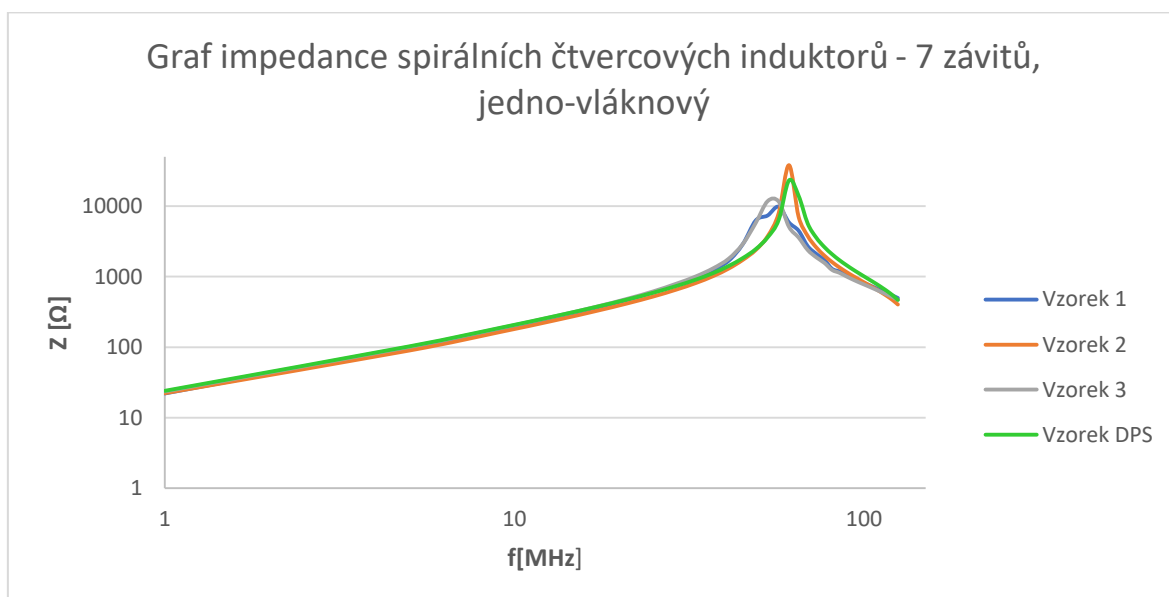
Graf 3.5 ukazuje, že s počtem úseků se rezonanční kmitočet meandrových induktorů snižuje. Z toho grafu taktéž vyplývá, že vlastní rezonance vzorku tvořeného jedno-vláknovou strukturou má větší strmost a špičkovou hodnotu impedance než v případě vzorků plné struktury. Vlastní rezonanční kmitočet vyšitých meandrových induktorů se pohybuje mezi hodnotou 180 – 360 MHz.

### 3.2.2.3 Spirální čtvercové induktory

Grafy 3.6 a 3.7 ukazují frekvenční závislosti impedance všech vyšitých testovacích vzorků určité složitosti spirálního čtvercového induktoru v porovnání s testovacím vzorkem realizovaným na DPS.

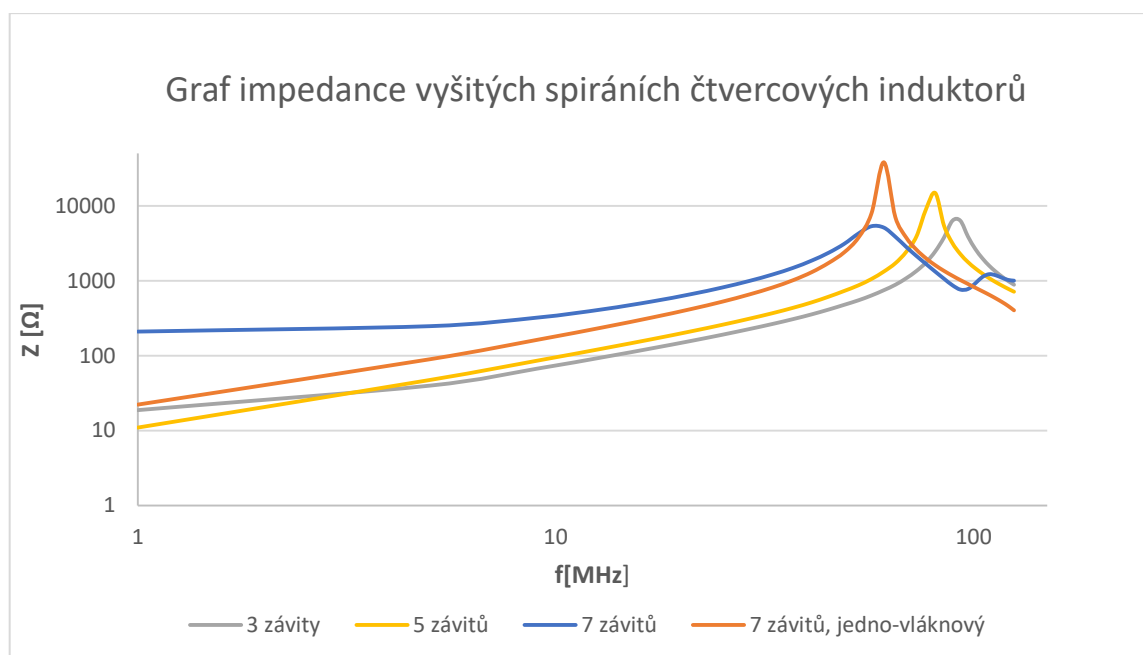


Graf 3.6 Frekvenční závislost impedance všech vzorků spirálního čtvercového induktoru – 10 úseků

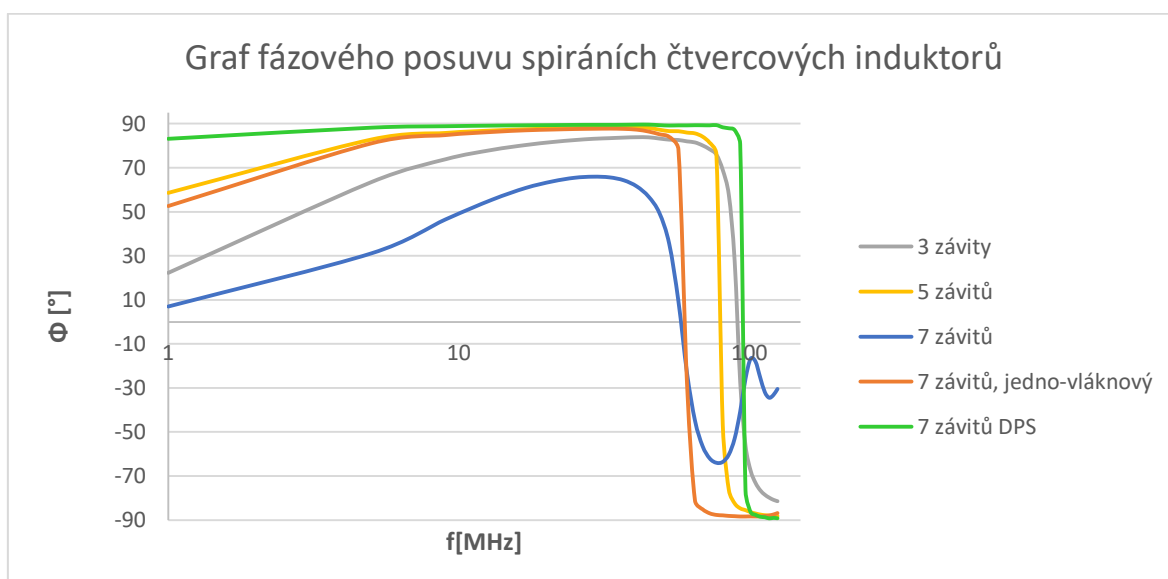


Graf 3.7 Frekvenční závislost impedance všech vzorků spirálního čtvercového induktoru – 10 úseků, jedno-vláknový

Podobně jako u meandrových induktorů se dá z grafů vypožorovat, že vzorky vyšité jedno-vláknovou strukturou mají téměř srovnatelné průběhy se vzorkem realizovaným na DPS. A opět to neplatí pro vyšité vzorky plných struktur, kde vzorek realizovaný na DPS dosahuje vlastní rezonance na vyšší frekvenci, její průběh má oproti vyšitým vzorkům větší strmost a dosahuje vyšší hodnoty činitele kvality.



Graf 3.8 Frekvenční závislost impedance vyšitých vzorků spirálního čtvercového induktoru



Graf 3.9 Frekvenční závislost fázového posuvu vzorků spirálního čtvercového induktoru

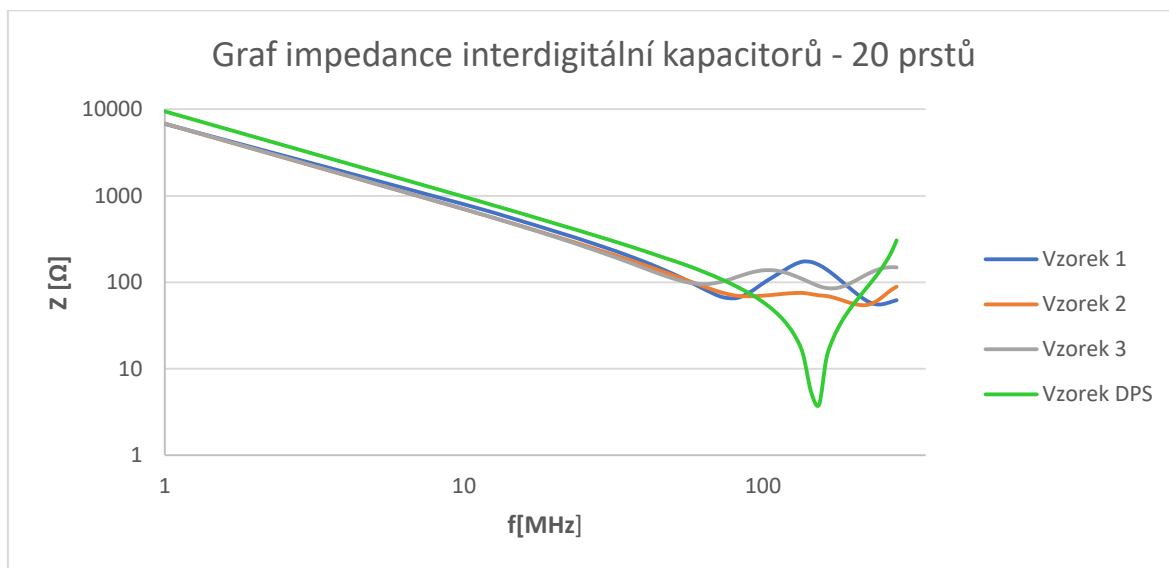
Graf 3.8 znázorňuje vzájemné porovnání vyšitých spirálních čtvercových induktorů různé složitosti. Na tomto grafu je obdobně jako u meandrového induktoru vidět, že se zvyšujícím se počtem závitů se rezonanční kmitočet snižuje. Z grafu taktéž vyplývá, že vlastní rezonance vzorku tvořeného jedno-vláknovou strukturou dosahuje vyšší hodnoty činitele kvality než v případě vzorků plných struktur. Rezonanční kmitočet vyšitých spirálních čtvercových induktorů se pohybuje mezi hodnotou 60 – 95 MHz.

V grafu 3.9 jsou porovnány frekvenční závislosti fázového posuvu spirálních čtvercových induktorů. Tento graf zřetelně ukazuje, že u 7 závitového vyšitého vzorku

s plnou strukturou se ve velké míře projevuje vysoká hodnota činného odporu, což má za následek snižování indukční reaktance. Na tomto vzorku byla naměřena hodnota činného odporu  $180 \Omega$ . Fázový posuv tohoto vzorku dosahuje maximální hodnoty  $65^\circ$ , naproti tomu jedno-vláknový vyšitý vzorek stejně složité struktury 7 závitů dosahuje fázového posuvu  $90^\circ$ , což je shodná hodnota se vzorkem realizovaným na DPS. Vysoká hodnota činného odporu těchto vzorků je diskutována v kapitole 3.1.3.

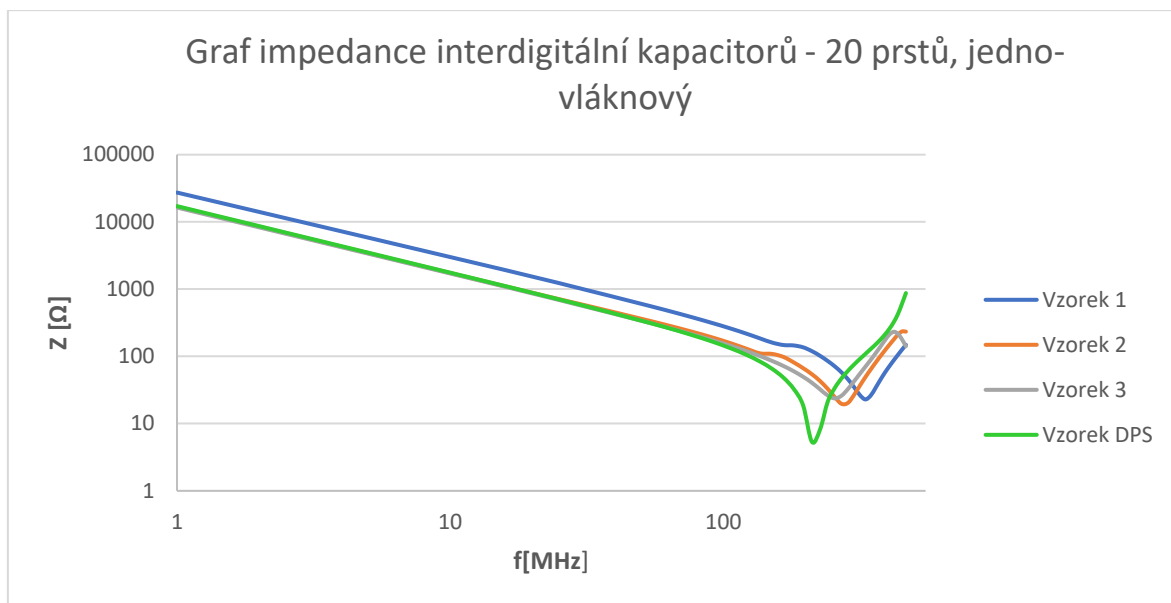
### 3.2.2.4 Interdigitální kapacitory

Grafy 3.10 a 3.11 ukazují frekvenční závislosti impedance všech vyšitých testovacích vzorků určité složitosti interdigitálního kapacitoru v porovnání s testovacím vzorkem realizovaným na DPS. Grafy 3.12 a 3.13 ukazují frekvenční závislosti fázového posuvu všech vyšitých testovacích vzorků určité složitosti interdigitálního kapacitoru v porovnání s testovacím vzorkem realizovaným na DPS.

