ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Textilní antény jako senzory natažení a deformace

Bc. Michaela Radouchová **2021**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Bc. Michaela RADOUCHOVÁ**
Osobní číslo:	**E19N0010P**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Komerční elektrotechnika**
Téma práce:	**Textilní antény jako senzory natažení a deformace**
Zadávající katedra:	**Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s anténami vhodnými pro realizaci na textiliích.
2. Navrhněte vhodné textilní antény pro detekci natažení a deformaci.
3. Proměřte elektrické parametry realizovaných textilních antén v závislosti na natažení a deformaci.
4. Vyhodnoťte získané výsledky.

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

Seznam doporučené literatury:

1. Mattila, H.R.: Intelligent textiles and clothing, 2006.
2. Schneegass, S.: Smart textiles – Fundamentals, Design and Interaction, 2017.
3. Ashok Kumar, L.: Electronics in textiles and clothing
4. Internetové zdroje

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

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**

L.S.

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

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

V Plzni dne 9. října 2020

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na textilní antény vhodné pro snímání mechanických deformací jako je například natažení. Snímání míry natažení je důležitým parametrem pro snímání otoků a flexibility končetin, jako je ohyb končetin nebo rozsah pohybu kloubů a těla, ve zdravotnictví či při rehabilitaci a sportu. Práce obsahuje rešerši textilních antén od jejich výroby, fungování až po aplikace, s důrazem na textilní antény jako senzory natažení a deformace, kterým je věnována praktická část. Praktická část je zaměřena na návrh a měření textilních antén vhodných pro snímání natažení či deformace na základě vyhodnocení změn jejich elektrických parametrů.

Klíčová slova

Chytré textilie, textilní antény, senzor natažení, senzor deformace, vodivé příze

Abstract

This diploma thesis is focused on textile antennas suitable for sensing mechanical deformations such as strain. Strain sensing is an important parameter for sensing edema and flexibility of the limbs, such as flexion of the limbs or the range of motion of the joints and body, in healthcare or in rehabilitation and sports. The work contains a search of textile antennas from their production, operation to application, with emphasis on textile antennas as strain and deformation sensors, which is devoted to the practical part. The practical part is focused on the design and measurement of textile antennas suitable for sensing strain or deformation based on the evaluation of changes in their electrical parameters.

Key words

Smart textiles, textile antennas, strain sensor, deformation sensor, conductive yarns

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala 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 25.5.2021 Bc. Michaela Radouchová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Tomáši Blechovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky, čas a odborné vedení. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Daniele Moravcové, Ph.D. a Ing. Stanislavu Suchému za pomoc s výrobou vzorků pro praktickou část.

Obsah

OBSAH ... **8**

ÚVOD ... **9**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK ... **10**

1 TEXTILNÍ ANTÉNY ... **11**

1.1 TOPOLOGIE ANTÉN ... 12
1.1.1 Antény se zemní rovinou – GP antény ... *12*
1.1.2 Nositelné dipóly a smyčkové antény ... *13*
1.1.3 Monopolní a štěrbinové antény ... *14*
1.1.4 Mikropáskové flíčkové (patch) antény ... *15*
1.2 POUŽÍVANÉ TECHNOLOGIE A MATERIÁLY ... 16

2 REALIZACE A APLIKACE TEXTILNÍCH ANTÉN ... **18**

2.1 VYUŽITÍ RFID ... 18
2.2 PŘÍKLADY REALIZACÍ ... 19
2.3 APLIKACE ... 23
2.3.1 Lokalizace a záchrana osob ... *23*
2.3.2 Zdravotnictví, rehabilitace a sport ... *26*

3 TEXTILNÍ ANTÉNY JAKO SENZORY NATAŽENÍ ČI DEFORMACE ... **28**

3.1 PRINCIP SNÍMÁNÍ NATAŽENÍ ... 29
3.2 POKOVENÉ TEXTILNÍ ANTÉNY ... 29
3.3 PLETENÉ TEXTILNÍ ANTÉNY ... 32
3.4 VYŠITÉ TEXTILNÍ ANTÉNY ... 33
3.5 TEXTILNÍ ANTÉNY REALIZOVANÉ POMOCÍ TISKU ... 38
3.6 KOMBINOVANÉ TEXTILNÍ ANTÉNY ... 38

4 NÁVRH TEXTILNÍ ANTÉNY PRO DETEKCI NATAŽENÍ A DEFORMACE ... **40**

4.1 NÁVRHY ANTÉN ... 40
4.2 REALIZACE ANTÉN ... 41
4.2.1 Vyšité antény ... *41*
4.2.2 Pletené antény ... *44*

5 MĚŘENÍ NAVRŽENÝCH ANTÉN ... **45**

5.1 MĚŘENÍ NATAŽENÍ VYŠITÝCH ANTÉN NA ZÁKLADĚ RLC PARAMETRŮ ... 46
5.2 MĚŘENÍ NATAŽENÍ VYŠITÝCH ANTÉN NA ZÁKLADĚ PARAMETRU S_{11} ... 50
5.3 MĚŘENÍ PLETENÝCH ANTÉN ... 54

ZÁVĚR ... **57**

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ ... **59**

PŘÍLOHY ... **1**

ROZMĚRY NÁVRHŮ ANTÉNY ... 1
CHARAKTERISTIKY VYŠITÝCH ANTÉN ... 3

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá textilními anténami. Jedná se o speciální třídu antén, které jsou buď částečně nebo úplně vyráběny z textilních materiálů a vodivých nití pomocí vyšívání, pletení nebo tisku. Textilní antény jsou ohebné, flexibilní, komfortně nositelné antény aplikované převážně v chytrých textiliích, které implementují funkce snímání, lokalizace a bezdrátové komunikace. Chytré textilie jsou velkým trendem, mnoho výrobců se snaží zaujmout místo na trhu a uvést jako první novinky, které by lidem pomohly a zpříjemnily jim život. Snaží se zaujmout jak zákazníky, tak i různá odvětví od průmyslu až po zdravotnictví.

Textilní antény se využívají nejen pro lokalizaci a bezdrátovou komunikaci, ale i pro snímání vlhkosti, teploty, působení mechanických sil, jako je tlak, ohyb či natažení nebo jiné deformace. Z tohoto důvodu mají textilní antény širokou oblast využití od dopravy, průmyslu, záchranných systémů až po zdravotnictví. Textilní antény jako senzory natažení či deformace se používají například ve zdravotnictví pro monitorování zdravotního stavu, jako je teplota, vlhkost či srdečního tep lidského těla, nebo flexibility končetin, jako je ohyb končetin nebo rozsah pohybu kloubů a těla [1], [2], [3], [4], [5].

Tato práce je rozdělena do pěti kapitol. První je věnována textilním anténám, jejich topologii, používaným materiálům a technologiím výroby. Ve druhé kapitole jsou uvedeny různé příklady realizací antén a jejich aplikace, také je zde věnována kapitola technologii RFID, která může využívat i textilní antény. Ve třetí kapitole jsou popsány textilní antény snímající natažení a deformace, jejich realizace a možné použití. Snímání mechanických deformací a natažení má velký potenciál ve zdravotnictví, při rehabilitaci a sportu, dá se použít například pro monitorování otoků, rozsahu pohybu končetin či ohybu kloubů. Čtvrtá kapitola je věnována vlastnímu návrhu textilních antén pro detekci natažení a deformace. Poslední kapitola obsahuje měření vzorků navržených textilních antén a jejich zhodnocení. V závěru práce jsou shrnuty získané poznatky.

Seznam symbolů a zkratek

Cp ..…..…… Paralelní kapacita
CPC ....…….. rovinné cívky se vzájemnou vazbou (coupling planar coils)
EBG ……..…. Struktura elektromagnetické pásmové mezery (electromagnetic band-gap)
FSCW…...…. Frekvenční radarové techniky s kontinuální vlnou
(frequency-stepped continuous-wave)
GNSS……. Globální družicový polohový systém (global navigation satellite system)
GP……..…. Antény se zemní rovinou (ground plane antenna)
GPS……...…. Globální družicový polohový systém (global positioning system)
HF ……. Krátké vlny (high frequency waves)
IC ……..…. Integrovaný obvod
LF ……. Dlouhé vlny (low frequency waves)
LNA……..…. Nízkošumový zesilovač (low-noise amplifier)
Ls ……..…. Sériová indukčnost
MF ……...…. Střední vlny (medium waves)
NFC……..…. Obousměrná bezkontaktní komunikace (near field communication)
NGP……..…. Antény bez zemní roviny (no ground plane)
PAD……..…. Polyamid
PCB……..…. Deska plošných spojů (printed circuit board)
PES ……..…. Polyester
PLB……...…. Osobní lokátor (personal locator beacons)
PVC……..…. Polyvinylchlorid
Q ……..…. Činitel jakosti antény, faktor kvality
RCS……..…. Radarový průřez (radar cross section)
RFID……..…. Radiofrekvenční identifikace (radio frequency identification)
RSSI……..…. Síla přijatého signálu (received signal strength indication)
s_{11}……..…. Vstupní činitel odrazu antény
SHF……...…. Super krátké vlny (super high frequency waves)
SIW……...…. Technologie integrovaného vlnovodu substrátu
(substrate integrated waveguide)
SRR……...….Rezonátor s děleným prstencem (split ring resonator)
UHF……..…. Ultra krátké vlny (ultra high frequency waves)
UWB……... Ultra širokopásmová radiokomunikační technologie (ultra-wideband)
VHF……... Velmi krátké vlny (Very high frequency waves)
WBAN……... Bezdrátová síť oblasti těla (wireless body area network)
Wi-Fi……..Bezdrátová technologie přenosu dat (wireless fidelity)
WiPSA……... Bezdrátové čidlo tlaku (wireless pressure sensor array)
ε_r ……Relativní permitivita

1 Textilní antény

Antény jsou elektrotechnická zařízení sloužící k bezdrátovému přenosu informací. Jejich základní dělení je na přijímací a vysílací, záleží, zda daná anténa vysílá, či přijímá elektromagnetickou energii [6], [7].

Antény jsou charakterizovány na základě vlastností, jako je vyzařovací diagram, šířka paprsku, intenzita záření, směrovost, zisk, účinnost, impedance, šum, dosah, činitel jakosti a indukčnost smyčky [8], [9].

Pod pojmem anténa si mnoho lidí představí poměrně mohutné zařízení umístěné na domech pro příjem televizního vysílání, nebo naopak i malé zařízení v mobilních telefonech umožňující propojení se světem. Ve všech těchto případech se jedná o pevné neohebné zařízení. Díky novým technologiím a možnostem dnešní doby je možné vytvářet antény ohebné a pružné, například tiskem na ohebné fólie či jejich integrací do textilií.