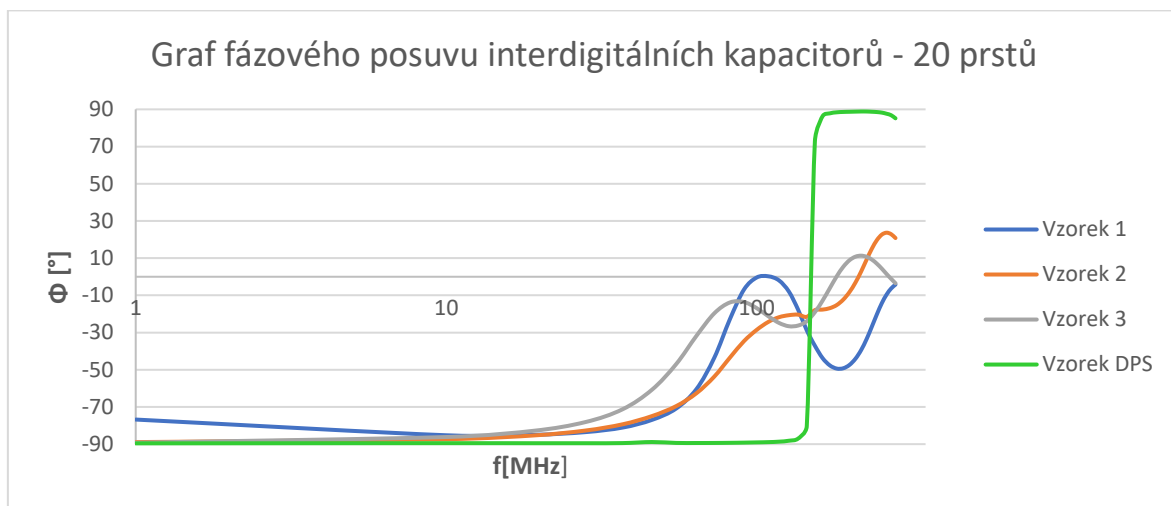


Graf 3.10 Frekvenční závislost impedance všech vzorků interdigitálního kapacitoru – 20 prstů

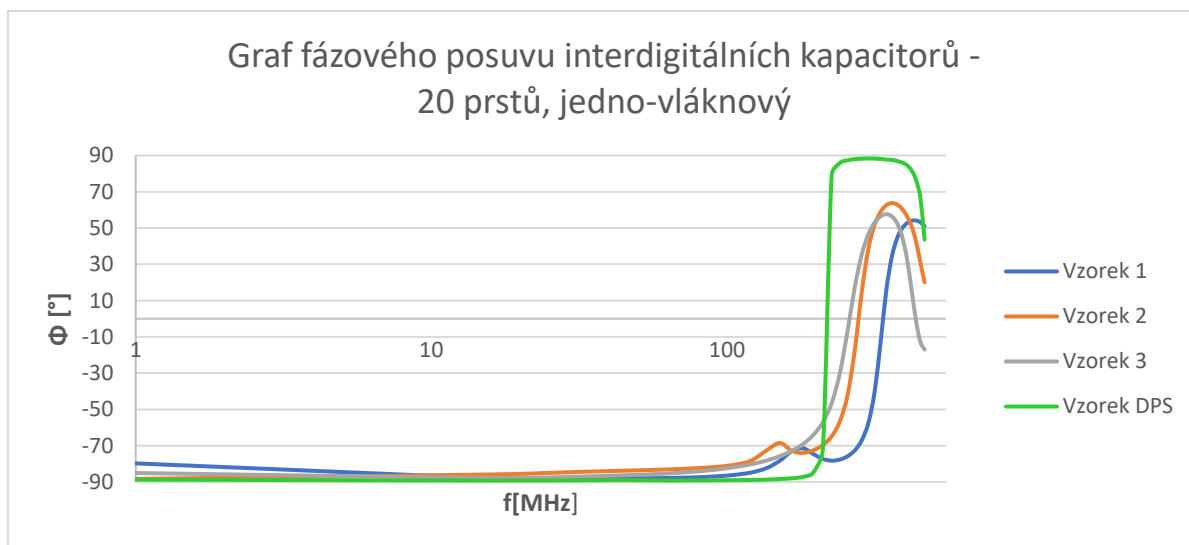




Graf 3.11 Frekvenční závislost impedance všech vzorků interdigitálního kapacitoru – 20 prstů, jedno-vláknový



Graf 3.12 Frekvenční závislost fázového posuvu všech vzorků interdigitálního kapacitoru – 20 prstů



Graf 3.13 Frekvenční závislost fázového posuvu všech vzorků interdigitálního kapacitoru – 20 prstů, jedno-vláknový

Z *grafu 3.10* je patrné, že u vyšitých interdigitálních kapacitorů plné struktury nedochází při vlastní rezonanci ke strmému poklesu impedance tak jako u vzorku realizovaného na DPS. To je zapříčiněno nízkou hodnotou činitele kvality těchto vzorků. Hodnota impedance kolísá v úzkém frekvenčním pásmu okolo své minimální hodnoty, která je přibližně o  $50 \Omega$  vyšší než v případě vzorku na DPS. U vyšitých interdigitálních dvacetiprstových kapacitorů dochází k vlastní rezonanci při frekvenci přibližně 80 MHz. Kolísání je pozorovatelné také u frekvenční závislosti fázového posuvu těchto vzorků v *grafu 3.12*. K vlastní rezonanci vzorku na DPS dochází při frekvenci okolo 150 MHz. V *grafech 3.11* a *3.13* je vidět, že u jedno-vláknových vyšitých kapacitorů o stejném počtu prstů k takovému kolísání nedochází. Činitel kvality jedno-vláknových vzorků je vyšší než v případě vzorků plné struktury, nicméně také nedosahuje hodnoty vzorku realizovaného na DPS. Vlastní rezonanční frekvence vyšitých jedno-vláknových dvacetiprstových kapacitorů se pohybují kolem hodnoty 280 MHz. U vzorku realizovaného na DPS dochází k vlastní rezonanci při frekvenci 210 MHz.

## Závěr

Tvorba vodivých motivů na textilních substrátech je velice zajímavá, důležitá a rychle se rozvíjející oblast. Hlavní přínos této práce spočívá v návrhu a realizaci testovacích vzorků vyšíváných pasivních elektronických součástek, ověření jejich elektrických parametrů a porovnání těchto parametrů s vypočtenými teoretickými hodnotami a s elektrickými parametry vzorků realizovaných pomocí fotolitografie na deskách plošných spojů.

Vzhledem k tomu, že jsou vyšívány elektronické pasivní součástky novou technologií a pro návrh těchto prvků v době psaní diplomové práce neexistovala žádná pravidla, vycházelo se při návrhu testovacích vzorků z výpočtů pro planární technologii. V práci jsou navrženy vyšívány vzorky rezistorů, meandrových induktorů, spirálních čtvercových induktorů a interdigitálních kapacitorů různé geometrické složitosti, z nichž vzorky nejsložitější geometrické struktury jsou ještě vyrobeny tak, aby jejich struktura byla tvořena jen jedním vodivým vláknem. Všechny takto navržené vzorky byly také pro porovnání vyrobeny běžnou metodou fotolitografie a následného leptání na deskách plošných spojů. Návrhem a realizací těchto testovacích vzorků se zabývá kapitola 2. U všech testovacích vzorků byly proměřeny jejich základní elektrické parametry a také frekvenční závislosti těchto elektrických parametrů. V rámci diplomové práce bylo celkem realizováno a otestováno 40 vzorků pasivních elektronických součástek.

Samotným testováním realizovaných vzorků se zabývá kapitola 3. Naměřené hodnoty ukázaly, že základní elektrické parametry vyšítých vzorků se výrazně neliší od vypočtených teoretických hodnot. Nejmenší rozdíly od těchto vypočtených hodnot vykazují vyšíté vzorky tvořené jedno-vláknovou strukturou. Rovněž rezonanční charakteristiky vyšítých vzorků jedno-vláknových struktur se nejvíce přibližují vzorkům realizovaných pomocí fotolitografie na deskách plošných spojů. Jedno-vláknově vyrobené vyšívány pasivní elektronické součástky tedy vykazují nejlepší elektrické vlastnosti. Předmětem dalších zkoumání bude zjištění mechanických vlastností takto vyrobených součástek a také ověření změn jejich elektrických parametrů v závislosti na mikroklimatických změnách a změnách způsobených mechanickým a chemickým namáháním. Vyšívány pasivní elektronické součástky mohou být následně v závislosti na těchto poznacích navrhovány individuálně pro konkrétní technologie a aplikace.

Tato práce byla vypracována dle bodů uvedených v zadání a pokynů vedoucího práce.  
Všechny body zadání byly splněny.

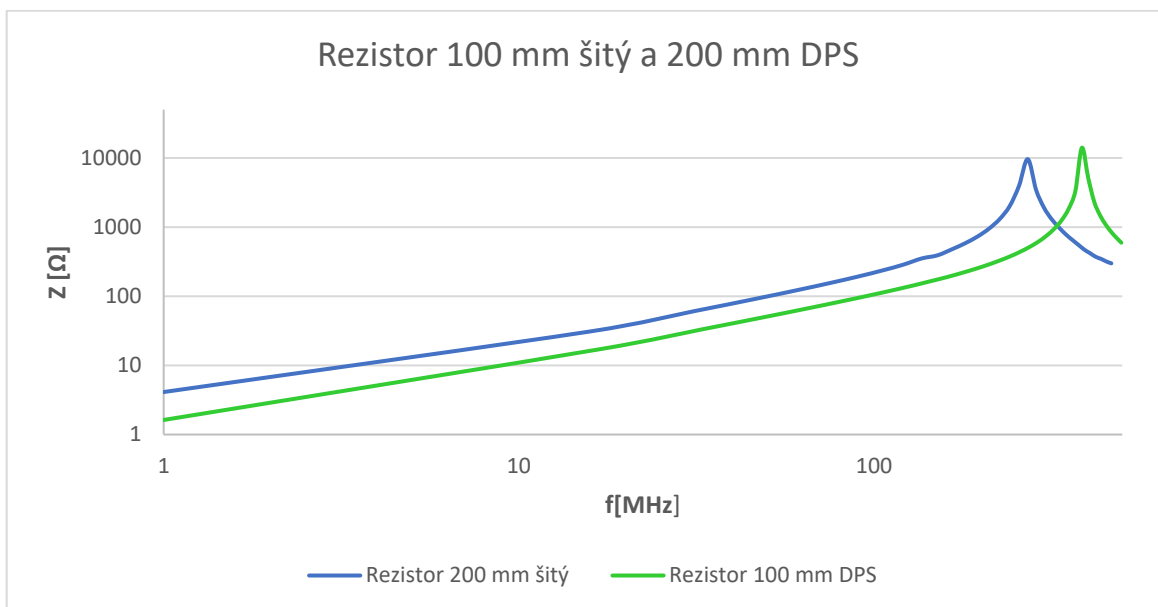
## Seznam literatury

- [1] MATTILA, H.R. *Intelligent Textiles and Clothing*. North America: Woodhead Publishing Limited, 2006.
- [2] Electrical Characterization of Screen-Printed Circuits on the Fabric. *IEEE Transactions on Advanced Packaging* [online]. 2010, 33(1), 196-205 [cit. 2016-12-13]. DOI: 10.1109/TADVP.2009.2034536. ISSN 1521-3323. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5345718/>
- [3] YANG, Kai, Russel TORAH, Yang WEI, Steve BEEBY a John TUDOR. Waterproof and durable screen printed silver conductive tracks on textiles. *Textile Research Journal* [online]. 2013, 83(19), 2023-2031 [cit. 2016-12-13]. DOI: 10.1177/0040517513490063. ISSN 0040-5175. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0040517513490063>
- [4] TARIQ BASHIR. *Conjugated Polymer-based Conductive Fibers for Smart Textile Applications* [online]. 2013 [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:877039/FULLTEXT01.pdf>
- [5] SOFT SENSING STRUCTURES. *Smart Textiles Design Lab Blog* [online]. The Swedish School of Textiles, 2016 [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: <http://stdl.se/?p=3864>
- [6] E-Textiles For Wearability: Review Of Integration Technologies. *Textile World* [online]. [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: <http://www.textileworld.com/textile-world/features/2010/04/e-textiles-for-wearability-review-of-integrationtechnologies/>
- [7] DRAŠAROVÁ Jana. *Délkové a plošné textilie se speciální funkcí* [online]. In: Technická univerzita v Liberci: Fakulta textilní [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: [http://www.kmi.tul.cz/studijni\\_materialy/data/2014-01-13/10-07-25.pdf](http://www.kmi.tul.cz/studijni_materialy/data/2014-01-13/10-07-25.pdf)
- [8] TORSTEN Linz, Christine Kallmayer, Rolf Aschenbrenner, Herbert Reichl. *Embroidering Electrical Interconnects with Conductive Yarn for The Integration of Flexible Electronic Modules into Fabric*. *Fraunhofer IZM* [online]. Berlin, Germany, 2014 [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/4198454\\_Embroidering\\_electrical\\_interconnects\\_with\\_conductive\\_yarn\\_for\\_the\\_integration\\_of\\_flexible\\_electronic\\_modules\\_into\\_fabric](https://www.researchgate.net/publication/4198454_Embroidering_electrical_interconnects_with_conductive_yarn_for_the_integration_of_flexible_electronic_modules_into_fabric)
- [9] HOFFMANN, Karel. *Planární mikrovlnné obvody*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 145 s. ISBN 978-80-01-03705-8.
- [10] ZÁLESKÁ, VERONIKA. *DESIGN ŠICÍHO STROJE* [online]. Brno, 2012 [cit. 2017-02-16]. Dostupné z: [http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz\\_soubor.php?id=1705](http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=1705). DIPLOMOVÁ PRÁCE. FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ.

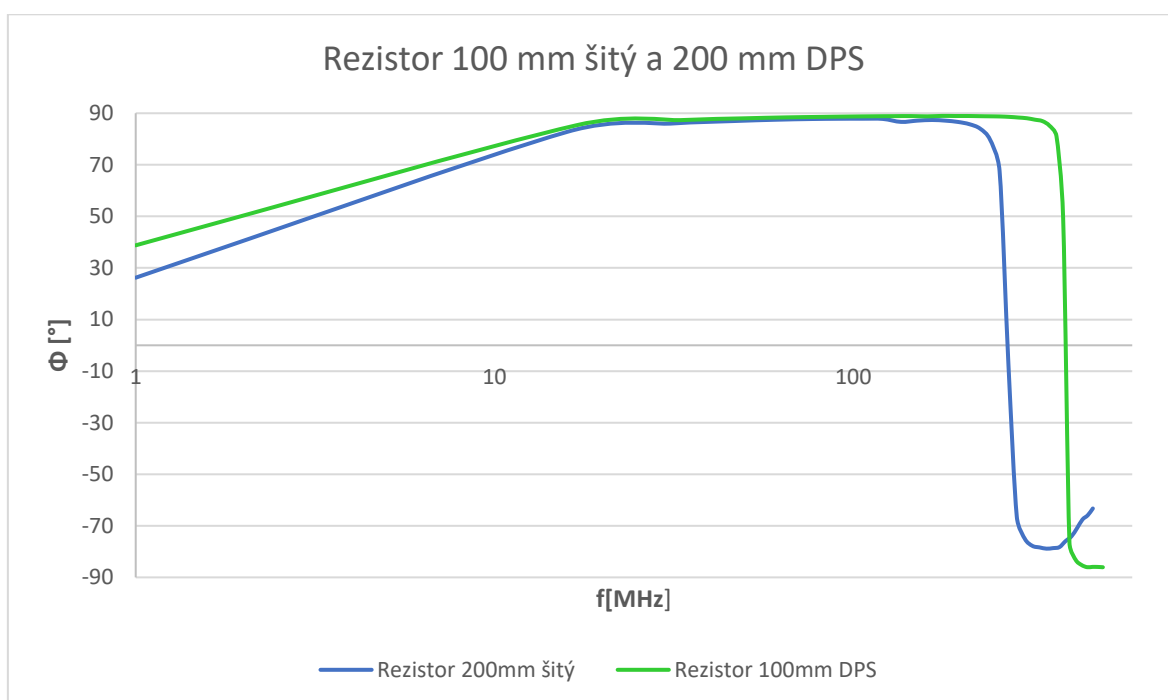
- [11] LEONHARDT, Steffen., Thomas. FALCK a Petri MÄHÖNEN. *4th International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN 2007): March 26 - March 28, 2007, RWTH Aachen University, Germany*. New York: Springer, c2007. ISBN 978-3-540-70993-0.
  
- [12] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.