Antény realizované v textiliích nazýváme textilními anténami. Textilní antény jsou základními součástmi inteligentních tkanin a interaktivních textilních systémů, které implementují funkce snímání, lokalizace a bezdrátové komunikace. Jsou nenápadně a pohodlně integrovány do oděvů [10]. Jejich vývoj a výzkum byl zahájen, protože bylo zapotřebí vytvoření komunikačních nástrojů, které by byly kompatibilní s inteligentními textiliemi [10], [11].

Technologie těchto nositelných textilních antén se stále vyvíjí, od jednoduchých obdélníkových tvarů po složitější topologie, a využívá řadu textilních materiálů. Tyto nositelné antény musí být odolné při ohýbání, či praní, nesmí ovlivňovat komfort a zdraví uživatelů [10], [11].

Textilní antény jsou speciální třídou antén. Na rozdíl od konvenčních antén z tuhých materiálů jsou částečně nebo úplně vyrobeny z textilních materiálů. Textilie tvořící anténu se dělí na elektricky vodivé a dielektrické materiály. Elektricky vodivé textilie se aplikují na vyzařující a zemní části antény, dielektrické materiály na izolační části antény [11].

1.1 Topologie antén

Na pevných substrátech se používají například smyčkové antény, spirálové antény, prutové antény, flíčkové (patch) antény, dipólové antény z tenkého drátu, válcové dipólové antény nebo bikonické antény [8].

Antény se také rozdělují podle připojení vodiče na antény se zemní rovinou (GP) a antény bez zemní roviny (NGP), podle uspořádání zdrojů na lineární, plošné a magnetické, nebo podle tvaru na plošné, drátové, reflektorové, anténní čočky a anténní řady [9], [12].

Textilní antény vyžadují výběr vhodné topologie antény, aby byly splněny elektrické a mechanické požadavky. Z hlediska výkonu jsou požadovány stabilní charakteristiky antény a maximální účinnost záření, to vyžaduje minimální účinky blízkosti lidského těla. Pohyby těla a zařízení poblíž textilní antény by neměli významně ovlivňovat její provozní vlastnosti. Z tohoto důvodu se dává přednost anténám s dostatečně velkou zemní rovinou [10].

Pro výběr vhodné topologie antény a její návrh je také důležité znát frekvenční rozsah, ve kterém bude anténa pracovat.

Tab. 1 Frekvenční rozsahy rádiového záření (převzato z [13]*)*

Dlouhé vlny (LF)	0,03 - 0,3 MHz
Střední vlny (MW)	0,3 – 3 MHz
Krátké vlny (HF)	3 – 30 MHz
Velmi krátké vlny (VHF)	30-300 MHz
Ultra krátké vlny (UHF)	300 - 3000 MHz
Super krátké vlny (SHF)	3000 – 30000 MHz

1.1.1 Antény se zemní rovinou – GP antény

Ground plane antény, neboli antény se zemní rovinou, mají jednu část tvořenou zemní rovinou a druhá část je vertikálně orientovaná. Jedná se tedy převážně o prutové antény [14].

Antény se zemní rovinou směřují záření od lidského těla. Zemní rovina působí jako elektromagnetický štít snižující absorpci elektromagnetického pole v tělesných tkáních, ale je to praktické pouze v mikrovlnném frekvenčním rozsahu (UHF a SHF) [10], [15].

Na Obr. 1 je znázorněna anténa se zemní rovinou z vodivé látky z polyesteru a postříbřené nitě [16].

Obr. 1 Ukázka antény s textilní zemní rovinou (převzato z [16]*)*

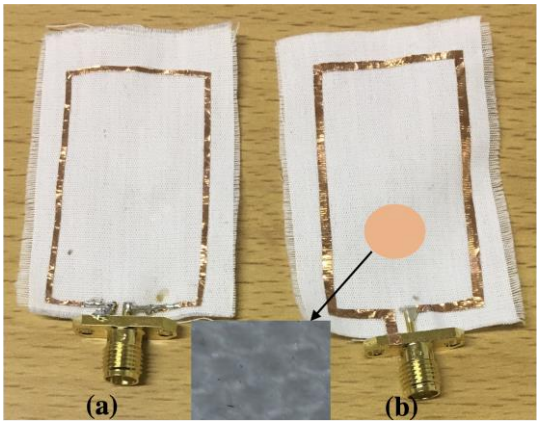
Při použití antén se zemní rovinou je důležité brát v úvahu požadavky na pohodlnou i nenápadnou integraci do oděvu a nízký profil textilní antény. Při nižších frekvencích je zapotřebí velká zemní rovina, pro získání dostatečné šířky pásma a účinnosti záření je zapotřebí dostatečně velká vzdálenost mezi zemní rovinou a vyzařovacími strukturami antény [10].

Velikost antén by se měla pohybovat maximálně v řádu desítek centimetrů s co nejmenší výškou, aby byla integrace textilní antény do oděvu praktická a pohodlná. Pokud by velikostní omezení nebyla vhodná pro použití topologie antény se zemní rovinou, mělo by být lidské tělo zahrnuto do návrhu textilní antény, vysoké permitivity tělesných tkání vedou ke zmenšení velikosti. Miniaturizace je ale omezena použitím rozpěrky pro zajištění dostatečně velkého zisku antény. Je důležité ověřovat výkon záření dokončených návrhů na různých typech lidí, pro různé polohy a různé pracovní podmínky [10].

1.1.2 Nositelné dipóly a smyčkové antény

Místo vyčnívajících prutových antén se používají nositelné dipóly či smyčkové antény, které lze neviditelně integrovat do oděvů [17], [18]. V nižším frekvenčním rozsahu, jako je pásmo velmi krátkých vln (VHF) nebo ultra krátkých vln (UHF), mohou být použity miniaturizační techniky k omezení velikosti antén na přijatelné rozměry. Dipóly se mohou překládat, klikatit či zatížit, aby se zmenšila velikost pod polovinu vlnové délky. Dále se používají asymetrická dipólová ramena, jedno nebo obě ramena mohou být rozšířena za účelem zisku anténního záření v širším frekvenčním pásmu [10].

Obr. 2 Textilní dipólová anténa (převzato z [18]*)*



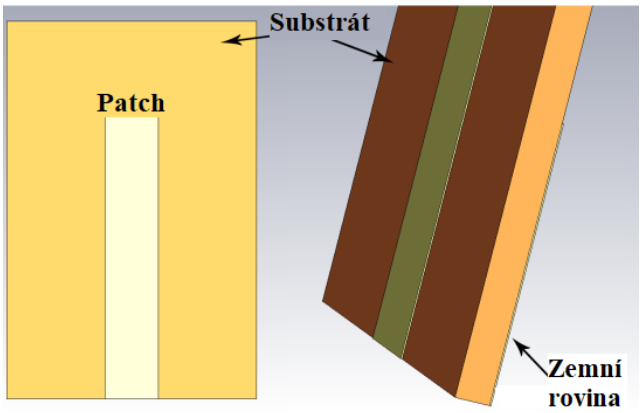
Obr. 3 Smyčková anténa na bavlněné látce o různých šířkách vodivé cesty a = 1 mm, b = 2 mm (převzato z [17]*)*

1.1.3 Monopolní a štěrbinové antény

Pro ultraširokopásmové (UWB) či vícepásmové technologie se využívají monopolní (Obr. 4) a štěrbinové topologie [19]. Změnou tvaru monopolu či optimalizací zemní roviny se dá ovlivnit šířka frekvenčního pásma. Zemní rovina nepůsobí jako štít pro vyzařování antény, blízkost těla obvykle zlepší přizpůsobení impedance, ale sníží zisk a účinnost antény. Tento efekt se minimalizuje umístěním antény na distanční vložku (rozpěrku) pro zaručení minimální vzdálenosti mezi anténou a lidským tělem. Distanční vložka může být podložena zemní rovinou z umělého magnetického vodiče nebo strukturou elektromagnetické pásmové mezery (EBG) za účelem lepšího odizolování těla od záření antény [10].

EBG vytváří zádržné pásmo k blokování elektromagnetických vln určitých frekvenčních pásem díky jemnému, periodickému vzoru malých kovových flíčků (patchů)

na dielektrických substrátech. Používají se k potlačení elektromagnetického šumu, nebo k detekci malý elektromagnetických vln frekvenčních pásem [20].

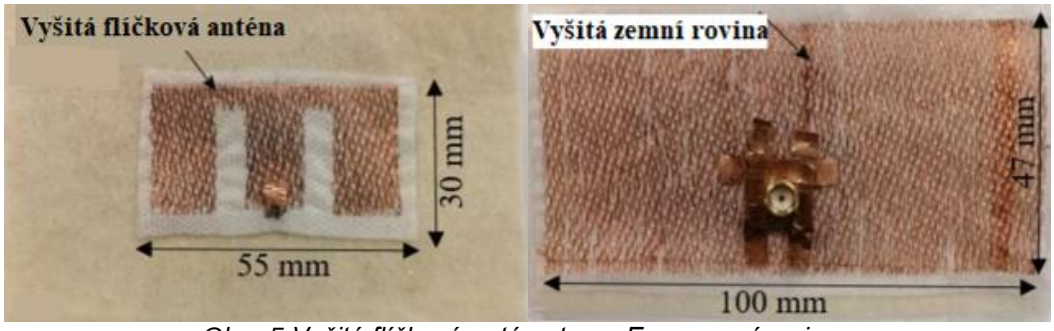


Obr. 4 Monopolní anténa (převzato z [19]*)*

1.1.4 Mikropáskové flíčkové (patch) antény

Velice oblíbenou topologií antén pro textilní antény je mikropásková flíčková (patch) textilní anténa, zobrazené na Obr. 5 nebo v další kapitole na Obr. 7. Její zemní rovina poskytuje dostatečné odstínění od lidského těla, vyzařovací charakteristiky antény se tedy téměř nemění v blízkosti lidského těla. Velikost zemní roviny se mění podle frekvenčního rozsahu, pro dolní frekvenční rozsah se používá menší zemní rovina, to ale není ideální z hlediska izolace těla [10].

Oblíbeným přístupem pro mikropáskové flíčkové textilní antény je rovinná topologie obráceného F či E, na Obr. 5 je znázorněna topologie E. Velikost flíčku je zmenšena na čtvrtinu vlnové délky pomocí zkratovací stěny. Další zmenšení je možné zavedením slotů do flíčku nebo volbou fraktálního obrazce antény, tento přístup opět snižuje šířku pásma antény a její vyzařovací účinnost [10]. Slotové antény s dutinou zajišťují vynikající izolaci od těla nositele. Dutiny se realizují například pomocí technologie SIW, o které je zmínka v kapitole 1.2. V dutinách se vyskytují elektromagnetická pole, která jsou vyzařovány skrz sloty (štěrbiny) pryč od těla [10], [21], [22].

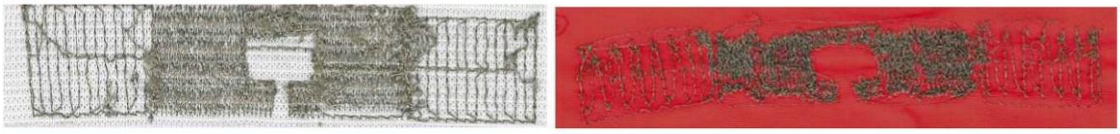


Obr. 5 Vyšitá flíčková anténa tvaru E se zemní rovinou (vpravo pohled shora, vlevo pohled zespoda) (převzato z [23]*)*

Mezi typické nevýhody mikropáskový flíčkových textilních antén patří inherentní úzkopásmová charakteristika antény. Ke zvýšení impedanční šířky pásma slouží výběr silných anténních substrátů s permitivitou blízkou permitivitě vzduchu nebo mohou být do substrátu začleněny elektronické pásmové struktury (EBG) umožňující udržovat anténu v nízkém profilu. Elektronická pásmová struktura umožňuje realizaci požadované šířky pásma a potlačuje potenciální povrchové vlny substrátu. [10].

1.2 Používané technologie a materiály

Existují tři typy technologií pro výrobu nositelných antén. Nejjednodušší spočívá v integraci vodivých drátků, hybridních nití, měděných pásků či vodivých přízí do oděvů pomocí pletení nebo vyšívání. Tyto metody se nejčastěji používá ke konstrukci antén bez zemní roviny, tedy antén NGP [10]. Během vyšívání vzorů na textilii může docházet k chybám (kazům). Problémy při vyšívání antén jsou častým jevem, jelikož při vyšívání dochází ke smrštění substrátu mezi stehy a dochází k posunům látky v průběhu procesu vyšívání a nepřesnostem. K těmto komplikacím inklinují častěji látky měkké a tenké, proto se vyrábí více variací antén s různými rozměry [24], [25]. Na Obr. 6 je patrné, že vyšívání vzoru na červenou textilii ze směsi viskózy a polyesteru je komplikované oproti vyšívání na bílou elastickou stuhou.

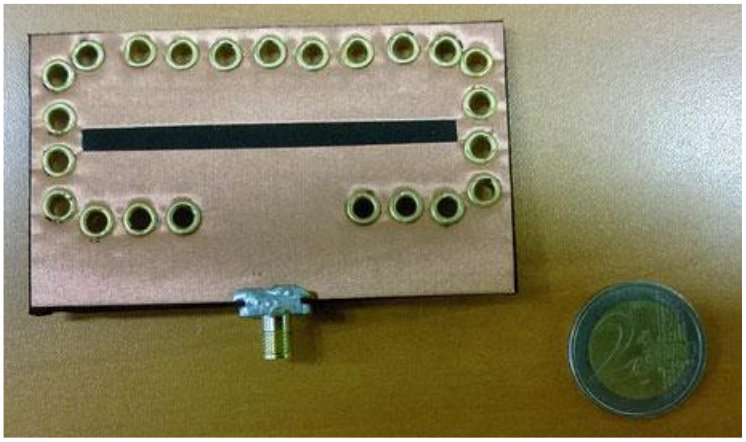


Obr. 6 Vyšitý vzor antény na dvou různých substrátech (převzato z [24])

Druhým typem technologií je připevnění e-textilie, která je obvykle z netkané textilie pokovené mědí nebo niklem, k obyčejné textilii například pomocí tepelně aktivovaného termálního listu. Tato metoda je vhodná pro výrobu mikropáskových a vícevrstvých topologií. Příkladem této technologie je mikropásková flíčková anténa ze vzorované textilie potažená tenkou vrstvou mědi (Zelt e-textilie) na fleecovém substrátu zobrazená na Obr. 7 [10].

Obr. 7 Mikropásková flíčková (patch) anténa ze vzorované Zelt e-textilie a fleecového substrátu (převzato z [10]*)*

Dalším typem technologií jsou aditivní techniky. Vzor antény, reflektoru a zemní roviny je aplikován pomocí sítotisku, inkoustového tisku nebo technologií SIW (technologie integrovaného vlnovodu substrátu) [10]. Technologie SIW je vhodná k vytváření dutin v textilním, plastovém i papírovém substrátu pomocí řady malých trubiček (tubelet) nebo vyšívání. SIW nabízí implementaci kompaktních, nízkoztrátových a nízkonákladových komponent, obvodů, antén nebo kompletních systémů na frekvenci milimetrových a mikro vln [10], [21], [22]. Příklad antény vytvořené díky SIW technologie je na Obr. 8, jedná se o štěrbinovou anténu, která má v poměděné taftové (lesklá tkanina) textilii dutiny vytvořené mosaznými trubičkami [10].



Obr. 8 Anténa vytvořená pomocí SIW na poměděné e-textilii (převzato z [10]*)*

2 Realizace a aplikace textilních antén

V této kapitole jsou popsány různé realizace textilních antén včetně jejich možných aplikací. Na začátek je zde popsán princip RFID, který využívá velké množství textilních antén.

2.1 Využití RFID

RFID systémy slouží k radiofrekvenční identifikaci a skládají se ze čtečky (dotazovače) a tagu. RFID štítek (tag) se skládá dále z antény a integrovaného obvodu (IC). Jako antény RFID tagu se využívají právě i textilní antény. V tagu zapsaná data jsou přečtena čtečkou díky elektromagnetického vlnění. Existují dva typy RFID – pasivní a aktivní [26].

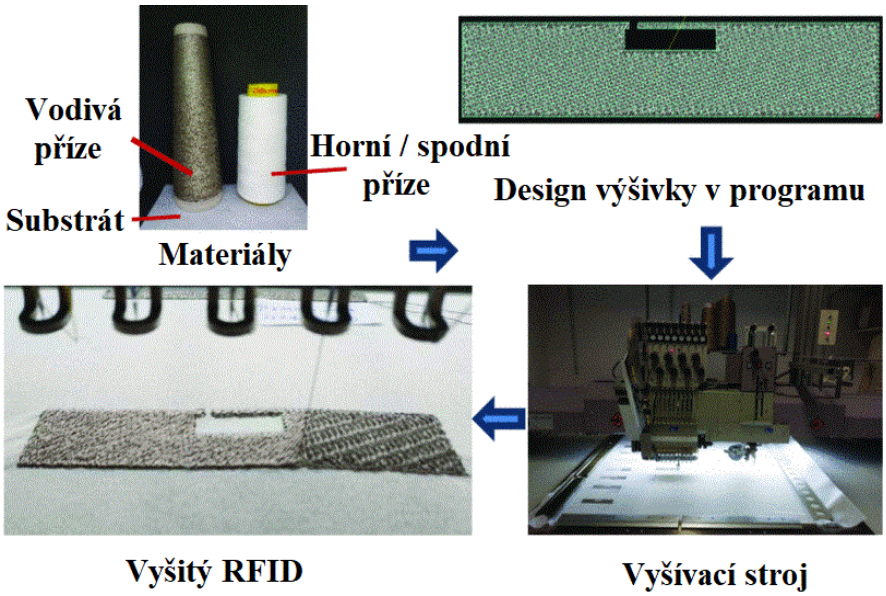
Aktivní RFID tagy jsou napájeny baterií oproti pasivním, vysílají tedy vlastní signál, mají tedy větší dosah, ale jsou také dražší [26].

Pasivní RFID senzor využívá dálkově adresovatelné elektronické štítky, složené pouze z antény a malého integrovaného obvodu s jedinečným ID, a získává energii z elektromagnetického pole, které vysílá systém dálkového čtení, k provozu tedy nevyžaduje žádnou baterii [27], [28], [29], [30].

Změny zpětně rozptýleného signálu z pasivních RFID štítků na těle mohou poskytnout informace o polohách a pohybech těla. Když se například uživatel dotkne prstem RFID štítku, projeví se to jako změna fáze zpětně rozptýleného signálu štítku. Sledování změn zpětně rozptýlených signálů štítků se používá u pasivních UHF RFID štítků pro snímání bez externích senzorů, zejména jako snímače deformace či vlhkosti [28], [30].

2.2 Příklady realizací

Textilní antény se hojně vyrábí technikami zmíněnými v předchozí kapitole 1.2. Velmi časté je pletení a vyšívání s využitím vodivých nití či přízí, protože neovlivňují komfort uživatele.

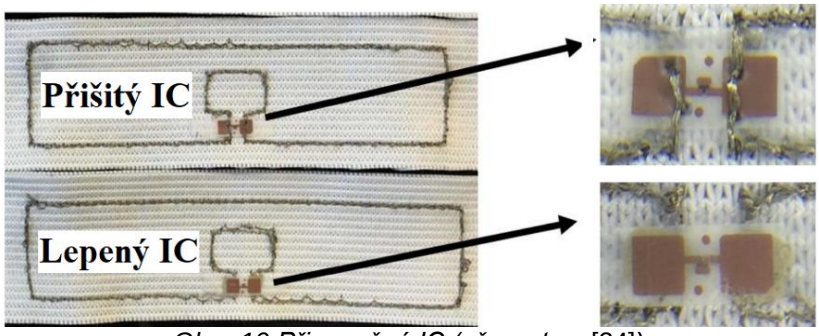


Obr. 9 Proces výroby vyšité RFID antény (převzato z [25]*)*

Jako vodivé nitě či příze se nejčastěji využívají vodivé hybridní nitě, vícevláknité postříbřené nitě, postříbřené polyamidové příze, Ni-Cu opletení nebo nerezová kovová vlákna, konkrétně například Shieldex multifilament thread 110f34 dtex 2-ply HC, příze Silverpam 250 od společnosti TIBTECH Innovations Inc. [1], [24], [25].

Jako roztažitelné textilie se používají elastické stuhy, látky z viskózy a polyesteru, netkané bavlněné textilie, látky z nylonu a elastanu [2], [24], [25].

K anténám se připevňují IC tagy umístěné na interposeru vodivým lepidlem (vodivý epoxid Circuit Works CW2400) nebo přišitím (Obr. 10). Jako čip se poměrně často využívá IC tag NXP UCODE G2iL řady RGID IC [24].