## Přílohy

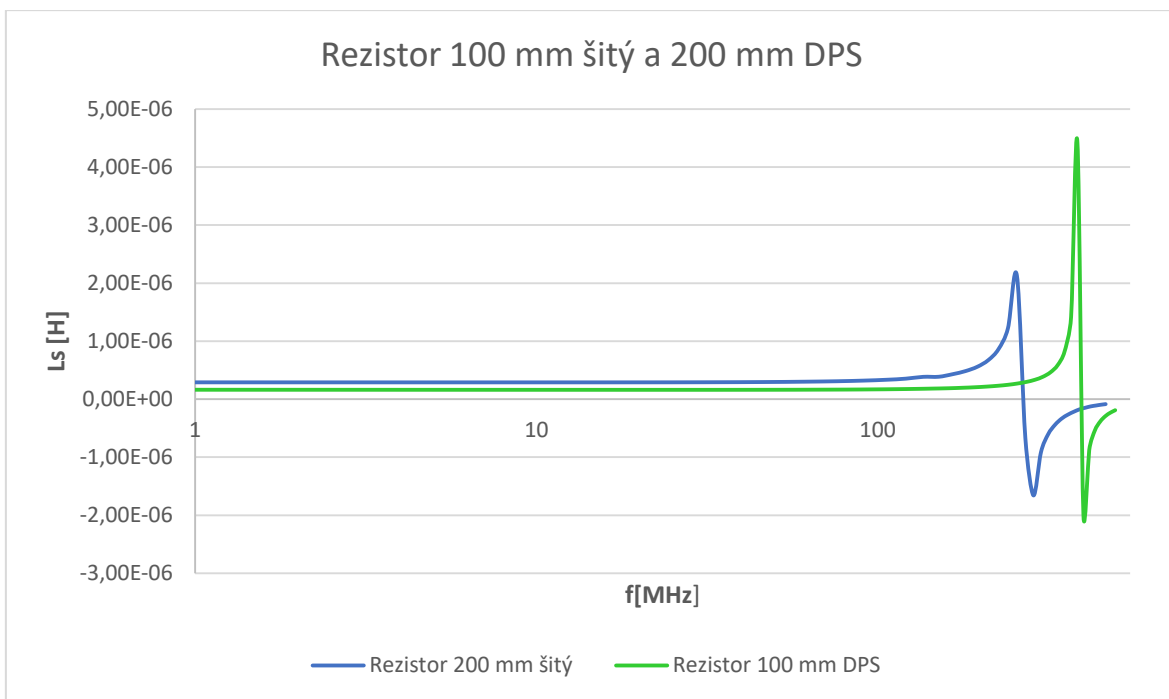
### Příloha A – Grafy frekvenčních závislostí testovaných rezistorů



Graf A.1 Frekvenční závislost indukčnosti rezistorů

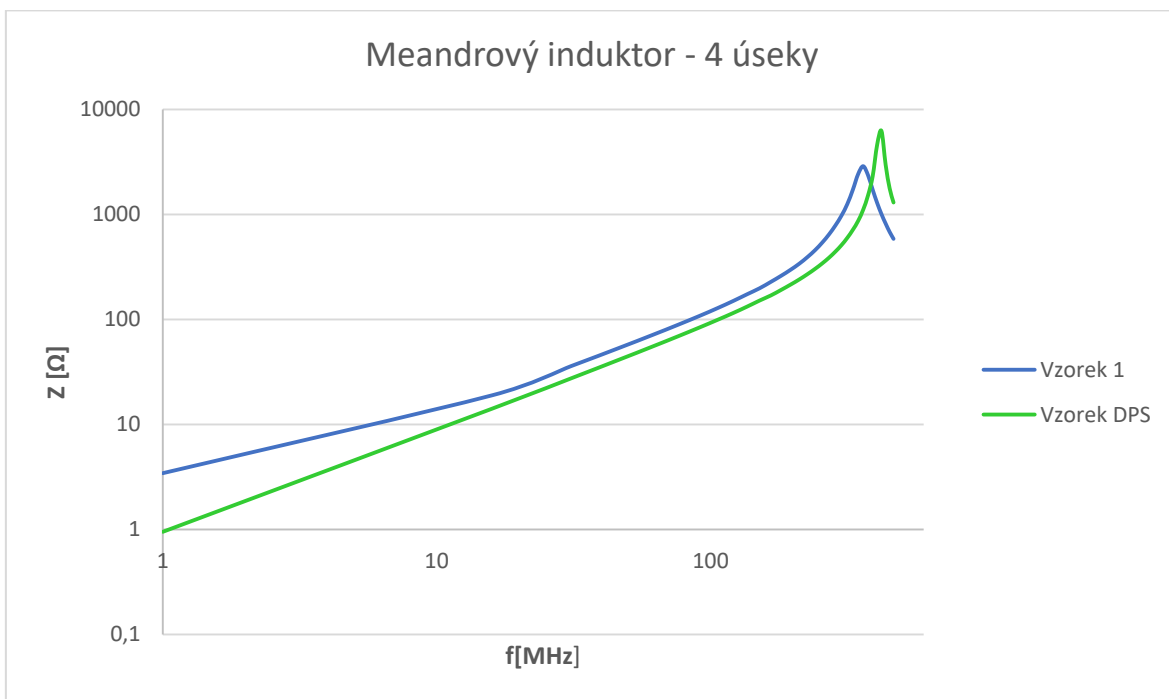


Graf A.2 Frekvenční závislost fázového posuvu rezistorů



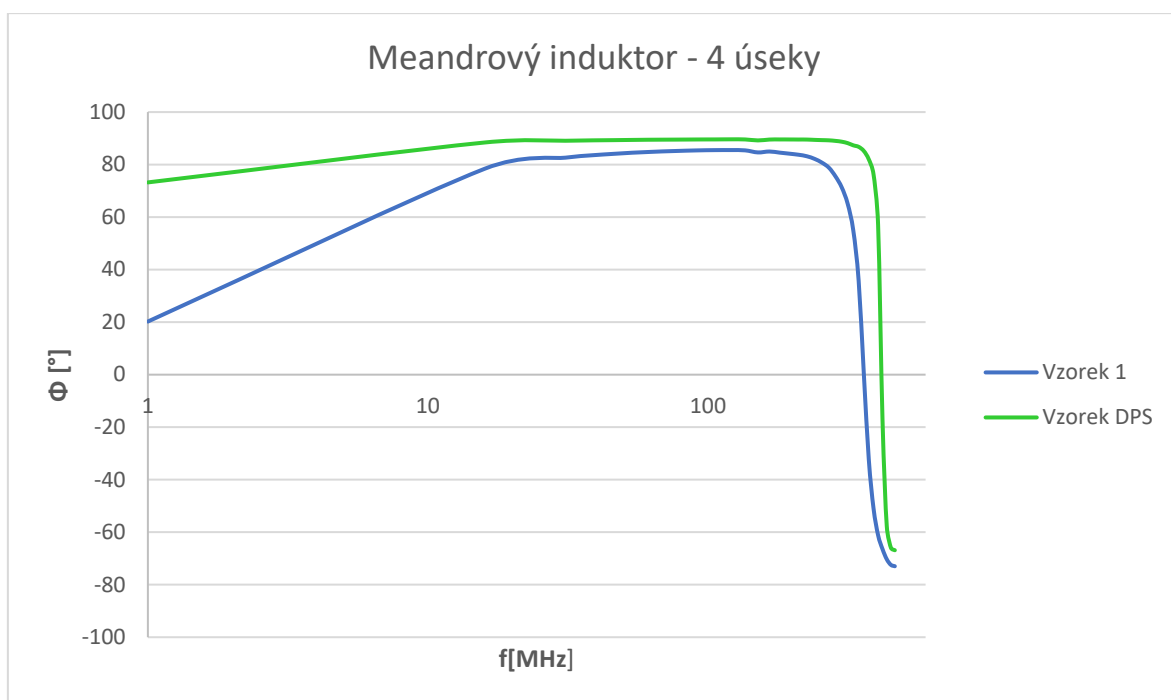
Graf A.3 Frekvenční závislost indukčnosti rezistorů

**Příloha B – Grafy frekvenčních závislostí testovaných meandrových induktorů**

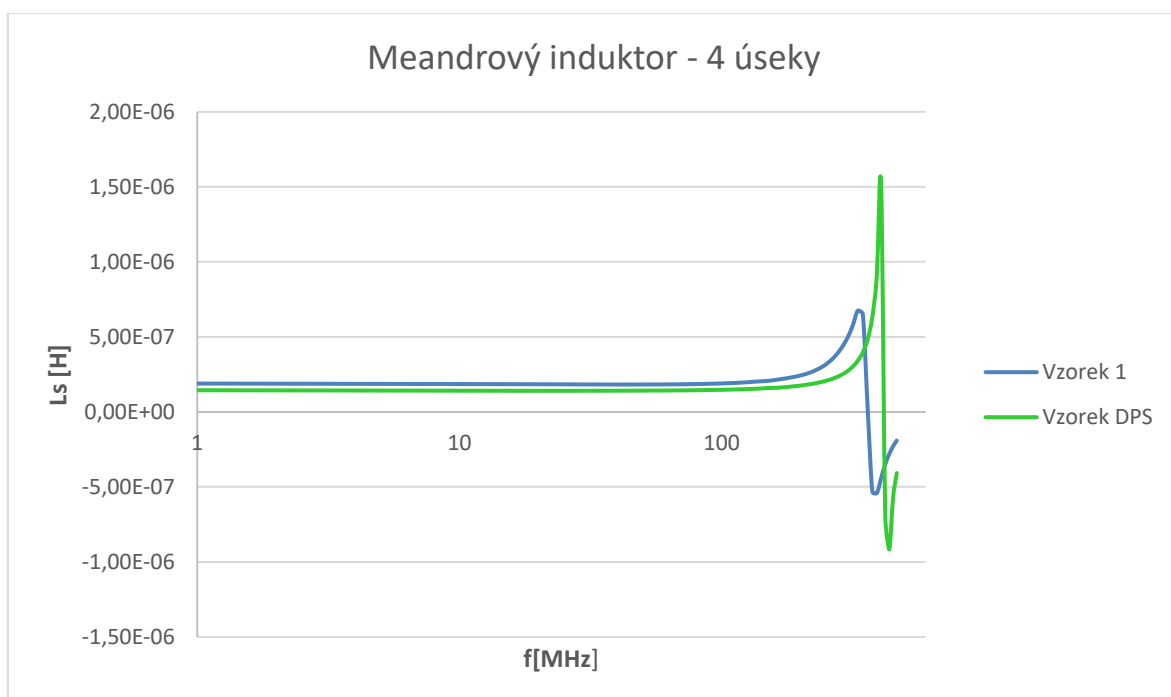


Graf B.1 Frekvenční závislost impedance meandrového induktoru – 4 úseky

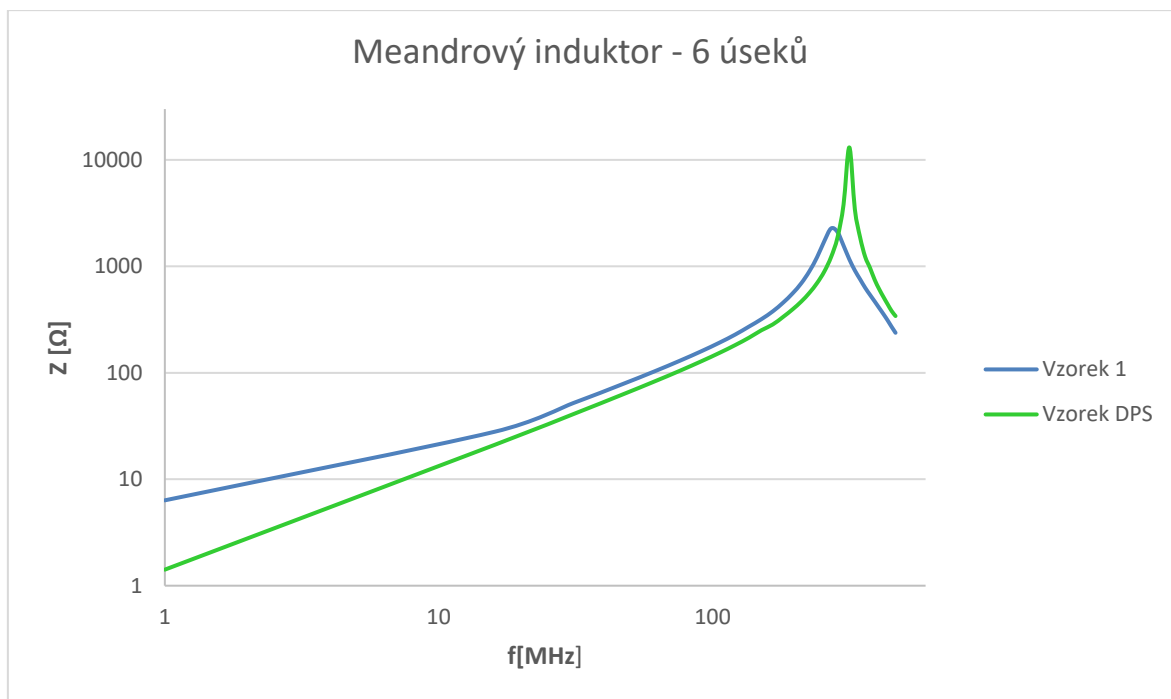




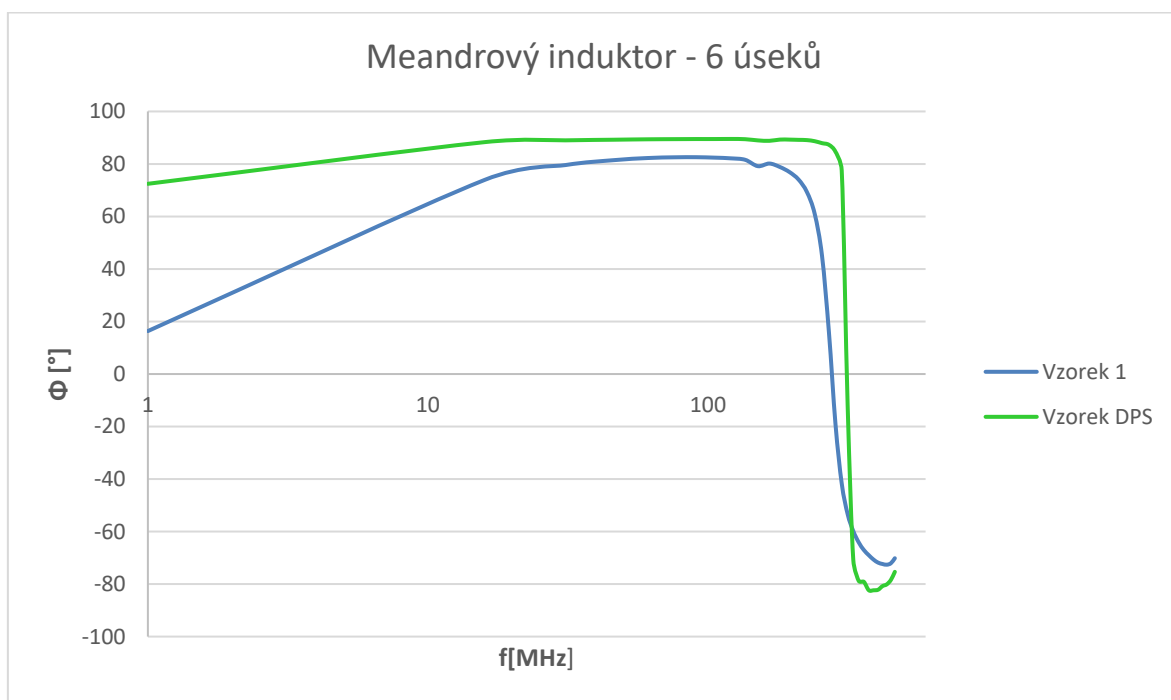
Graf B.2 Frekvenční závislost fázového posuvu meandrového induktoru – 4 úseky



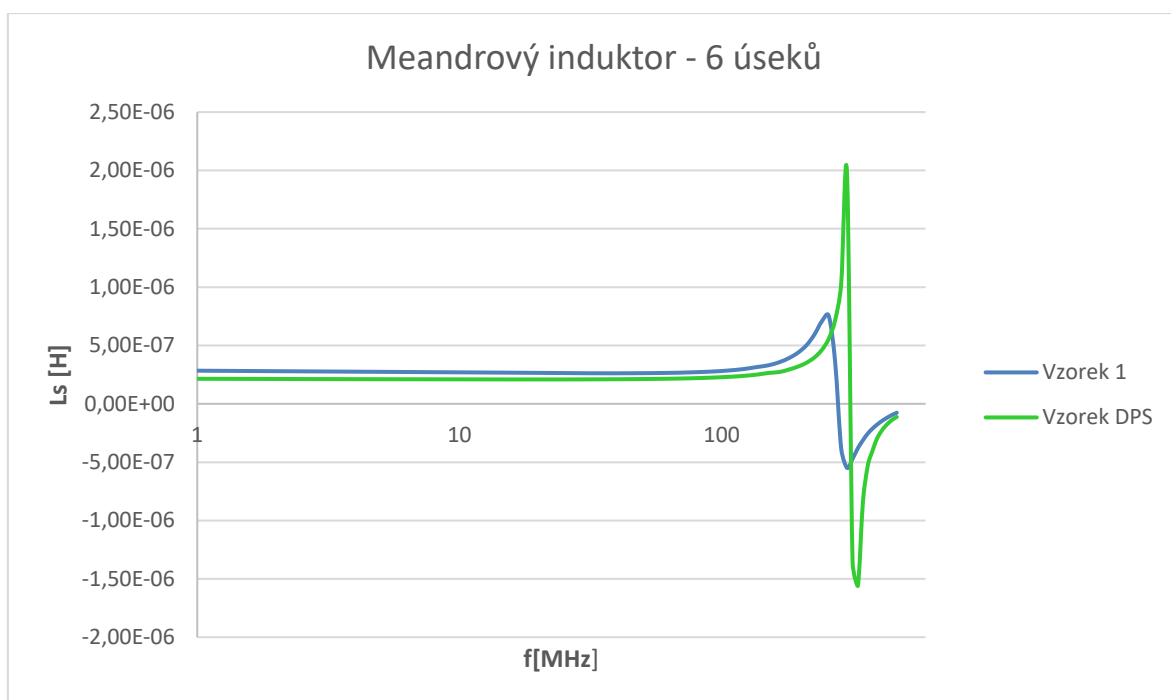
Graf B.3 Frekvenční závislost indukčnosti meandrového induktoru – 4 úseky