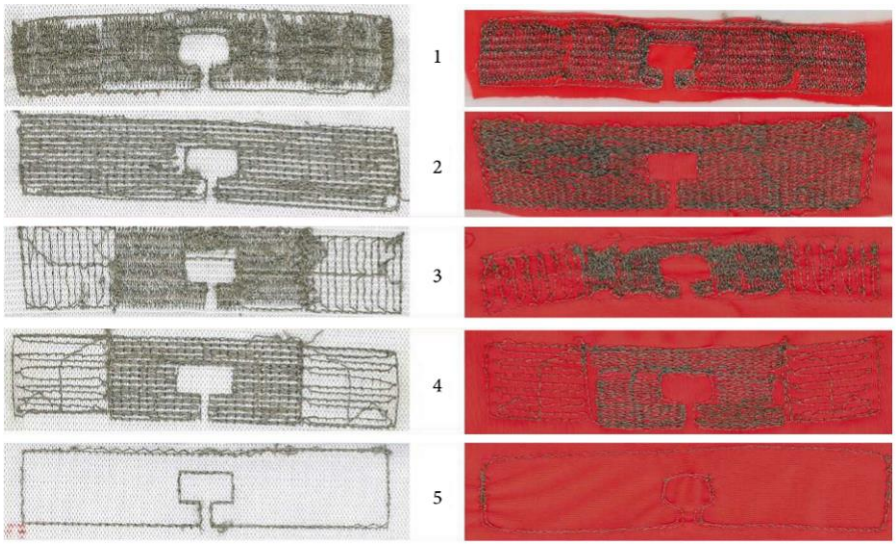


Obr. 10 Připevněný IC (převzato z [24]*)*

Při návrhu textilní antény je důležité znát vlastnosti materiálů, které budou tvořit nositelnou anténu, nebo ji obklopovat. Musí být stanovena permitivita nevodivých textilií i plošný odpor vodivých materiálů, avšak jednotlivé vlastnosti materiálů se mohou lišit po úplném sestavení antény v závislosti na konkrétních procesech její výroby. Pletení, tkaní, vyšívání, či lepení antény změní elektrické chování celé antény. Během výroby textilii pletením, tkaním, nebo vyšíváním se může objevit i nehomogenita, anizotropie či nestabilita materiálových vlastností tkaniny [10].

Tkaninu je možné si představit jako směs vláken a molekul vzduchu i vody, v závislosti na podmínkách okolního prostředí (teplota, vlhkost) se podíly těchto složek mohou lišit a látka může měnit své vlastnosti. Z tohoto důvodu je důležité zohledňovat prostředí, ve kterém bude anténa používána. Při návrhu nositelných antén a při odvozování materiálových vlastností částí antény se nesmí zapomenout ani na provozní frekvenci antény nebo na degradaci výkonu textilních antén v důsledku údržby, jako je praní a chemického čištění [10].

V článku [24] byly pro výrobu textilní antény s pasivními UHF RFID tagy použity dvě různé roztažitelné textilie, na které byly vyšity 5 různými způsoby vzory antén (Obr. 11).



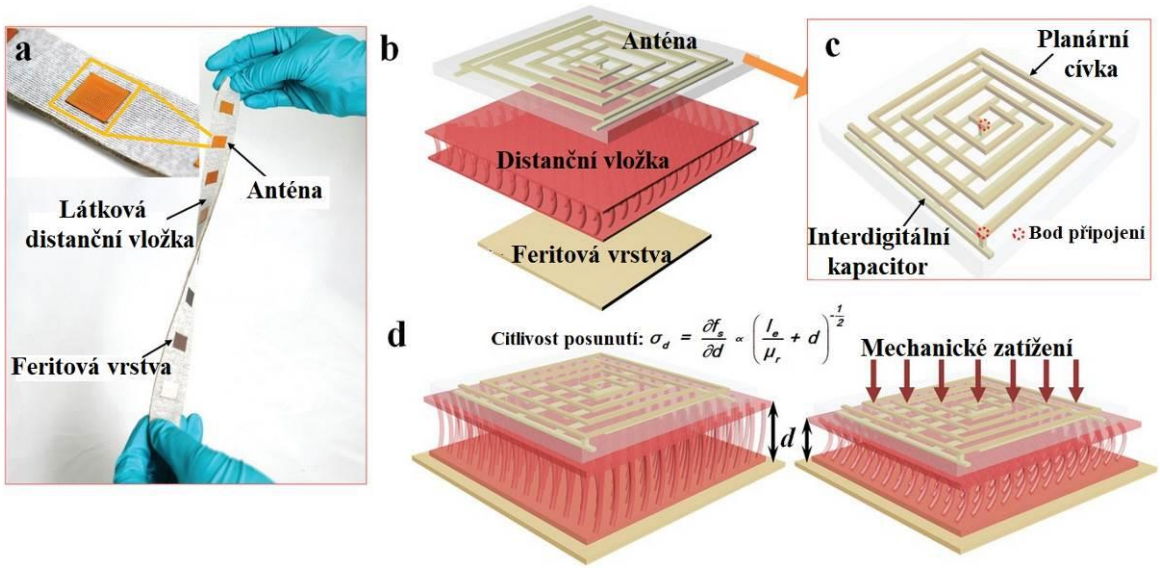
Obr. 11 Pět vzorů vyšitých antén na elastické stuze (vlevo) a látky z viskózy a polyesteru (vpravo) (převzato z [24]*)*

Vyšívanými anténami vhodnými pro integraci do oděvů jsou i textilní štěrbinové flíčkové (patch) RFID antény. Na Obr. 12 je znázorněna anténa se substrátem z netkané bavlněné textilie a výšivky z postříbřené příze Silverpam 250 [25].

Obr. 12 Vyšitá štěrbinová flíčková (patch) anténa s přilepeným IC (převzato z [25]*)*

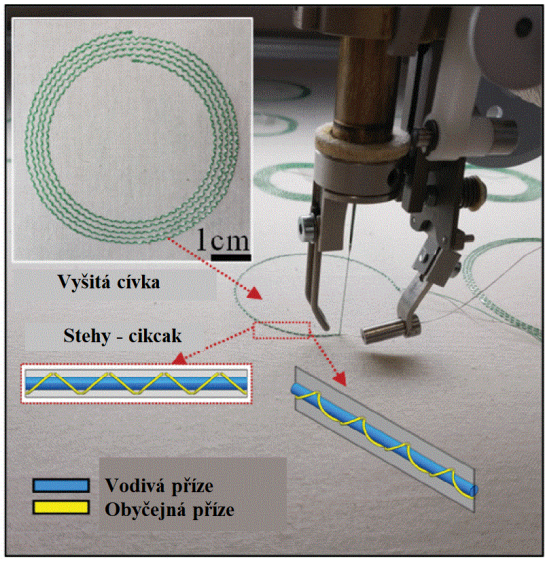
U vzorků textilních antén, které jsou vystavovány namáhání, je důležité provádět testování jejich spolehlivost na cyklické namáhání. Například u vzorků z Obr. 11 se provádělo 100 cyklů natahování do 80% natažení a bylo nutné provádět plynulé natažení trvající 2 sekundy, při rychlejším natažení docházelo k porušení lepeného spoje IC [24].

Textilní antény mohou být používány i jako senzor tlaku, neboli textilní bezdrátové čidlo tlaku (WiPSA). V takovém případě se textilní anténa skládá například z látkového distančního prvku vloženého mezi dvě samostatné vrstvy pasivních LC antén a feritové vrstvy. Pod vnějším tlakem dojde k mechanickému stlačení pružné textilní rozpěrky, a tím ke změně indukčnosti, kterou lze dále přenášet na detekovatelný posun rezonanční frekvence. Důležité je, že WiPSA integruje feritovou fólii s ultra vysokou propustností, která účinně zvyšuje citlivost zařízení a současně zabraňuje interferenci vodivých materiálů [3].



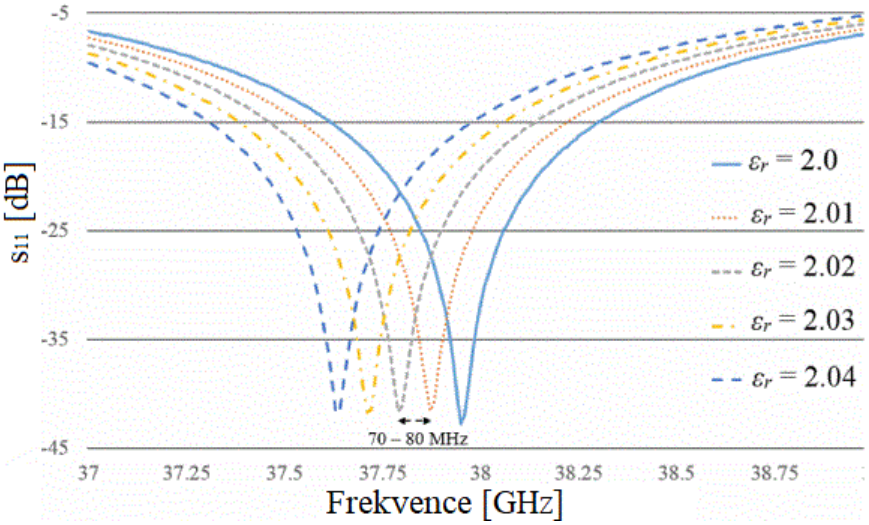
Obr. 13 Textilní WiPSA a)zvětšený pohled na jednu snímající jednotku, b) 3D struktura, c) anténa, d) reakce na mechanické zatížení (převzato z [3]*)*

Dalším typem textilní antény je vyšívaná textilní indukční anténa (Obr. 14) vhodná například pro snímání teploty. Na textilní substráty se vyšívají pomocí vodivé příze kruhové či čtvercové indukční cívky [1].



Obr. 14 Výroba vyšívané indukční antény (převzato z [1]*)*

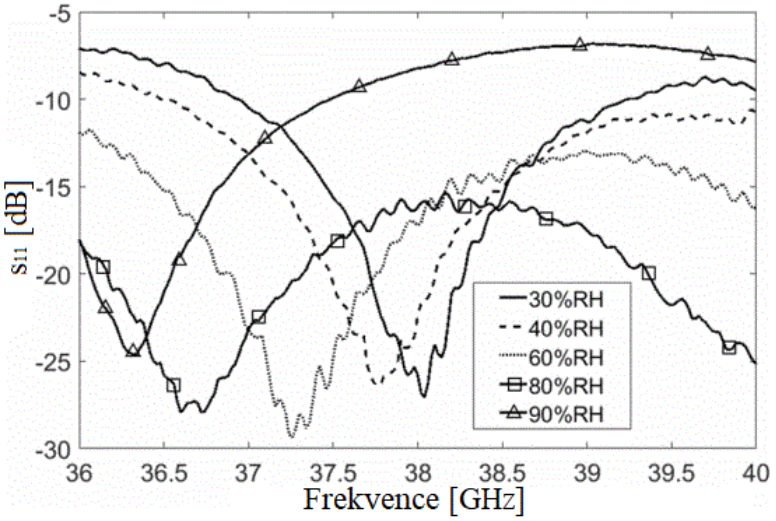
Skutečný stejnosměrný odpor vyšívaných nití určuje Q faktor (faktor kvality) indukční antény. Vyšívaná indukční anténa má nízký odpor a vysoký Q faktor [1]. Díky relativně vysokému Q faktoru je rezonanční frekvence antény citlivá i na malé odchylky relativní permitivity (ε_r) substrátu vyvolané úzkým rozsahem teplotních změn. Relativní permitivita textilních materiálů se zvyšuje s teplotou, a proto rezonanční frekvence antény klesá (Obr. 15). Relativní permitivita substrátu se mění jak s vnějšími teplotami, tak i vlastnostmi plynu, proto je možné používat textilní antény i pro detekci úniku plynu [31].