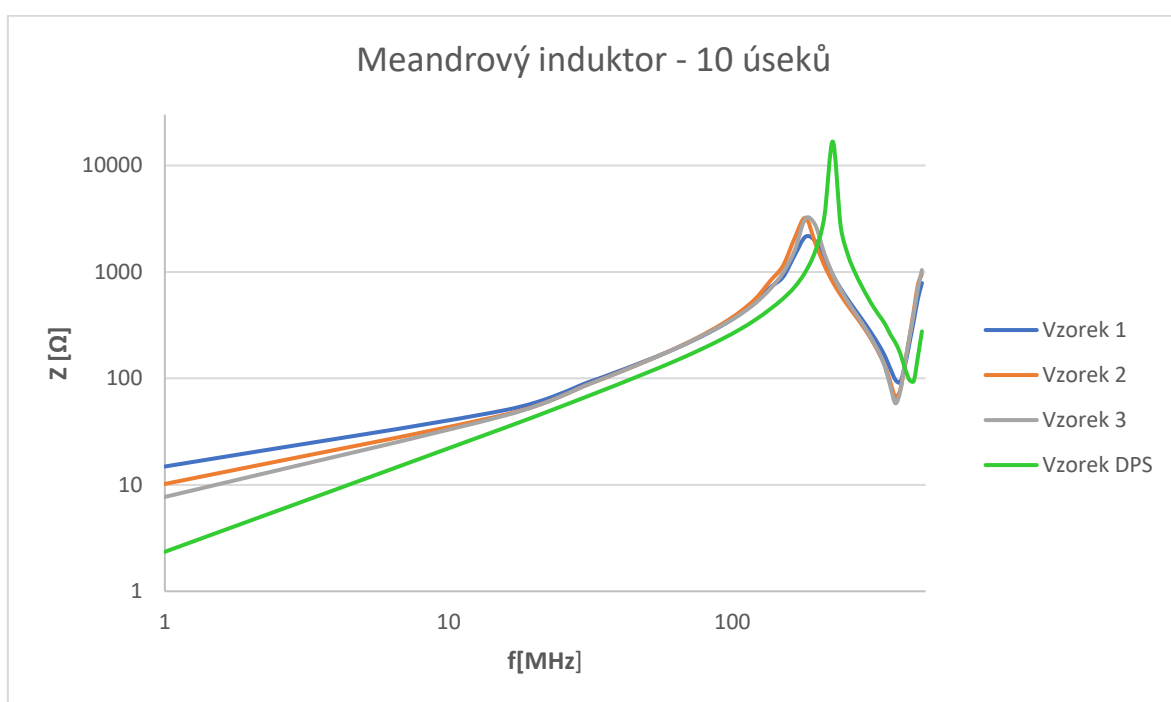
Graf B.4 Frekvenční závislost impedance meandrového induktoru – 6 úseků



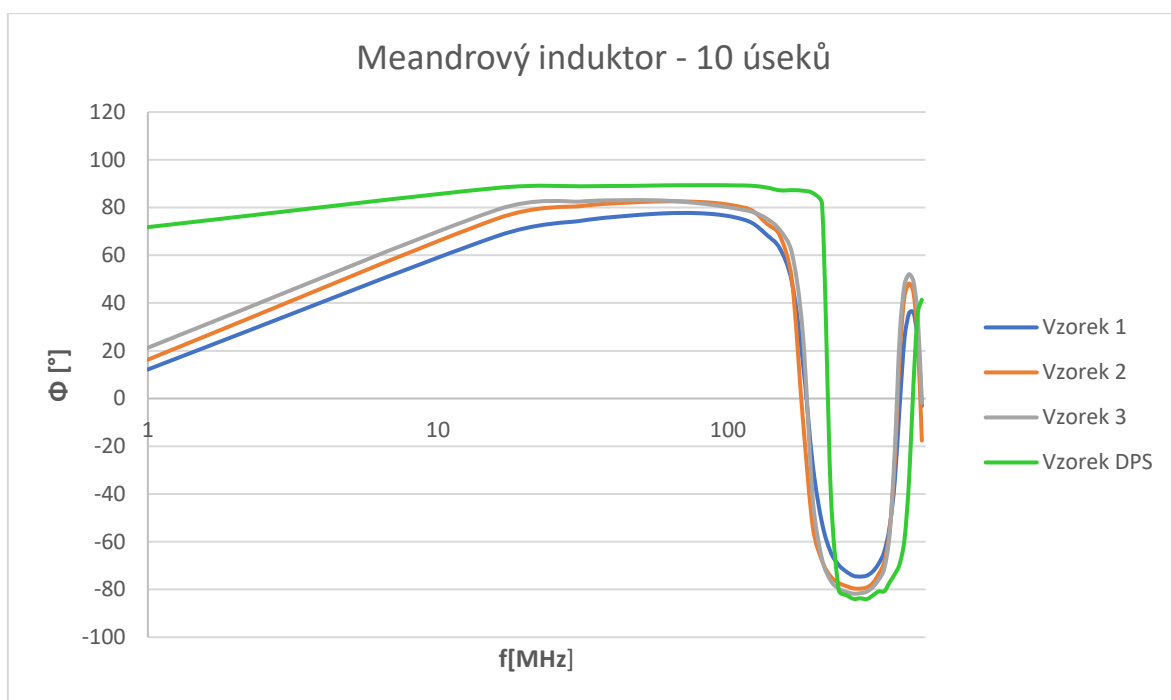
Graf B.5 Frekvenční závislost fázového posuvu meandrového induktoru – 6 úseků



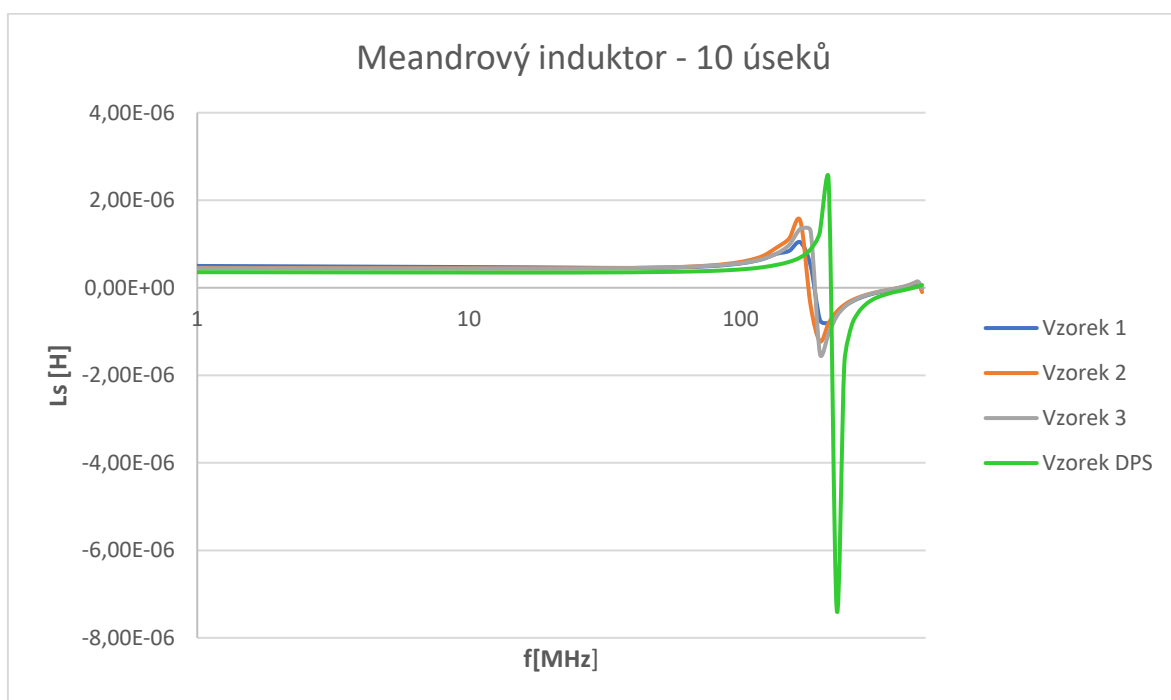
Graf B.6 Frekvenční závislost indukčnosti meandrového induktoru – 6 úseků



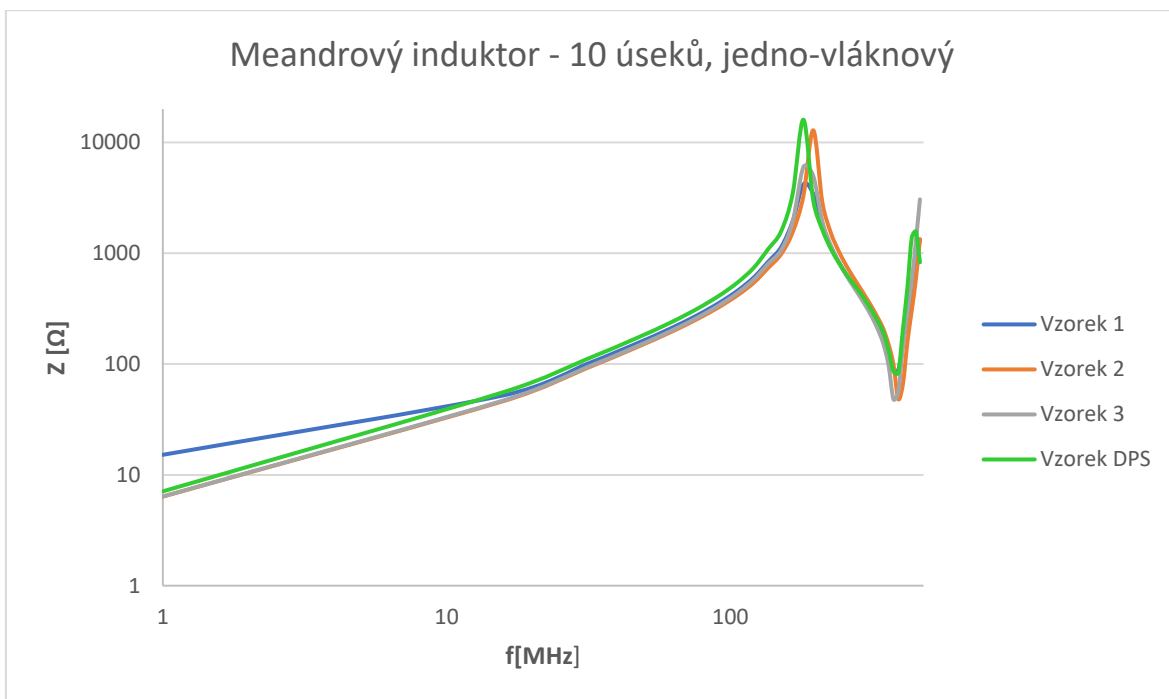
Graf B.7 Frekvenční závislost impedance meandrového induktoru – 10 úseků



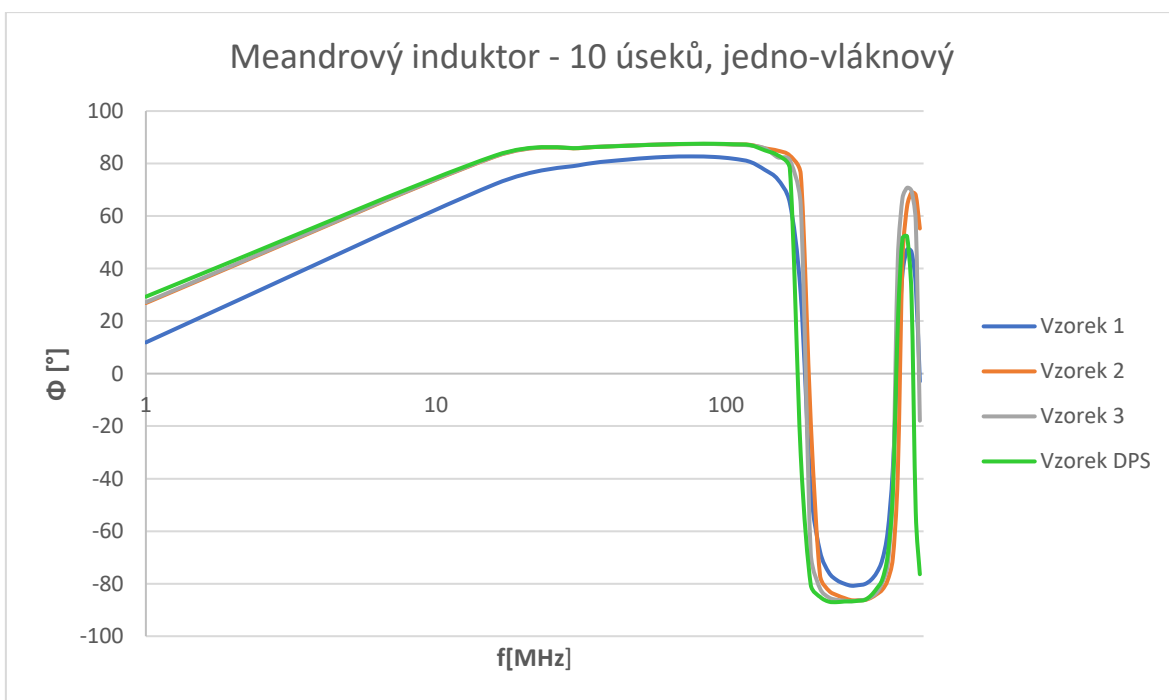
Graf B.8 Frekvenční závislost fázového posuvu meandrového induktoru – 10 úseků



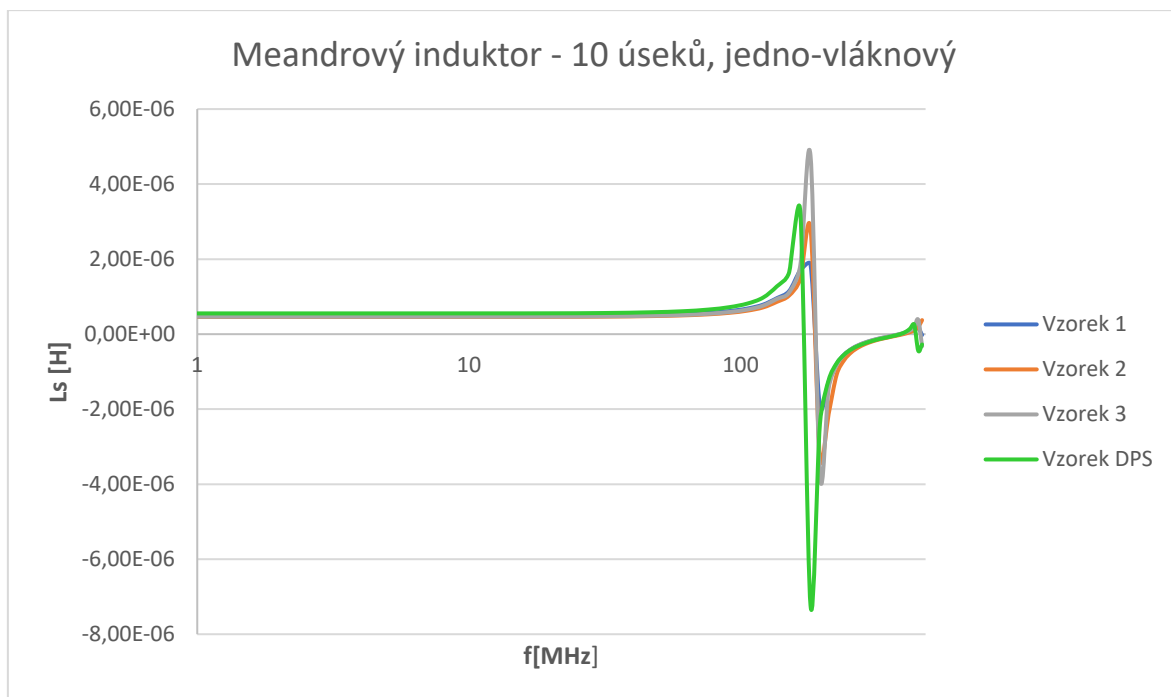
Graf B.9 Frekvenční závislost indukčnosti meandrového induktoru – 10 úseků