Obr. 15 Změna s-parametru pro teploty od 20°C do 40°C (změna ε_r o 0,01 odpovídá 5°C) (převzato z [31]*)*

Pasivní UHF RFID textilní tagy mají také velký potenciál pro snímání potu a vlhkosti. Textilie absorbuje vlhkost nebo pot a v důsledku těchto materiálových změn se ovlivní impedance antény. Rezonanční frekvence antény klesá s rostoucí vlhkostí (Obr. 16) [2], [32]. Antény se vyrábí nejen pomocí pletení a vyšívání, ale vyřezávají se také z postříbřené

roztažitelné látky nebo se používá sítotisk polymerního stříbrného inkoustu (z polyesterové pryskyřice a částic stříbra) na nevodivý roztažitelný textilní substrát [2].



Obr. 16 Změna s-parametru antény ovlivněná vlhkostí (převzato z [32])

U všech textilních antén je zapotřebí brát v úvahu jejího nositele. Přítomnost lidského těla narušuje rezonanční frekvenci antény a mění vyzařovací diagram antény. Orientace antény také významně ovlivňuje rezonanční frekvenci antény a hodnotu ztráty zpětného chodu. Nejvyšší posun rezonanční frekvence je převážně pozorován, když je anténa vodorovně orientovaná a je umístěna na zadní části těla. Zatímco nejhorší ztráta zpětného toku je pozorována, když je vodorovně orientovaná anténa umístěna u žaludku [33].

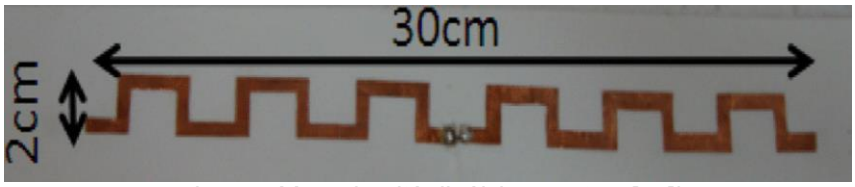
2.3 Aplikace

Hlavní funkcí textilních antén je nejen bezdrátová komunikace, lokalizace a dálkový průzkum, ale také i monitorování zdravotního stavu lidí. Je důležité bezdrátově přenášet data ze senzorů, hlasových signálů či obrazů od záchranných, vojenských či vesmírných pracovníků během zásahů a operací.

Níže jsou popsány různé aplikace textilních antén, jako je například záchrana lidí na moři, lokalizace, dálkový průzkum, využití ve zdravotnictví, sportu či při rehabilitaci.

2.3.1 Lokalizace a záchrana osob

Pro vyhledávání a záchranu lidí na moři se integrují antény s osobními lokátory (PLB) přímo do záchranných vest. Člověk tedy nemůže lokátor PLB zapomenout. Anténa je chráněna před škodlivými účinky mořské vody [34], [35]. Jedná se převážně o meandrovitý dipól, který obsahuje planární reflektor vyrobený z kovové fólie [34] či o vodivé textilie a pomocí inkoustového tisku vytisknutou elektroniku [35].



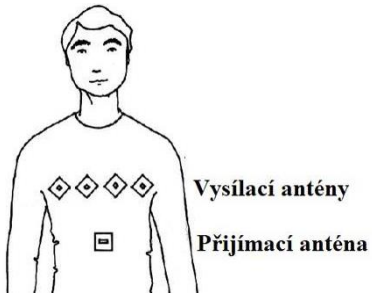
Obr. 17 Meandrovitý dipól (převzato z [34]*)*

Obr. 18 Testování záchranné vesty s integrovanými textilními anténami (převzato z [35]*)*

Pro globální navigační satelitní systémy (GNSS), mezi které patří GPS, Galileo či GLONASS, byly navrženy kruhově polarizované textilní antény pro lokalizaci, jak pro civilní, tak i pro vojenská pásma. Textilní antény i jejich zemní roviny jsou vyráběny například z látky Flectron (metalizovaná tkanina kombinující vysoce vodivé kovy s lehkou tkaninou) [36], [37].

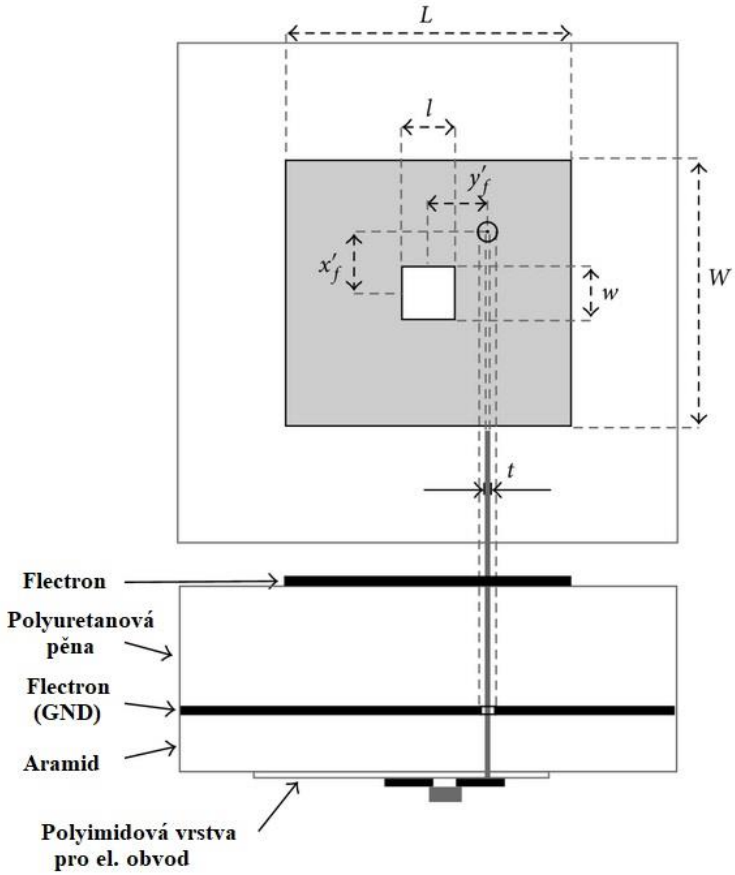
Pro přesnou lokalizaci je vhodné, aby byly v zorném poli antény alespoň 3 satelity, proto je zapotřebí věnovat pozornost rozmístění textilních antén. Nejlepším místem pro integraci jsou tedy ramenní části oděvu nebo helmy. Tento způsob lokalizace je ale možný pouze ve venkovních prostorách, v případě vnitřní lokalizace je zapotřebí rozšířit nositelný systém například o technologie Wi-Fi či UWB [36].

Textilní antény mohou být součástí nositelného Dopplerova radarového systému pro detekci osob za zdmi a zavřenými dveřmi nebo pro hledání obětí pod troskami. Pro zajištění dostatečné izolace mezi vysílací a přijímací částí radaru mohou být použity různé vysílací a přijímací antény s opačnou kruhovou polarizací. Kromě toho lze k určení směru, ve kterém se osoba nachází, použít anténní pole [38].



Obr. 19 Umístění textilního radarového systému (převzato z [38]*)*

Vysílací anténa je vyrobená z vodivého flíčku (patch) a zemní roviny z měděné nylonové tkaniny Flectron, jako substrát je použita polyuretanová ochranná pěna Azzurri vhodná pro použití v hasičských oblecích. U přijímací antény je nosným substrátem také polyuretanová pěna a zemní rovina s vodivým flíčkem (patchem) jsou z Flectronu (Obr. 20). Přijímací anténa je dále připojena k nízkošumovému zesilovači (LNA) [38].

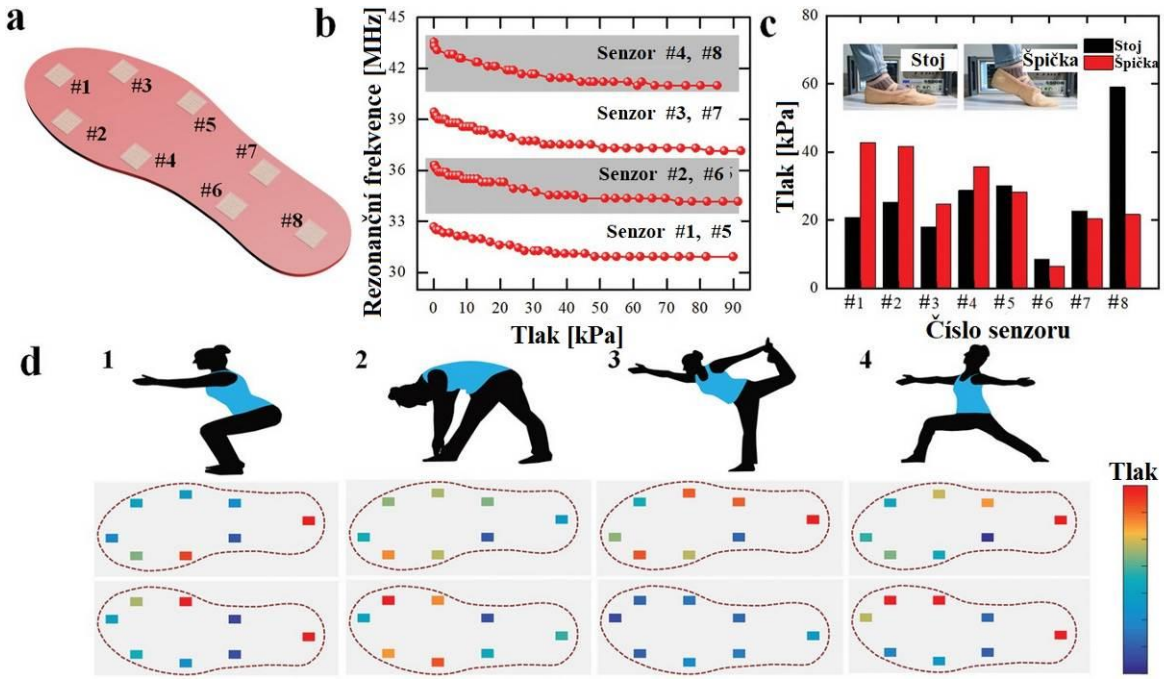


Obr. 20 Schéma a geometrie přijímací antény (převzato z [38]*)*

2.3.2 Zdravotnictví, rehabilitace a sport

Textilní antény je možné využívat i ve zdravotnictví, například jako senzory tlaku, teploty, vlhkosti, pro snímání EKG, EEG nebo pro snímání dechu [4], [5].

Pro mapování rozložení plantárního stresu neboli namáhání chodidla nalezly textilní antény také své uplatnění. Monitorování plantárního tlaku je využíváno při diagnostikách nohou, sportovní biomechanice či při analýze chůze. Díky měření plantárního tlaku se předchází vzniku diabetických vředu na nohou [3]. K měření těchto tlaků chodidla se využívá například textilní WiPSA, o které je zmínka v předchozí kapitole 2.1.



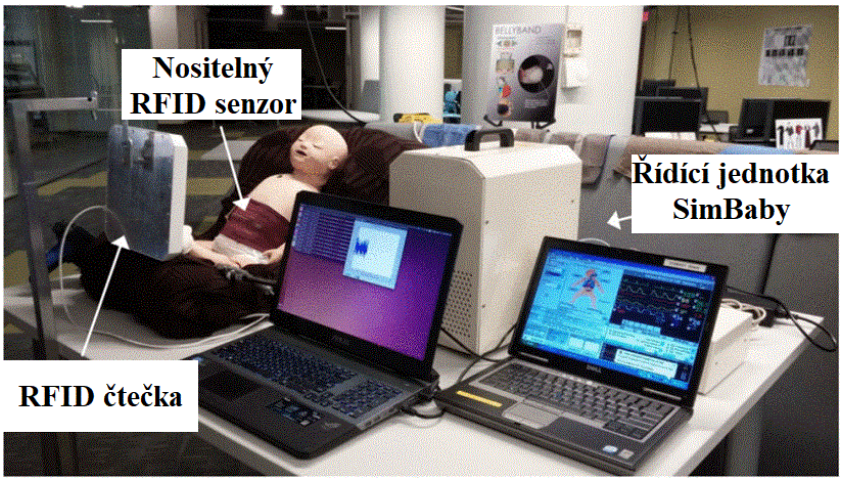
Obr. 21 Ukázka použití technologie WiPSA pro snímání plantárního tlaku (převzato z [3]*)*

Na Obr. 21 je znázorněna stélka boty, která je citlivá na tlak díky osmi integrovaným snímajícím jednotkám umístěným v oblasti špičky, klenby a paty. Při změně tlaku na snímající jednotku dochází ke změně rezonanční frekvence. Zkoumala se také změna tlaku ve dvou pozicích: vzpřímený stoj a stoj na špičkách. Dále se mapoval plantární tlak při cvičení jógy [3].

Pro bezdrátové snímání teploty se využívá textilní indukční anténa zmíněna v kapitole 2.1. Potenciálně by tento systém mohl být využit pro monitorování rakoviny prsu. S teplotním polem se detekuje teplotní profil a abnormální zvýšení teploty, to se odesílá na chytrý telefon s podporou NFC [1].

Pasivní UHF RFID textilní tagy se používají i pro monitorování vlhkosti a potu. Textilie absorbují vlhkost, a tím se ovlivní impedanční přizpůsobení antény v důsledku změněných materiálových parametrů tkaniny [2].

Monitorování toho, zda dítě pravidelně dýchá, může být užitečné při detekci apnoe s možností zabránit akutní kardiorespirační zástavě. V současné době jsou nositelné chůvičky vybaveny modulem WiFi nebo Bluetooth, který sbírá data ze senzorů integrovaných do oděvu a odesílá je do mobilního zařízení. Tyto monitory však využívají aktivní moduly, které jsou objemné s nutností pravidelného dobíjení. Textilní antény snímající natažení mají potenciál vylepšit tuto současnou technologii, protože se detekce dechového vzorce dítěte provede prostřednictvím pohodlnějšího a plně textilního oděvu, který nevyžaduje baterie ani těžkopádnou elektroniku [5].



Obr. 22 Laboratorní monitorování dechu kojence (převzato z [5]*)*

3 Textilní antény jako senzory natažení či deformace

Natažení či namáhání je parametr, který indikuje fyzickou deformaci v důsledku aplikovaného zatížení. Jedná se o kritický parametr při monitorování lidského těla pro aplikace WBAN (bezdrátová síť oblasti těla), ale i těles v mnoha průmyslových odvětví, od civilní infrastruktury, mechanických zařízení až po letecký průmysl a aplikace v zemědělství. V civilních strukturách je snímání namáhání nutné pro zajištění bezpečnosti silnic, mostů a podpěr budov, aby se zabránilo neočekávaným kolapsům. Ve výrobních procesech a konstrukcích umožňuje snímání mechanického namáhání včasné zjištění vibrací, nadměrného zatížení a vývoje trhlin. Stanovení napínání či namáhání půdy umožňuje vědcům ověřit modely predikce zhutnění půdy nebo bobtnání. Integrace snímačů natažení do každodenního oblečení z hlediska textilních materiálů otevírá nové oblasti aplikací, jako je WBAN. Nositelného snímače namáhání je možné použít pro biomedicínské monitorování, jako je kontrakce, otoky končetin, dýchání nebo pohyb končetin, ale také pro zábavu jako ovladače virtuální reality a her. Měření namáhání kolenních nebo loketních kloubů se ve sportu používá k monitorování počtu kroků a rychlosti při joggingu, nebo při rehabilitaci pro online zpětnou vazbu, zda pacient používá poškozený kloub v příslušném rozsahu. Detekce namáhání má obrovský požadavek na bezdrátová, nízkonákladová, kompaktní, plně autonomní a vysoce spolehlivá zařízení, která jsou schopna nepřetržitě sledovat možné anomálie v pozorovaných objektech nebo systémech [5], [28], [39], [40].

Vyšívané či pletené antény jsou přirozeně roztažitelné a flexibilní, proto mají velký potenciál pro pohodlné nošení. Elektromagnetické vlastnosti antény, jako je impedance, zisk, výkon, hodnota Q a parametry S, jsou významně ovlivňovány použitými materiály, geometrickými variacemi a deformacemi antén. Citlivost textilních antén v různých geometrických variacích umožňuje použití antén jako senzory mechanické deformace bez baterie či zdroje energie. Změny citlivosti se modulují ve zpětně odražených elektormagnetických vlnách a jsou detekovány čtečkou. S RFID anténami vyšívanými přímo na textil nebo na oděvy se zpětně rozptýlené elektromagnetické vlny od RFID štítků budou lišit podle deformace antén způsobené pohyby člověka. RFID čtečka ve snímacím rozsahu detekuje změny vlastností antén způsobené pohyby těla [30], [40].

Snímání namáhání založené na RFID je slibnou metodou s ohledem na monitorování pohybů lidského těla. Pasivní UHF RFID tagy nevyžadují žádné baterie ani vodiče a snadno se integrují do oděvu. Pohyb lidského těla se monitorují připojením tagů na místa vystavená namáhání (lokty, kolena, chodidla, hrudník). Umožní například počítání pohybů během cvičení nebo monitorování určité končetiny nebo kloubu těla (například jeho zotavení po operaci). Při zvýšením citlivosti senzoru je možné monitorovat dýchání [41].

3.1 Princip snímání natažení

Z výzkumu [29] pasivního bezdrátového anténního senzoru určeného pro snímání mechanického napětí a trhlin je patrné, že pokud dojde k deformaci antény, její tvar se změní, způsobí to posun elektromagnetické rezonanční frekvence antény. Pro modulaci anténního signálu je použit čip pro vysokofrekvenční identifikaci (RFID), bezdrátová čtečka tedy může snadno rozlišit zpětně rozptýlený signál snímače od nežádoucích odrazů prostředí [29].

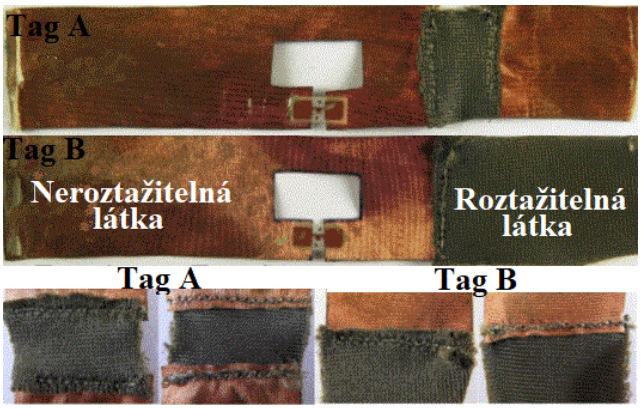
Při deformaci antény dojde ke změně jejich RLC parametrů, tedy ke změně rezonanční frekvence (dle rovnice (1)), kterou jsme schopni měřit například pomocí vektorového analyzátoru. Také se využívá změn intenzity přijatého signálu (RSSI) z indukčně vázaného RFID tagu při fyzickém roztahování [5].

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{1}$$

Díky použití komerčně dostupných čteček RFID reaguje přenosný snímač RFID na mechanické deformace pomocí RSSI. Postupné filtrování a analýza umožňuje odvodit sledovaný biomedicínský parametr [5].

3.2 Pokovené textilní antény

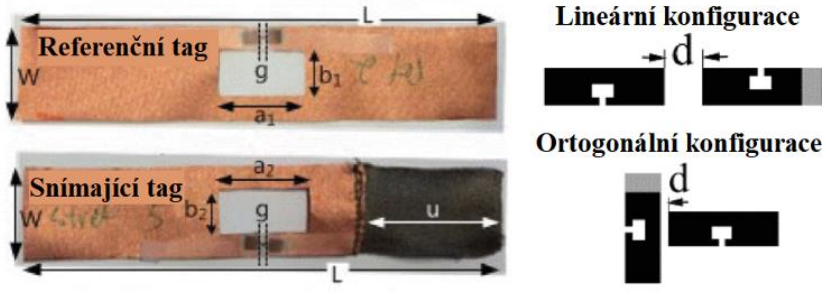
Snímání mechanického natahování probíhá například pomocí pasivního UHF RFID štítku, který funguje jako bezdrátový senzor bez baterií s digitálním identifikátorem. Jedná se o RFID senzor natažení, jehož hlavní tělo antény je vyrobeno neroztažitelnou vysoce vodivou textilií a je sešito vodivými závity s roztažitelnou vodivou látkou (Obr. 23). Jinými slovy jde o senzor natažení založený na textilní anténě vytvořený kombinací roztažitelných a neroztažitelných metalizovaných textilií, ty jsou k sobě sešity nití potaženou kovem pomocí vyšívacího stroje. Natažení se snímá pomocí měření odezvy síly zpětného rozptylu antény na jejím prodloužení [42].