Graf B.10 Frekvenční závislost impedance meandrového induktoru – 10 úseků, jedno-vláknový

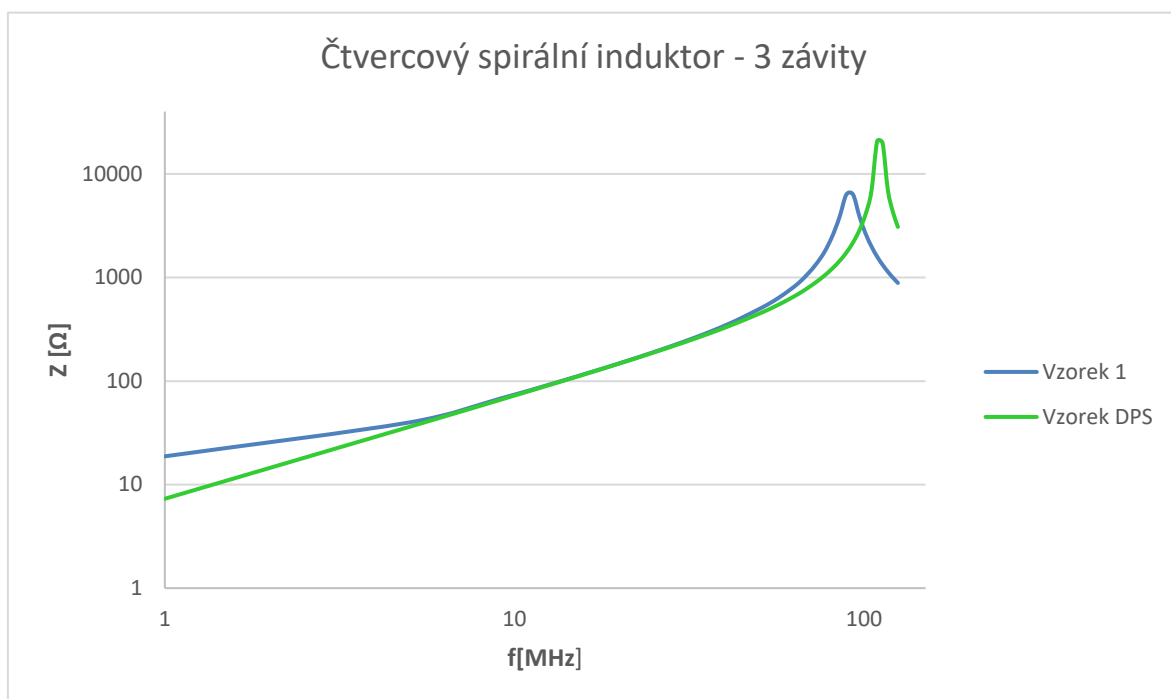


Graf B.11 Frekvenční závislost fázového posuvu meandrového induktoru – 10 úseků, jedno-vláknový

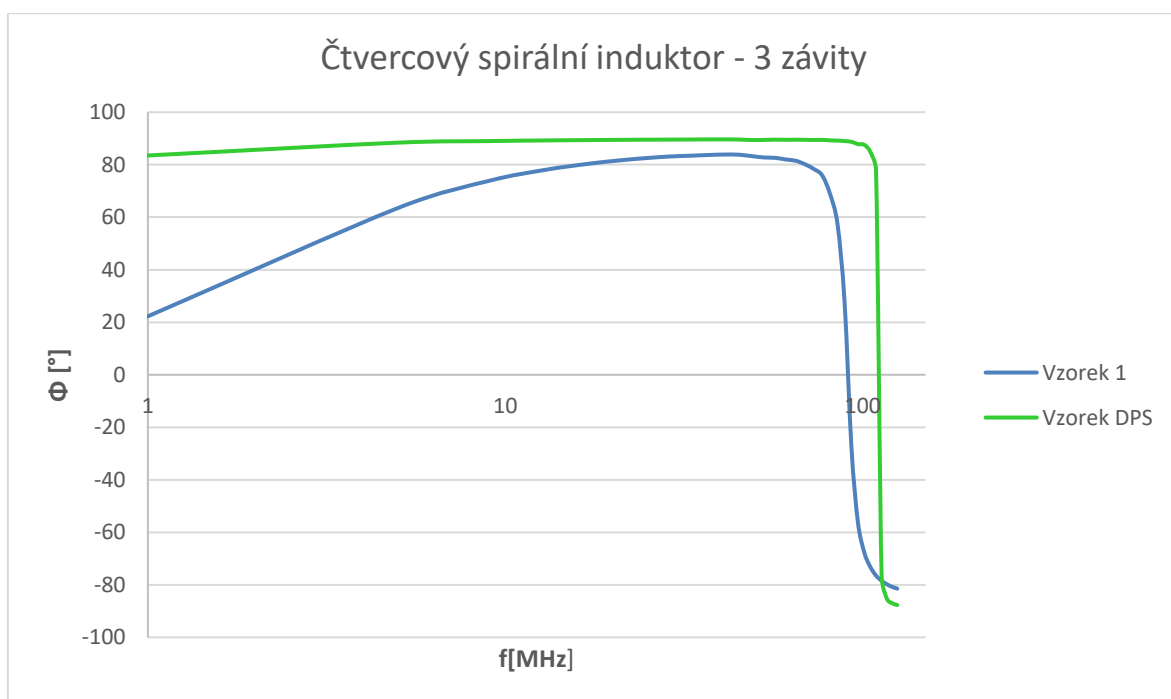


Graf B.12 Frekvenční závislost indukčnosti meandrového induktoru – 10 úseků, jedno-vláknový

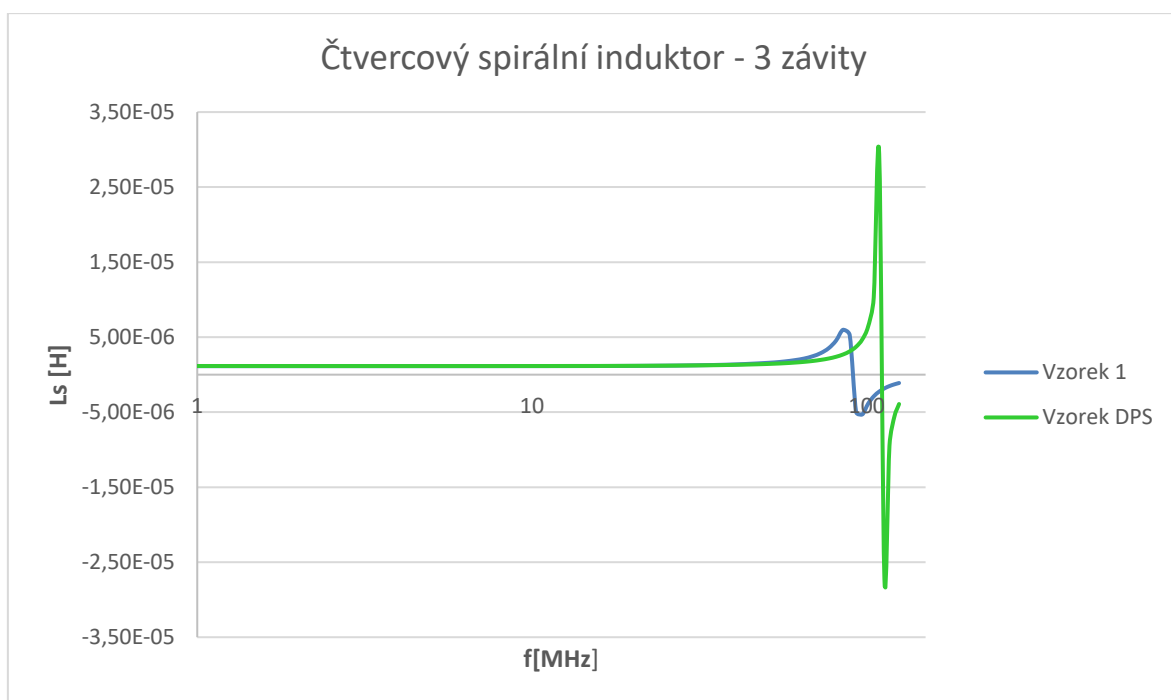
**Příloha B – Grafy frekvenčních závislostí spirálních čtvercových induktorů**



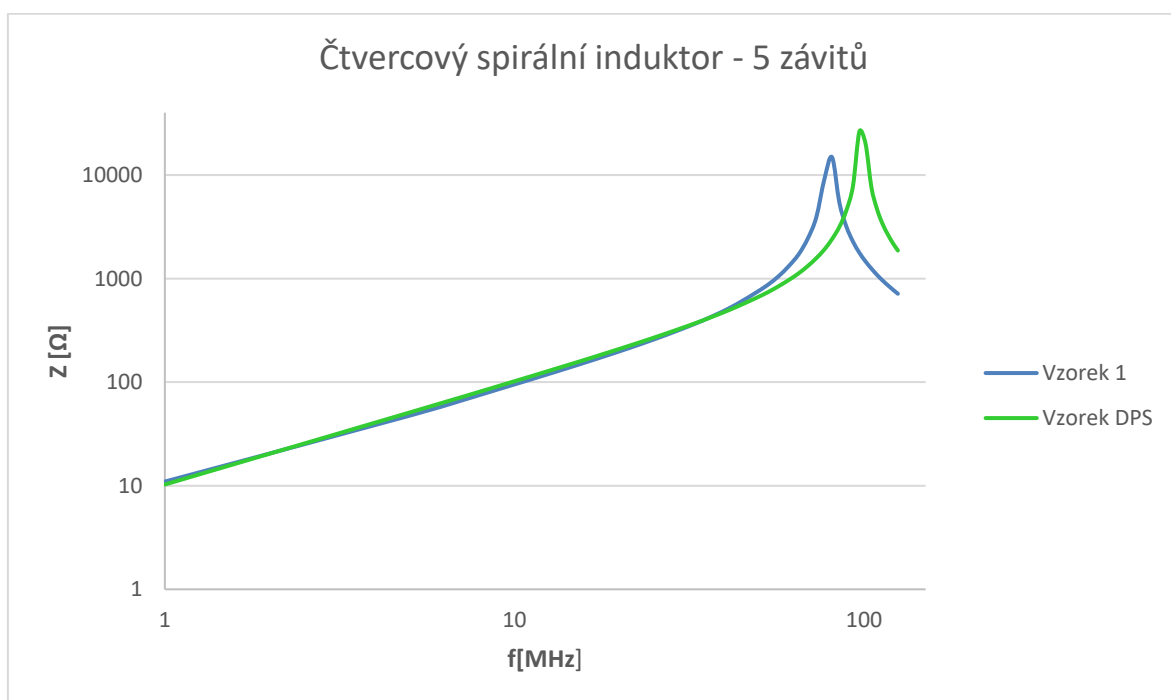
Graf C.1 Frekvenční závislost impedance spirálního čtvercového induktoru – 3 závitů



Graf C.2 Frekvenční závislost fázového posuvu spirálního čtvercového induktoru – 3 závitů

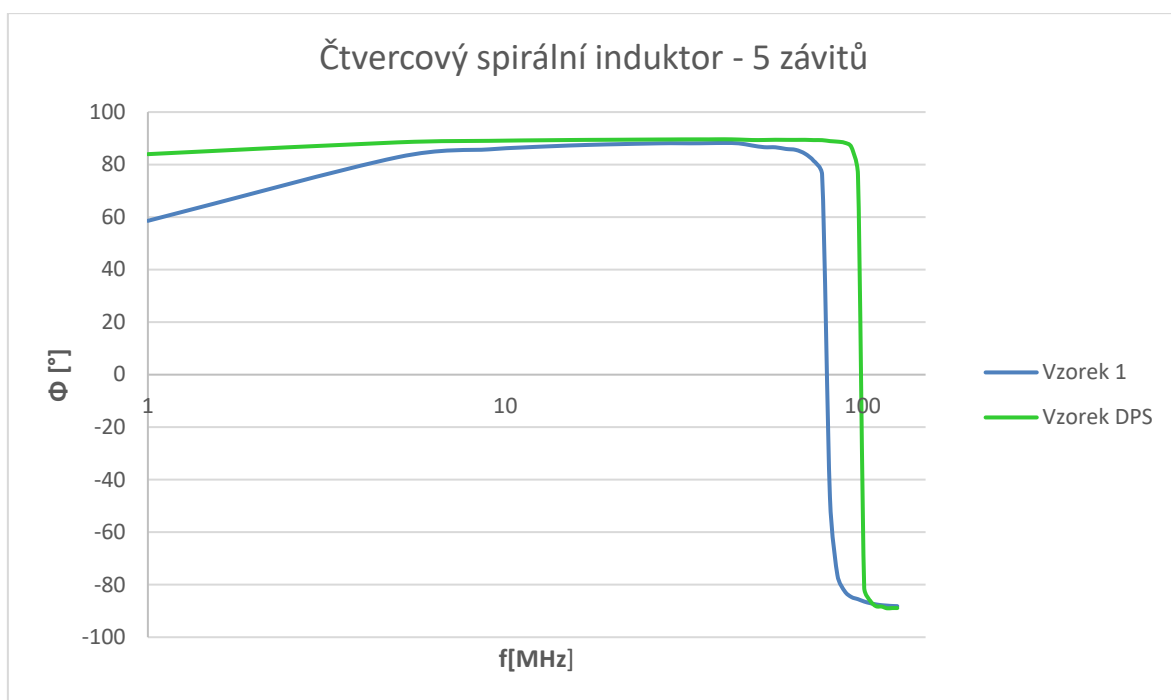


Graf C.3 Frekvenční závislost indukčnosti spirálního čtvercového induktoru – 3 závitů

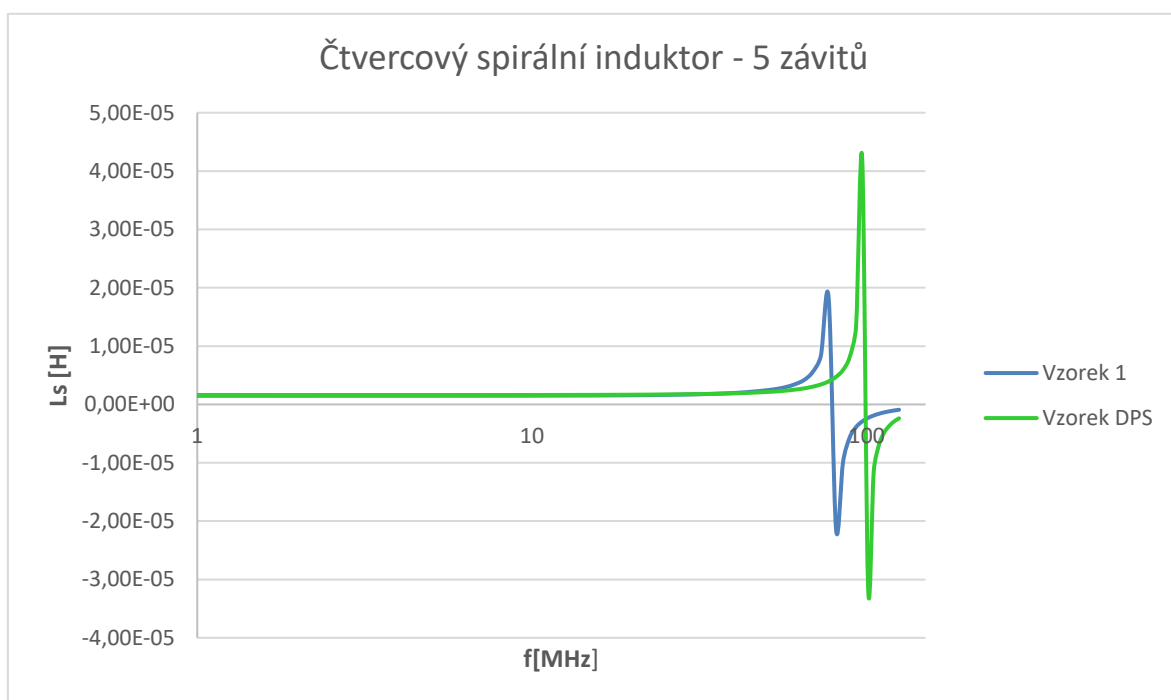


Graf C.4 Frekvenční závislost impedance spirálního čtvercového induktoru – 5 závitů

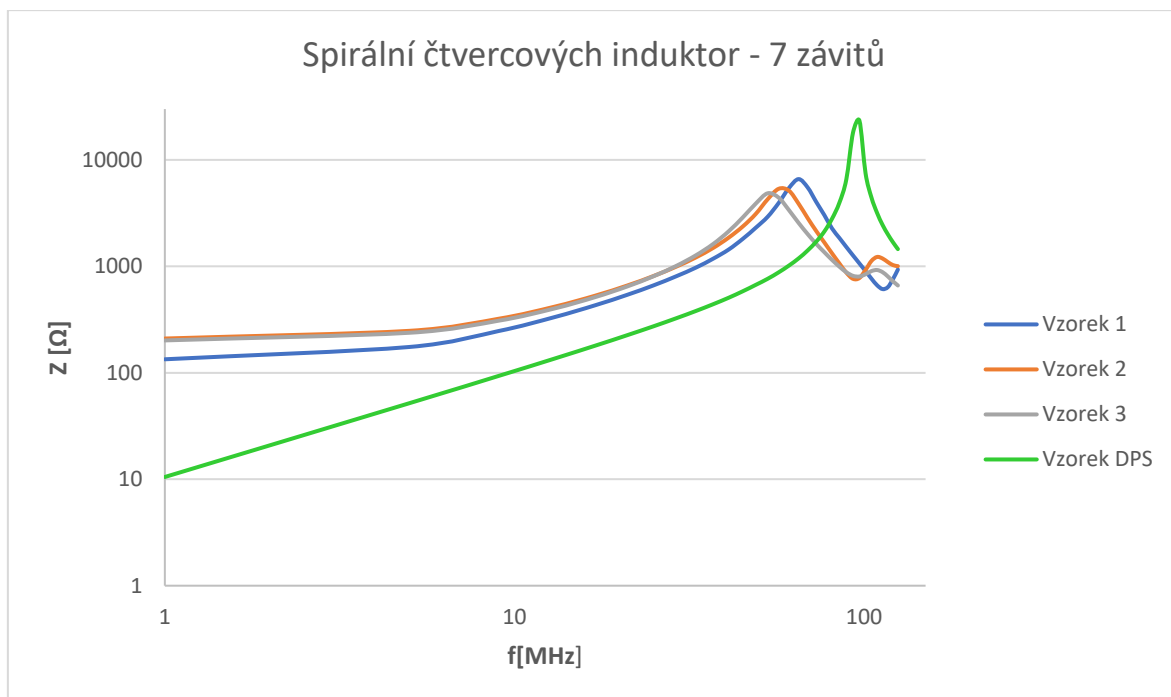




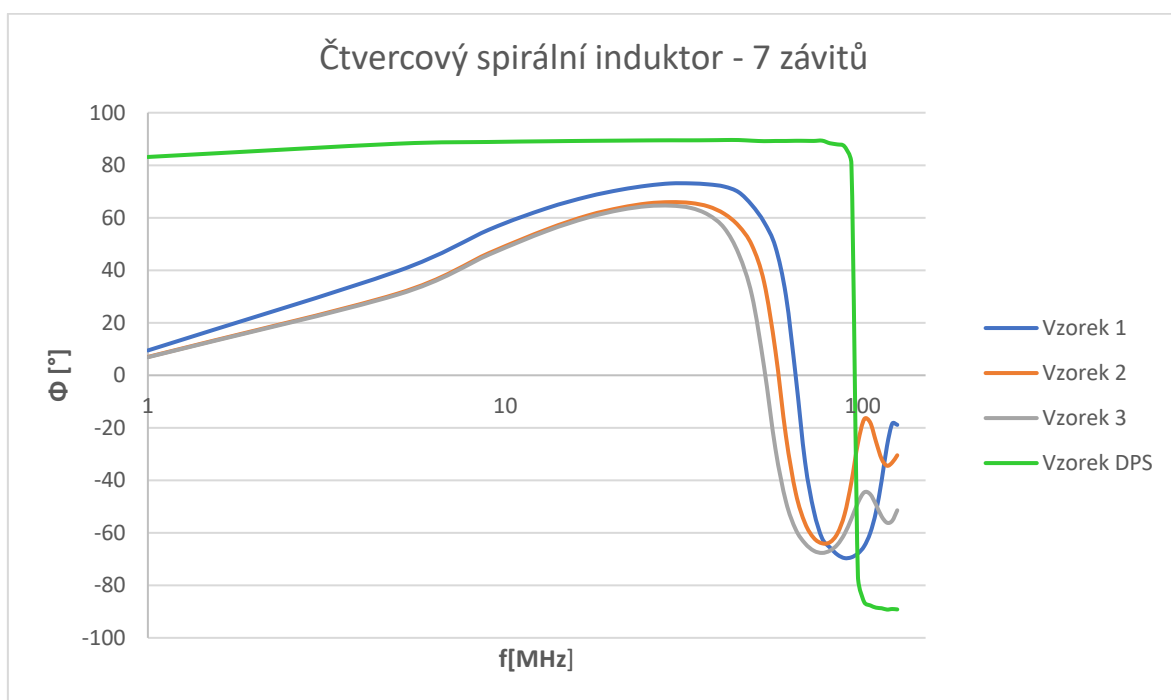
Graf C.5 Frekvenční závislost fázového posuvu spirálního čtvercového induktoru – 5 závitů



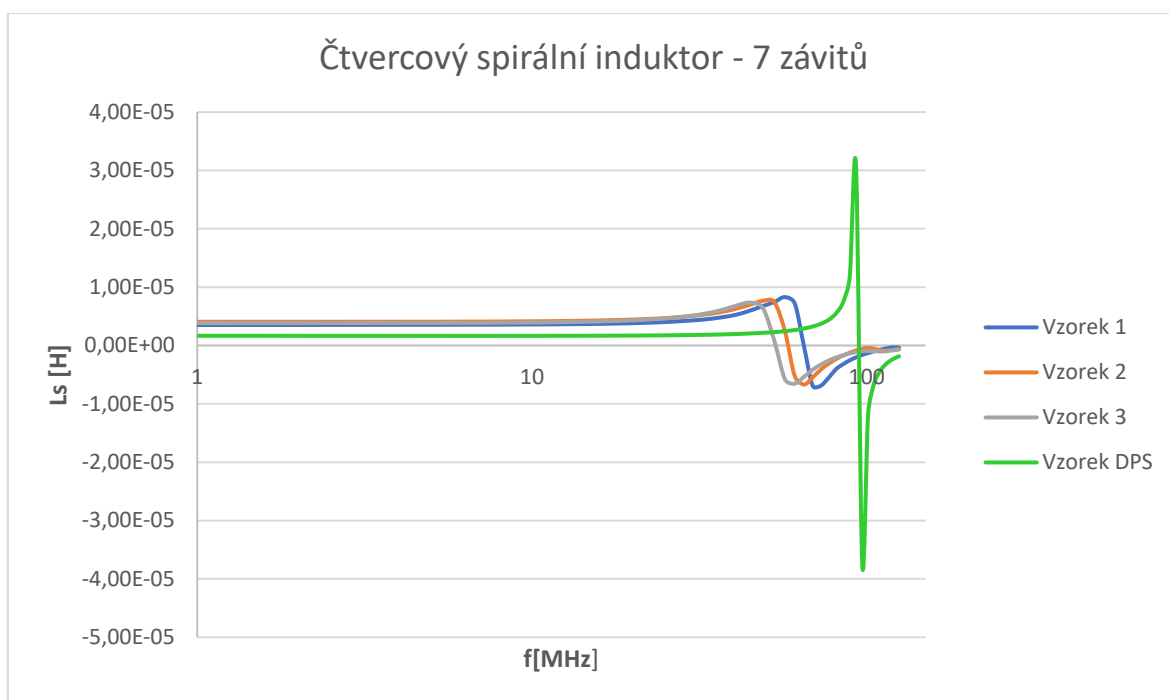
Graf C.6 Frekvenční závislost indukčnosti spirálního čtvercového induktoru – 5 závitů



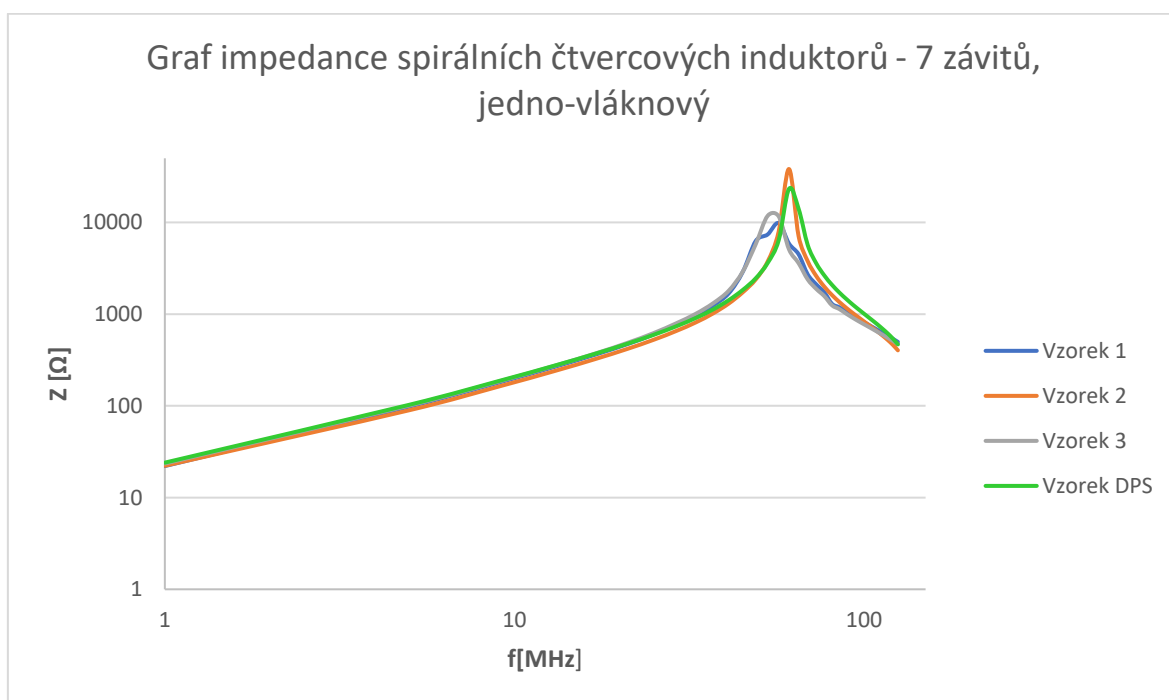
Graf C.7 Frekvenční závislost impedance spirálního čtvercového induktoru – 7 závitů



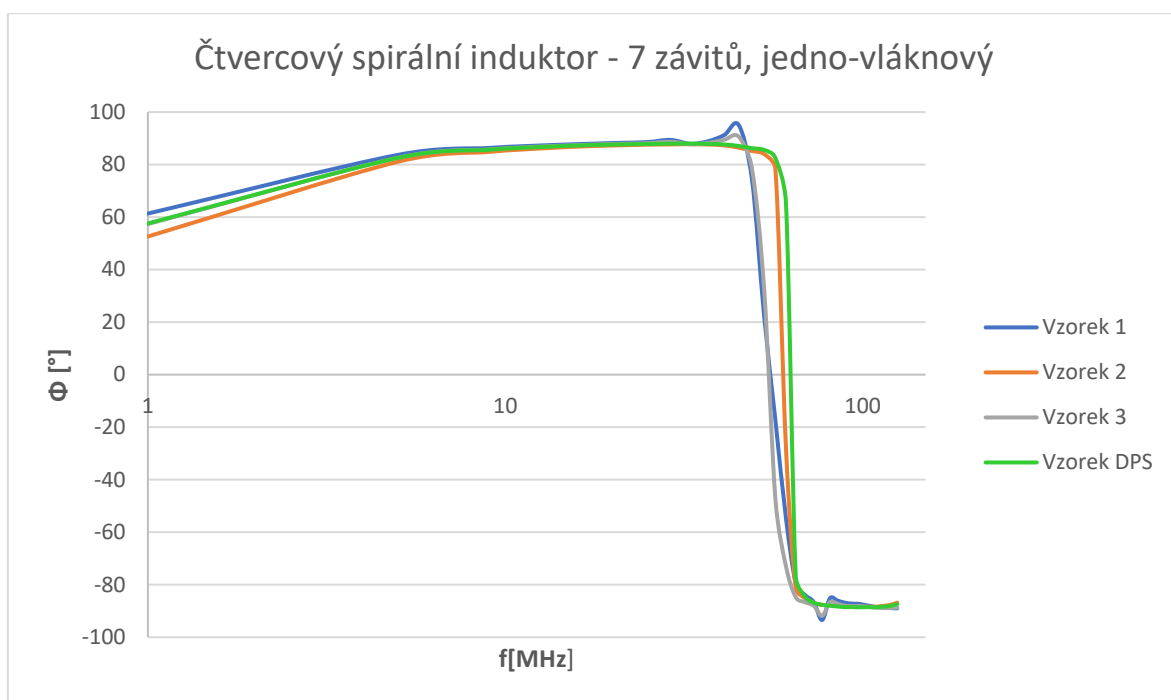
Graf C.8 Frekvenční závislost fázového posuvu spirálního čtvercového induktoru – 7 závitů



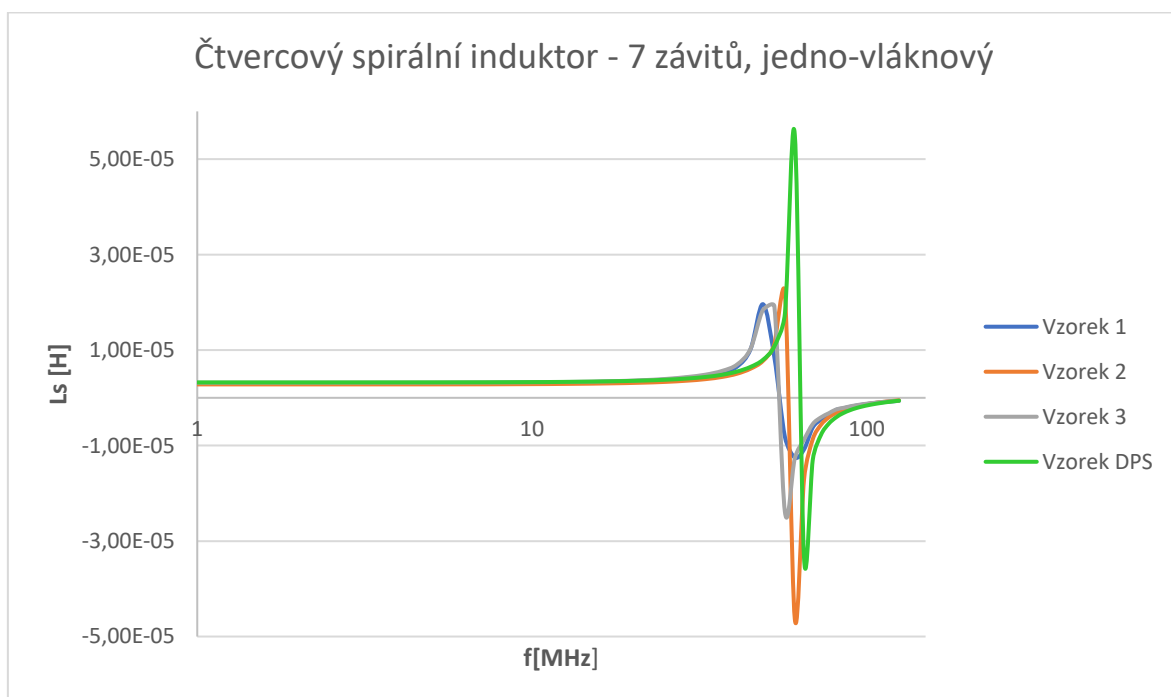
Graf C.9 Frekvenční závislost indukčnosti spirálního čtvercového induktoru – 7 závitů