Obr. 23 Realizované antény snímající natažení a jejich přední (vlevo) a zadní (vpravo) pohledy (převzato z [42]*)*

Pro realizaci této textilní antény (Obr. 23) pro snímání natažení byla zvolena anténa T-párový dipól, tento typ se hojně používá u UHF RFID štítků. Neroztažitelná část je vyrobená z vysoce vodivé měděné tkaniny a roztažitelná část je z roztažitelné postříbřené textilie. Dále používá se IC umístěný na interposeru připevněný k textilní anténě vodivým stříbrným epoxidem [42].

Další možností umožňující bezdrátové snímání natažení na základě pasivních UHF RFID štítků je vysoce roztažitelná e-textilní anténa skládající se ze dvou antén, které jsou vyrobeny z textilie potažené mědí (Obr. 24). Jedná se o dva senzory, jeden s anténou citlivou na natažení a druhý s necitlivou anténou na natažení. Jedna anténa funguje tedy jako referenční a druhá jako snímající. Senzory jsou založeny na mechanismu odečtu zpětného rozptylu. Referenční anténa je vyrobena z neroztažitelné polyesterové textilie potažené mědí. Snímající anténa je z neroztažitelné látky stejné jako u referenční a roztažitelné textilie (76 % Nylon 24 % elastická vlákna). Roztažitelné a neroztažitelné části jsou sešity pokovenou šicí nití [43].

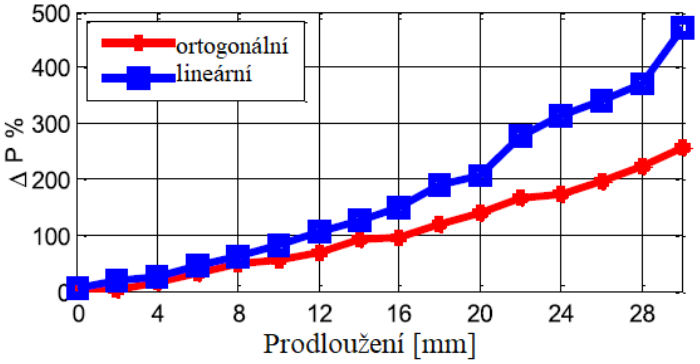


[mm]	a_1	b_1	a_2	b_2	g	L	W	d	u
Lineární	18.7	10	18.6	9.73	2	100	20	20	30
Ortogonální	17.3	10	17.3	10	2	100	20	5	30

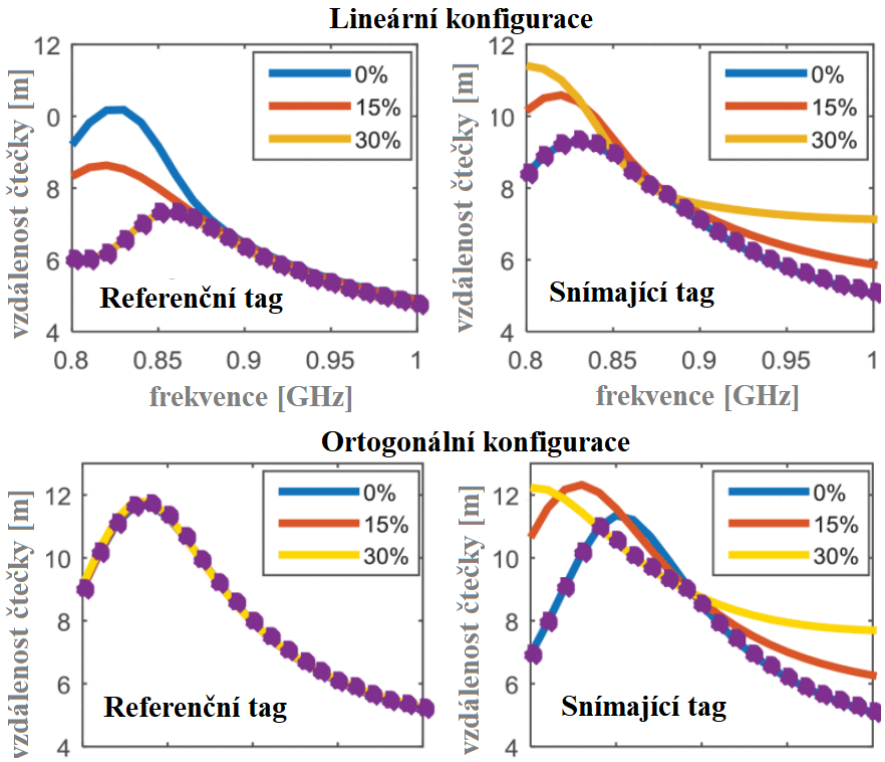
Obr. 24 Dvoudílná anténa pro snímání natažení (převzato z [43]*)*

Měření natažení bylo prováděno s běžným nemodifikovaným hardwarem čtečky RFID. Natažení bylo snímáno až do 30 %, charakteristiky čtecích rozsahů se zvýrazněnou minimální čtecí vzdáleností (fialová) jsou na Obr. 26, natažení snímající antény mění čtecí rozsah tagu. Na Obr. 25 je znázorněna závislost procentuální variace výkonu přijatého signálu (ΔP%) na natahování. Pro výpočet procentuálního výkonu přijatého signálu se používá rovnice (2). V ortogonální konfiguraci má senzor vysoce lineární odezvu ve srovnání s lineární konfigurací [43].

$$\Delta P\% = \frac{P_{snímající} - P_{referenční}}{P} \quad (2)$$



Obr. 25 Procentuální variace zpětně rozptýleného při natahování (převzato z [43]*)*



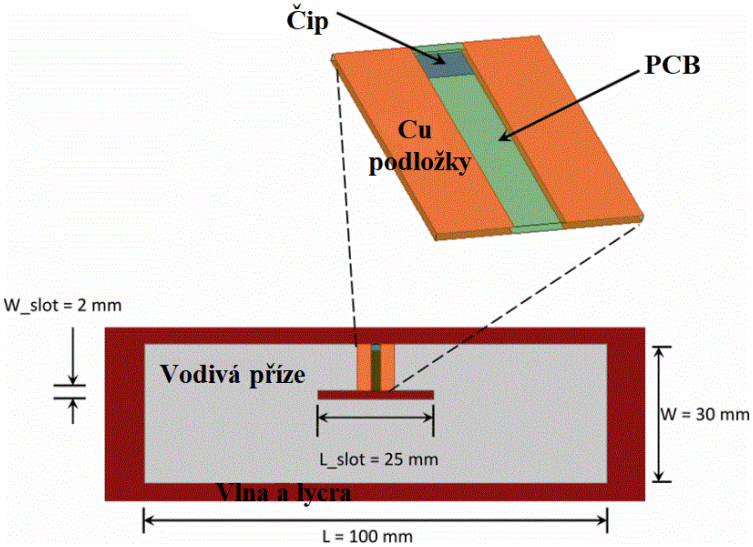
Obr. 26 Charakteristiky odezev dvoudílných antén pro 3 odlišná natažení (převzato z [43]*)*

3.3 Pletené textilní antény

Další technologií pro výrobu textilních antén je pletení vodivých a nevodivých přízí. Plně pletené antény vybavené indukčně vázanými RFID tagy poskytují dobrý výkon snímání natažení [5]. V práci [44] vytvořili pro monitorování dechu břišní pás (Bellyband) využívající pletenou skládanou dipólovou anténu s mikročipem RFID tagu.

Obr. 27 Pletená anténa v břišním páse (Bellyband) (převzato z [44]*)*

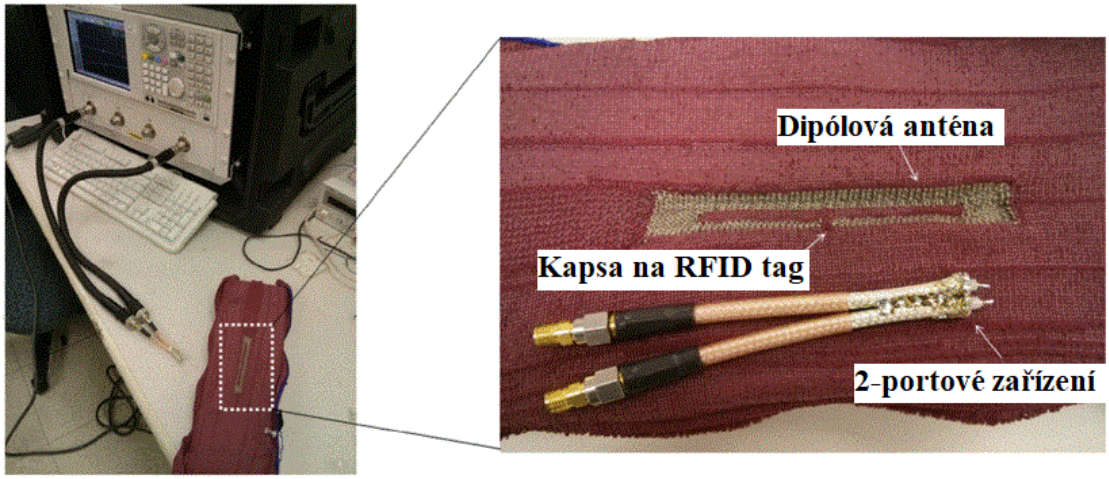
Čip RFID tagu je umístěn na desku plošných spojů (PCB) s měděnými podložkami, které jsou omotány vodivou přízí pro lepší kontaktování, celá deska s čipem je pouze vložena do upletené kapsy v textilii. Vložením PCB s RFID čipem do upletené kapsy dojde k fyzickému kontaktu mezi anténou a RFID čipem, jelikož se nejedná o trvalý kontakt, je možné vyměnit RFID čip, aniž by došlo k poškození antény. V tomto případě byla zvolena jako vodivá příze postříbřený nylon a jako nevodivá směs viskózy a polyamidu [44].



Obr. 28 Schéma pletené antény s kapsou a umístění čipu (převzato z [44]*)*

Jako další textilní anténa vhodná pro snímání natažení, pro účely jako je například monitorování dechu, je anténa popsána v článku [5]. Jedná se o anténu, která je inspirována [44], o které je zmínka výše v této kapitole. V tomto případě [5] byla konkrétně použita textilie ze směsi vlny a lycry, do které byla vpletena anténa z vodivých postříbřených nylonových přízí. Jako RFID tag byl zvolen 2-portový IC tag využívající

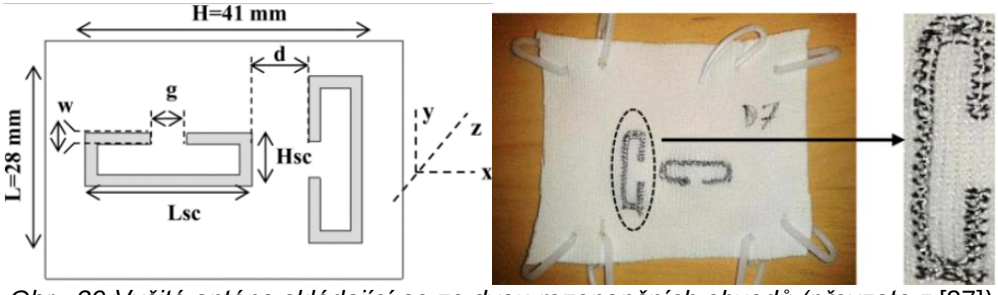
technologii indukční vazby. RFID tag se integruje do textilie jeho vložením do malé pletené kapsy umístěné mezi rameny antény, tedy bez nutnosti fyzického pájení, čímž se zachová plná flexibilita a pohodlí výsledného oděvu. Na Obr. 29 je znázorněna tato anténa a také nastavení experimentu se síťovým analyzátorem a dvouportovým zařízením.