Graf C.10 Frekvenční závislost impedance spirálního čtvercového induktoru – 7 závitů,  
jedno-vláknový

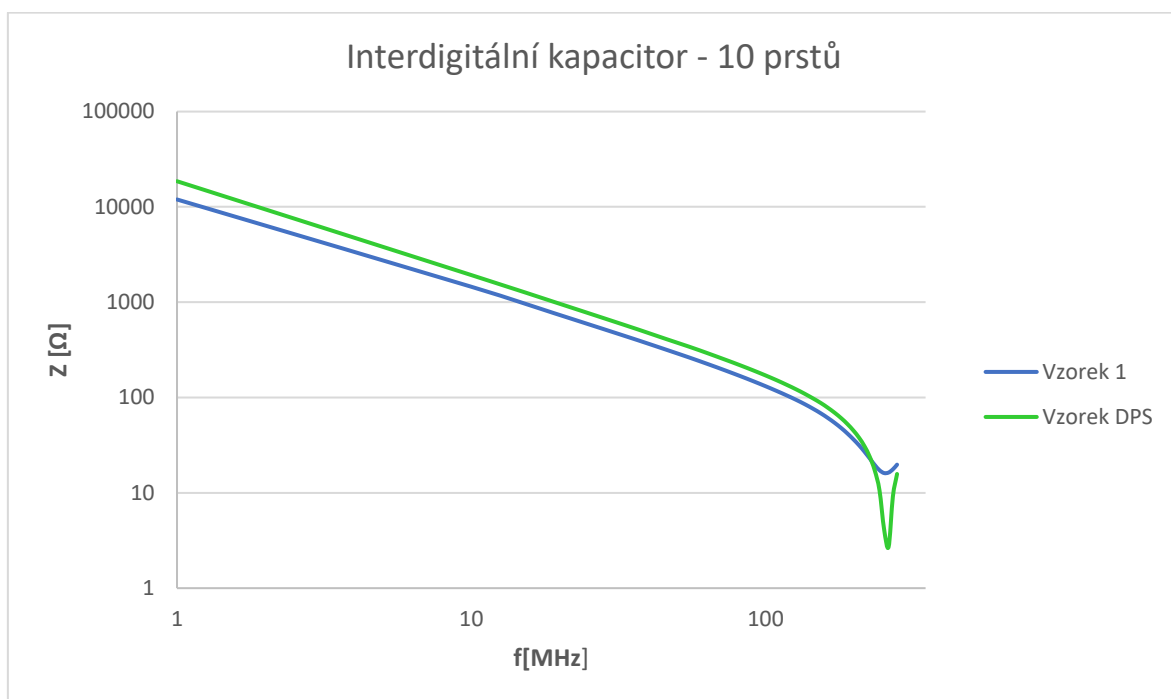


Graf C.11 Frekvenční závislost fázového posuvu spirálního čtvercového induktoru – 7 závitů, jedno-vláknový

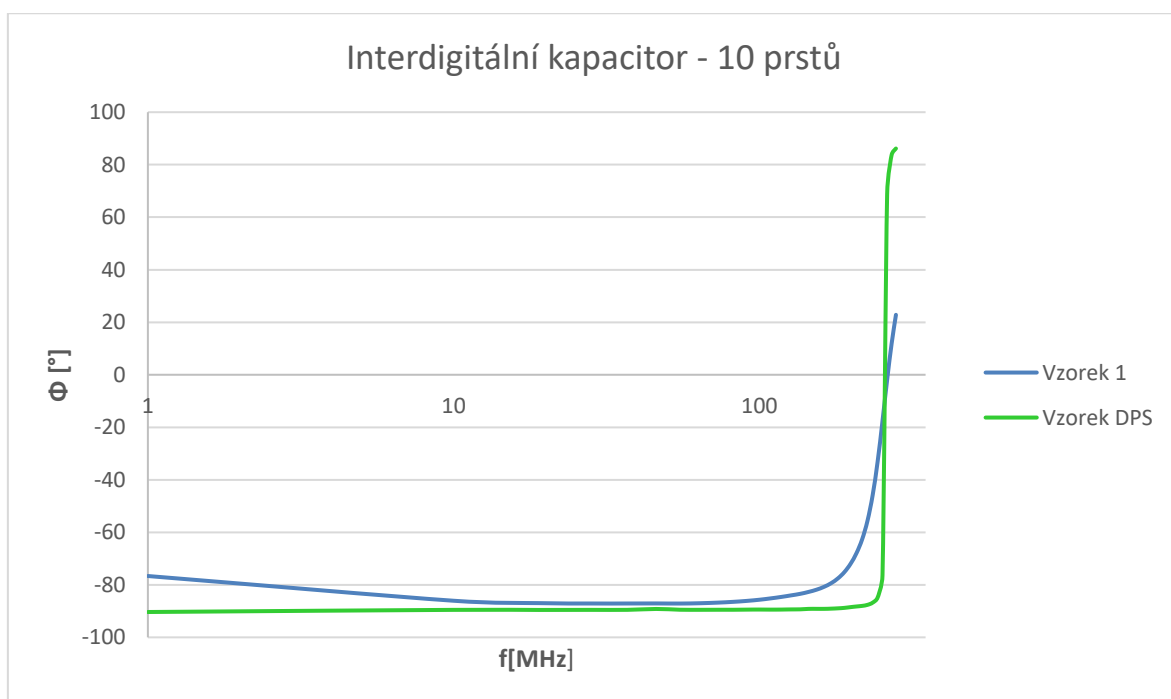


Graf C.12 Frekvenční závislost indukčnosti spirálního čtvercového induktoru – 7 závitů, jedno-vláknový

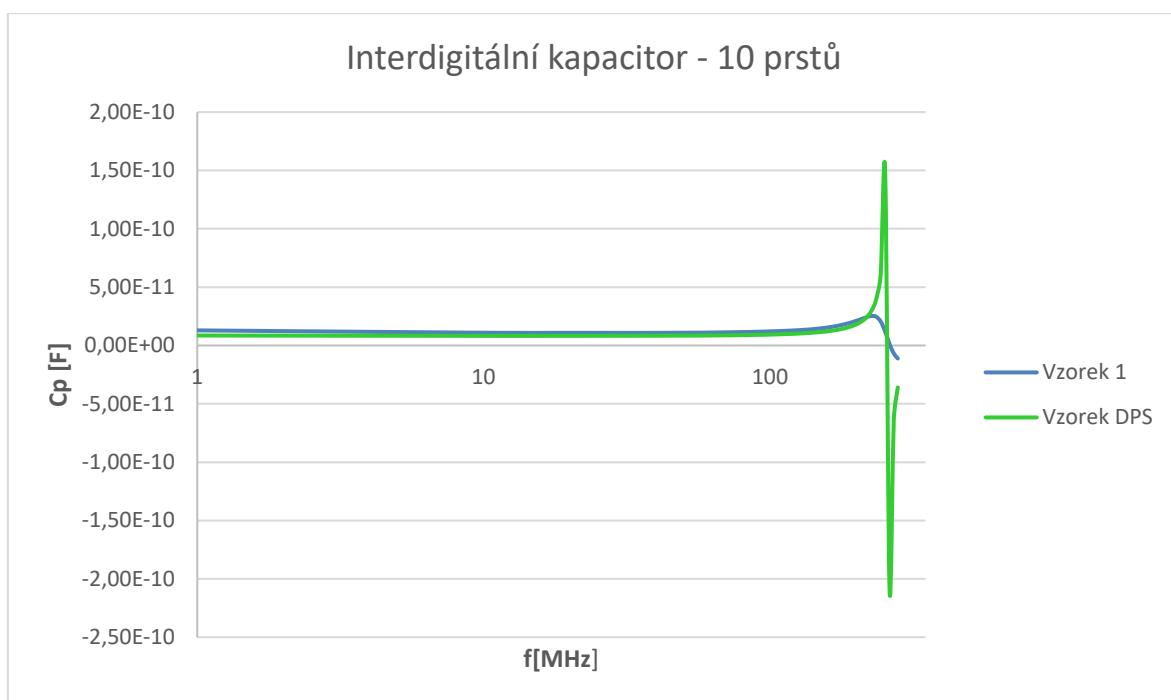
**Příloha D – Grafy frekvenčních závislostí interdigitálních kapacitorů**



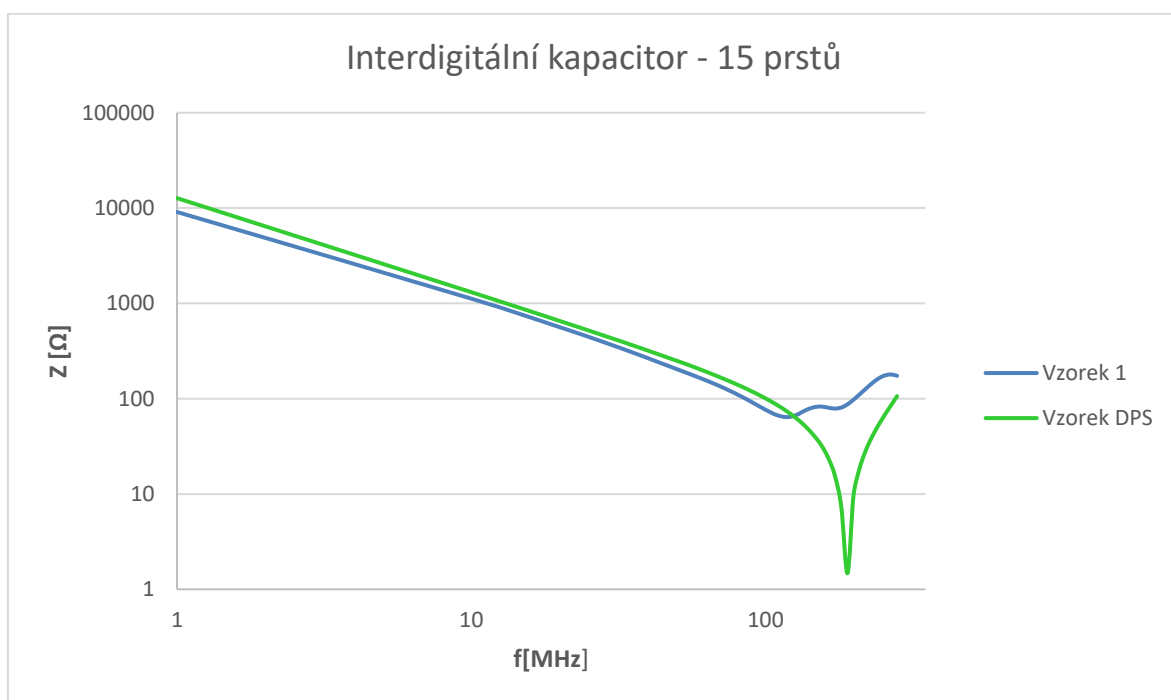
Graf D.1 Frekvenční závislost impedance interdigitálního kapacitoru – 10 prstů



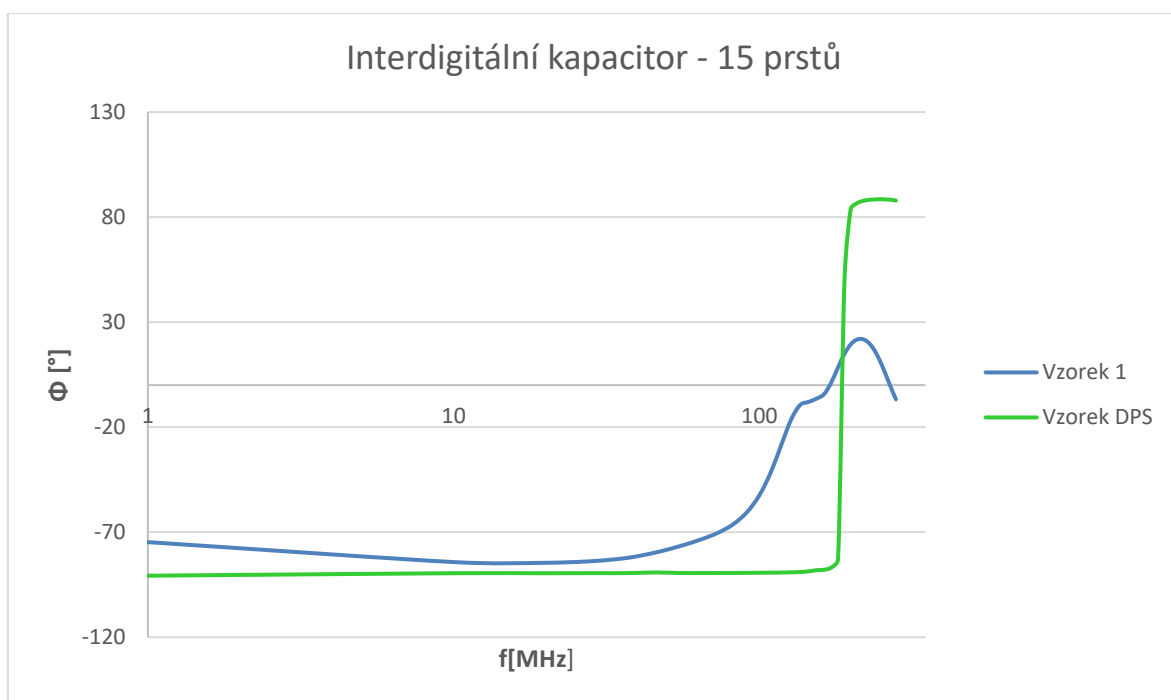
Graf D.2 Frekvenční závislost fázového posuvu interdigitálního kapacitoru – 10 prstů



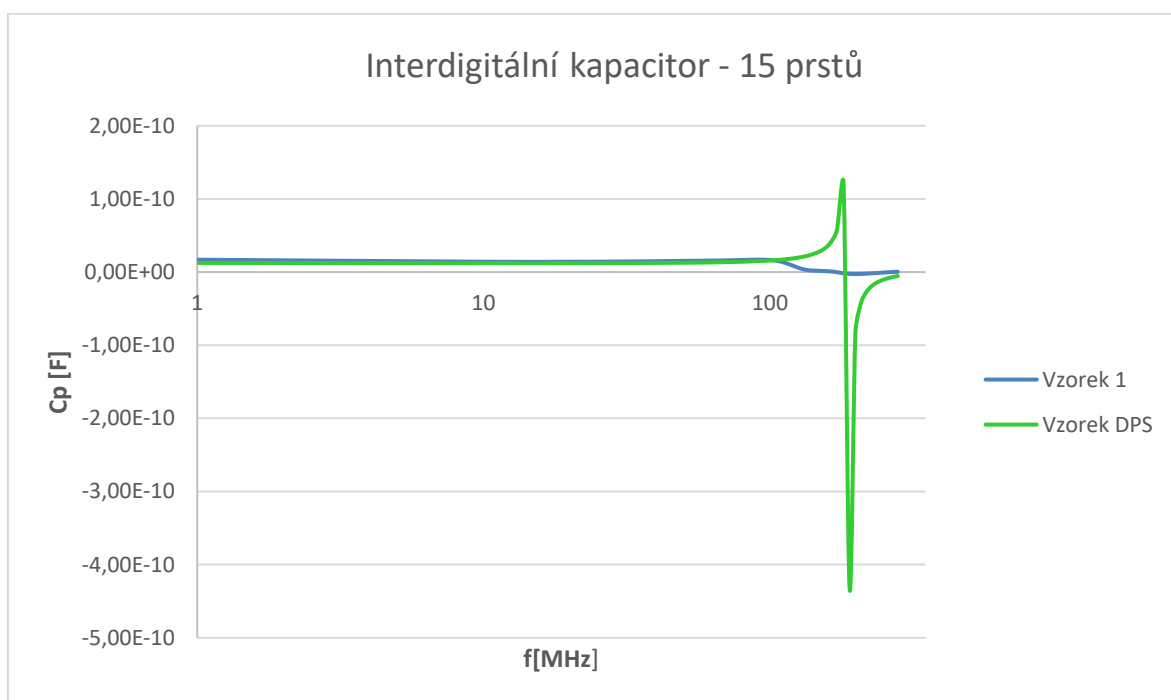
Graf D.3 Frekvenční závislost paralelní kapacity interdigitálního kapacitoru – 10 prstů



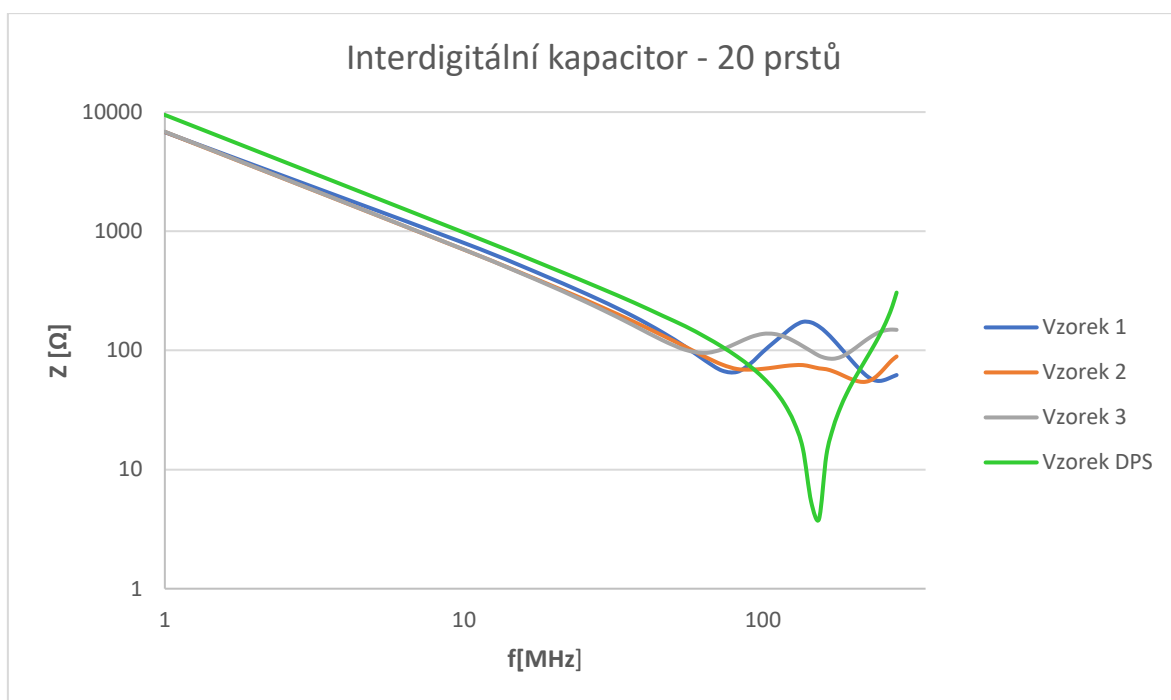
Graf D.4 Frekvenční závislost impedance interdigitálního kapacitoru – 15 prstů



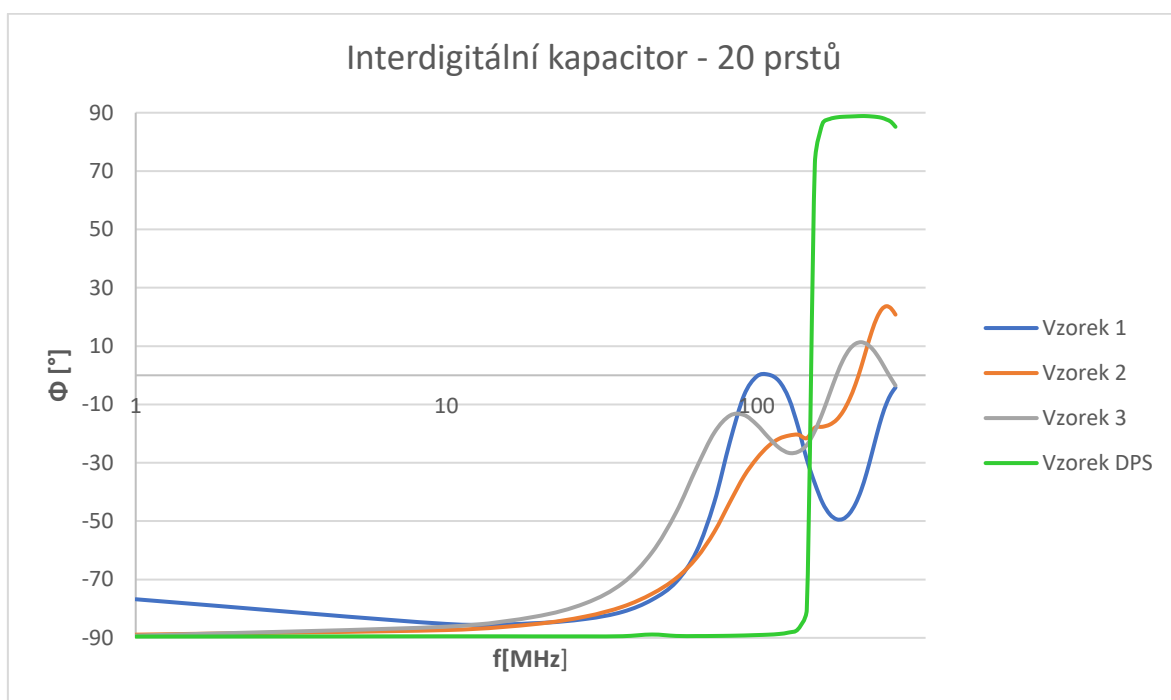
Graf D.5 Frekvenční závislost fázového posuvu interdigitálního kapacitoru – 15 prstů



Graf D.6 Frekvenční závislost paralelní kapacity interdigitálního kapacitoru – 15 prstů

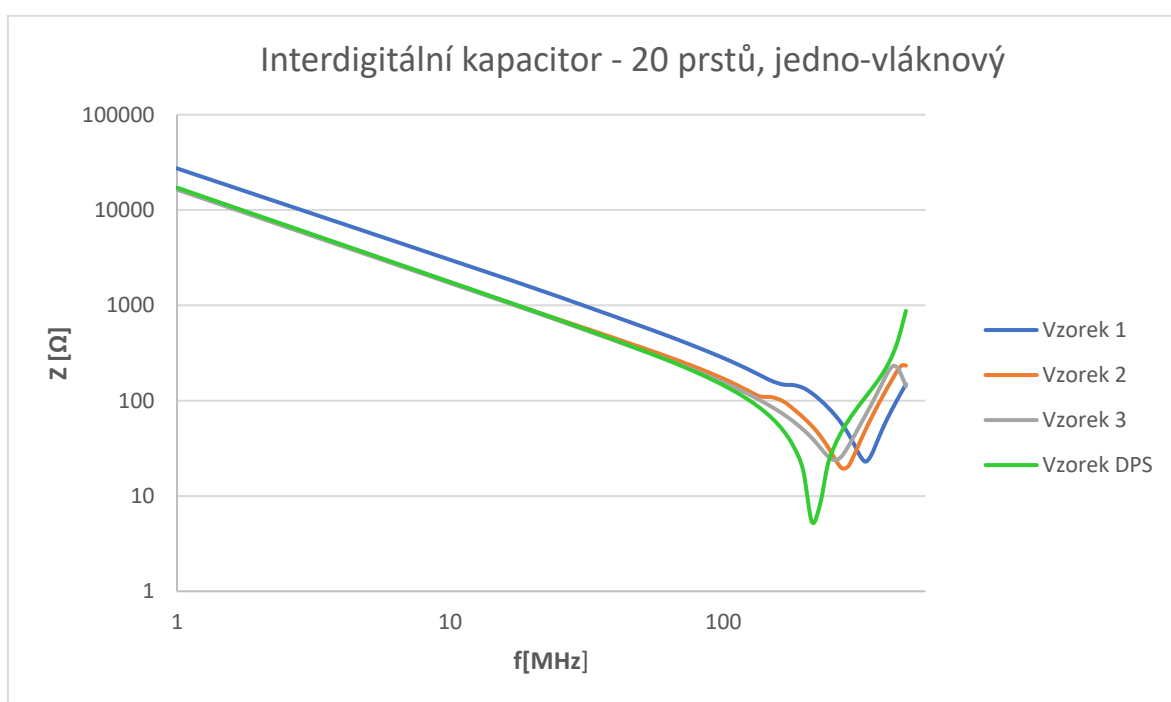
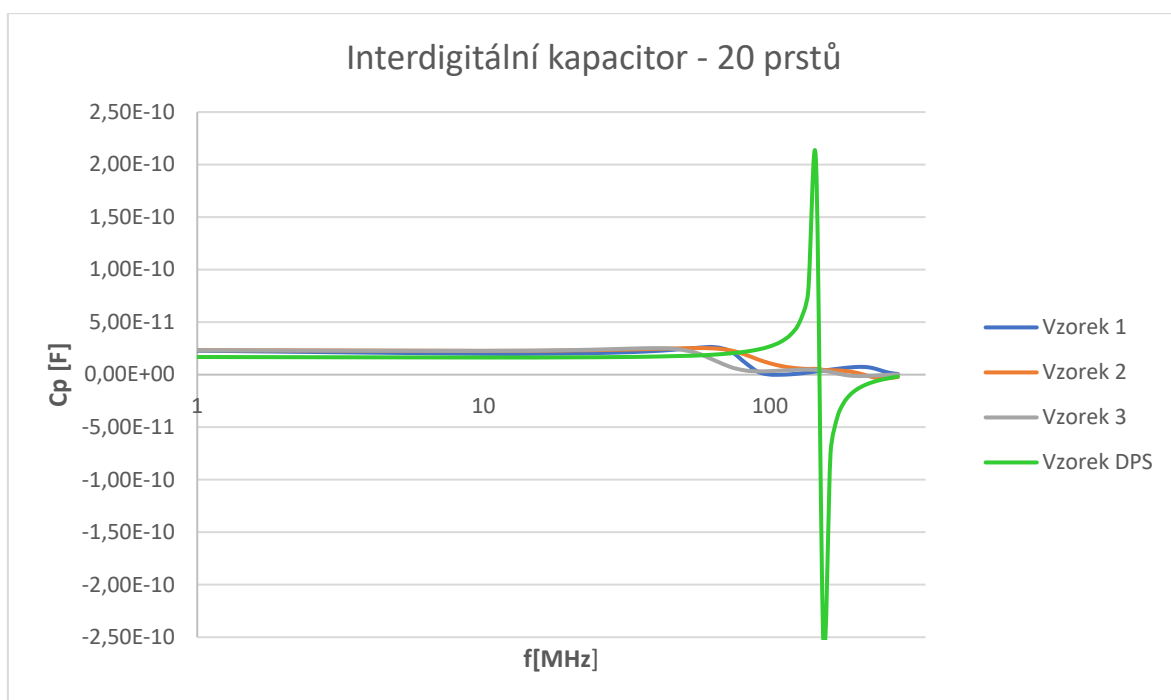


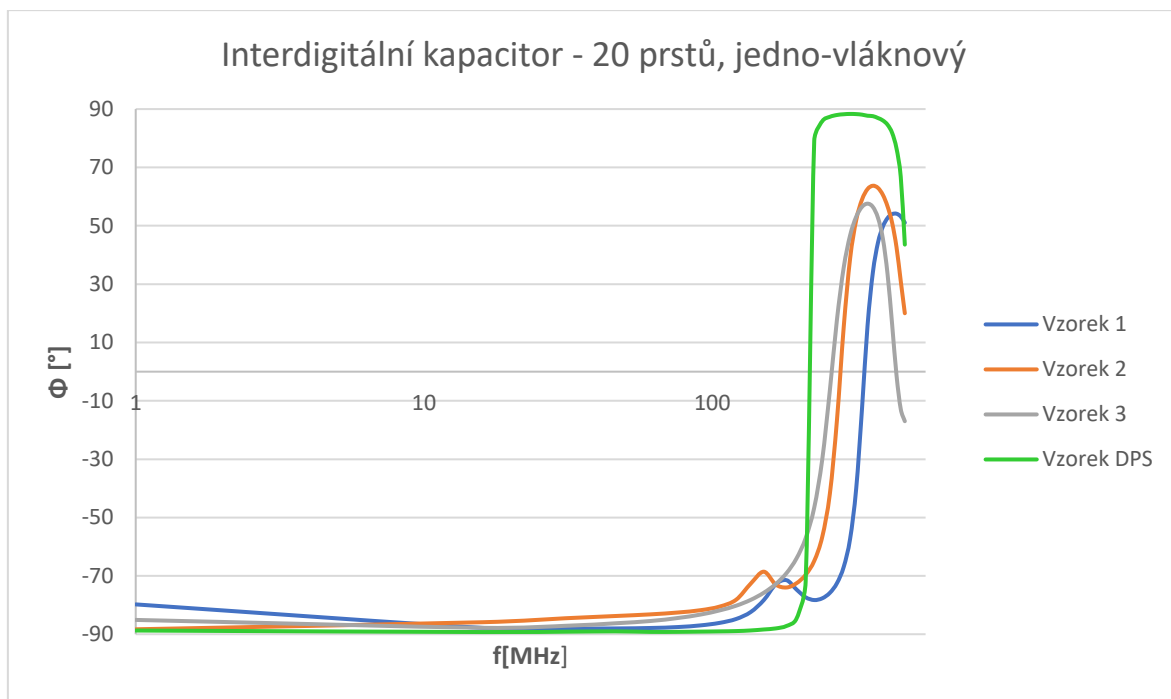
Graf D.7 Frekvenční závislost impedance interdigitálního kapacitoru – 20 prstů



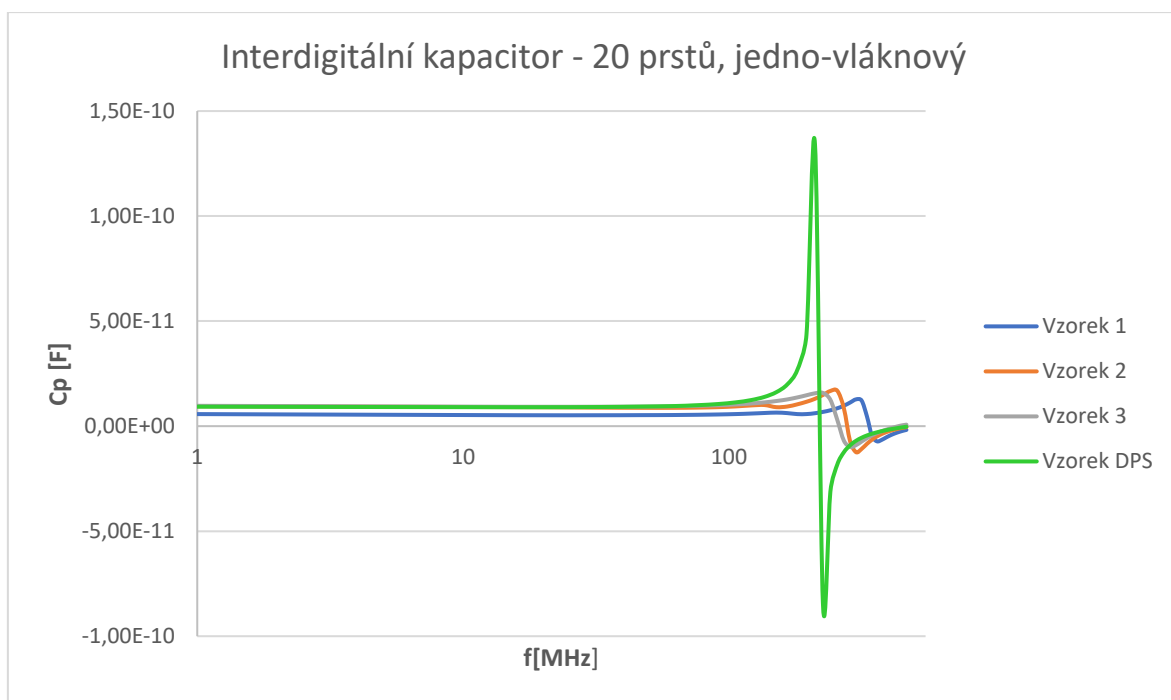
Graf D.8 Frekvenční závislost fázového posuvu interdigitálního kapacitoru – 20 prstů







Graf D.11 Frekvenční závislost fázového posuvu interdigitálního kapacitoru – 20 prstů, jedno-vláknový



Graf D.12 Frekvenční závislost paralelní kapacity interdigitálního kapacitoru – 20 prstů, jedno-vláknový