Obr. 29 Měření s-parametrů pomocí síťového analyzátoru a dvouportového zařízení s detailním pohledem na prototyp pletené skládané dipólové antény (převzato z [5]*)*

3.4 Vyšité textilní antény

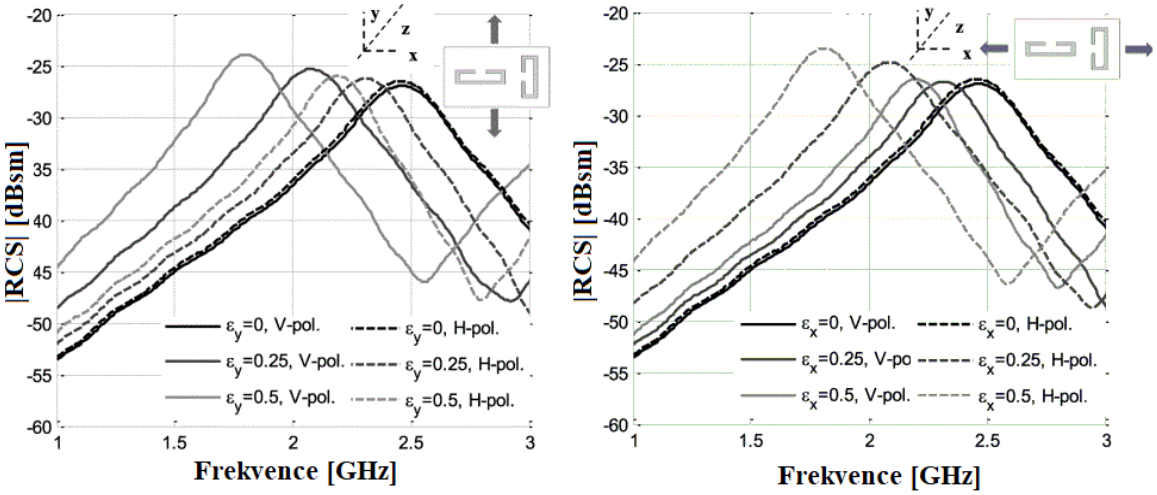
Pro monitorování strukturálních deformací je navržen bezdrátový bezčipový senzor. Senzor je složen ze dvou identických rezonančních obvodů vyšitých na roztažitelné polyesterové látce pomocí vodivých vláken, které jsou vůči sobě otočené o 90°, to umožňuje detekci natažení ve 2D rovině. Rezonanční obvody mají tvar přerušeného obdélníkového prstencového rezonátoru (SRR), znázorněno na Obr. 30. Použití obdélníku místo čtvercového SRR zvyšuje citlivost na snímaná natažení v jednom směru [27].



Obr. 30 Vyšitá anténa skládající se ze dvou rezonančních obvodů (převzato z [27]*)*

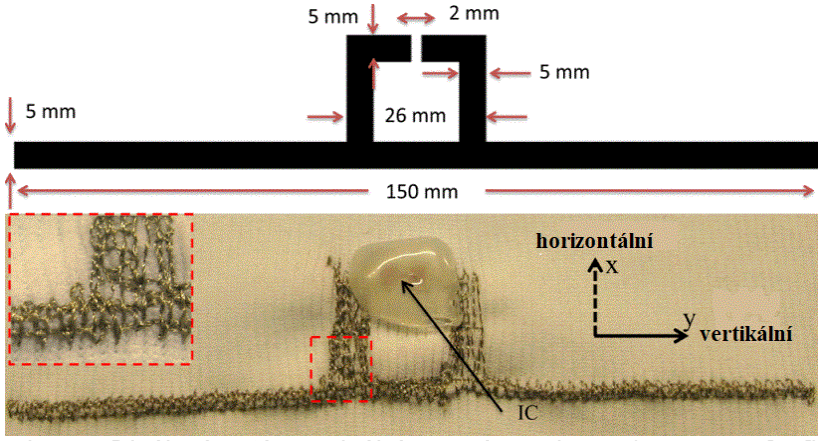
Zpětně odražená vlna je detekována pomocí frekvenční radarové techniky s kontinuální vlnou (FSCW). Radar provádí detekci skenováním dvou ortogonálních polarizací. Každá z nich poskytuje informace o deformační složce do příslušné osy (směru). Variace radarového průřezu (RCS) detekovaná ve vertikální polarizaci může informovat o natažení podél vertikální osy, zatímco horizontální polarizace je užitečná pro detekci natažení ve vodorovné ose, znázorněno na Obr. 31. Aby bylo možné oddělit

natažení v 2D, musí být variace RCS použitého senzoru významně odlišná v závislosti na polarizaci. To znamená, že nelze použít senzor, který poskytuje stejnou amplitudovou nebo frekvenční změnu v obou polarizacích při vystavení natažení v jedné ose [27].



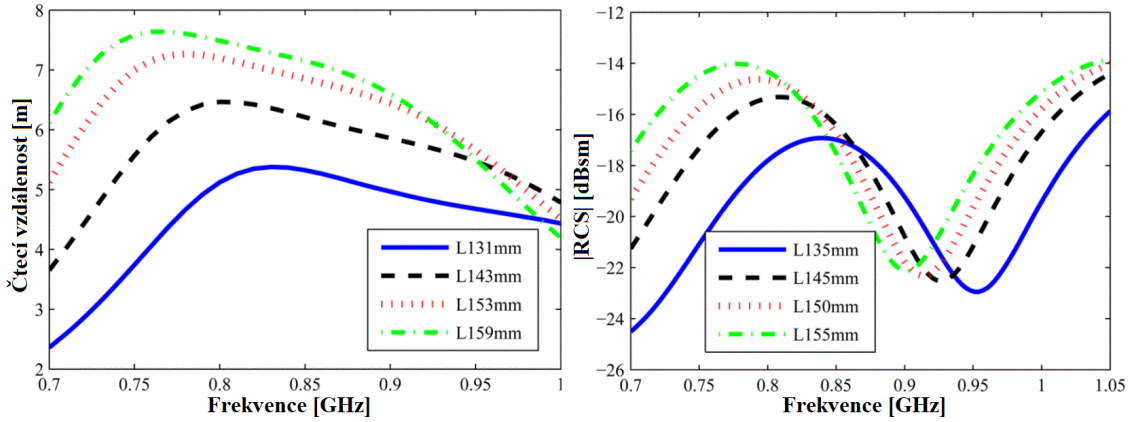
Obr. 31 Hodnoty RCS při vertikálním a horizontálním natažení (převzato z [27]*)*

Jako další vyšitou textilní anténou pro snímaní natažení či jiných deformací je RFID senzorový tag s režimem dvojího dotazování [45]. Dipólová anténa (Obr. 32) byla vyšita na polyesterovou tkaninu pomocí vodivé příze.



Obr. 32 Dipólová anténa s duálním čtecím režimem (převzato z [45]*)*

Snímač využívá čipovou strukturu RFID tagu, ale také techniku radarového měření, která se běžně používá pro dotazování bezčipových RFID tagů. Režim dvojího dotazování tedy umožňuje snímat natažení technikou čtecího rozsahu (získávání ID technikou čtení založenou na protokolu) nebo měřením RCS. Na Obr. 33 jsou závislosti získané pomocí těchto dvou metod pro různá natažení. Ze závislostí je patrné, že čipový RFID snímač natažení může být detekován pomocí bezčipových detekčních technik, tak i pomocí čipových technik [45].

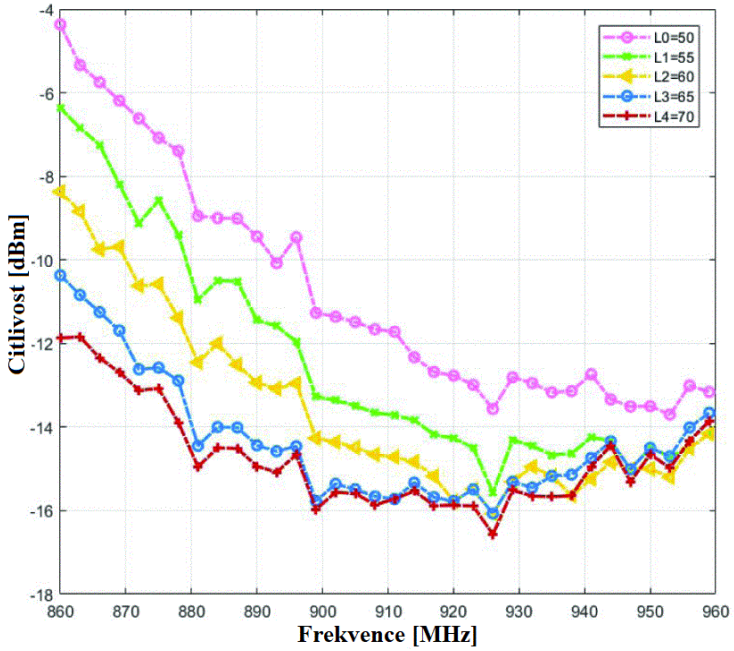


Obr. 33 Čtecí vzdálenost a RCS pro různá natažení antény (převzato z [45]*)*

Předpoklad, že se rezonanční frekvence a citlivost vyšívaných dipólových antén liší s prodloužením geometrie antény využívá i článek [30]. Vyšívaná UHF RFID anténa umožňuje bezproblémovou integraci RFID štítků s oblečením. Tyto antény (Obr. 34) jsou vytvořeny pomocí meandrovitých čar vyšitých stříbrnými kroucenými vícevláknitými přízemi v dipólové struktuře umožňující snadné roztažení a deformování.

Obr. 34 Dipólová anténa s meandrovým tvarem (převzato z [30]*)*

Čtečka dokáže zaznamenat zpětně rozptýlené signály RFID štítků a extrahovat informace o prodloužení způsobené roztažením vyšívaných RFID štítků. Tato mechanická namáhání antény následně mění impedanci a vyzařovací charakteristiku antén s tagem [30].

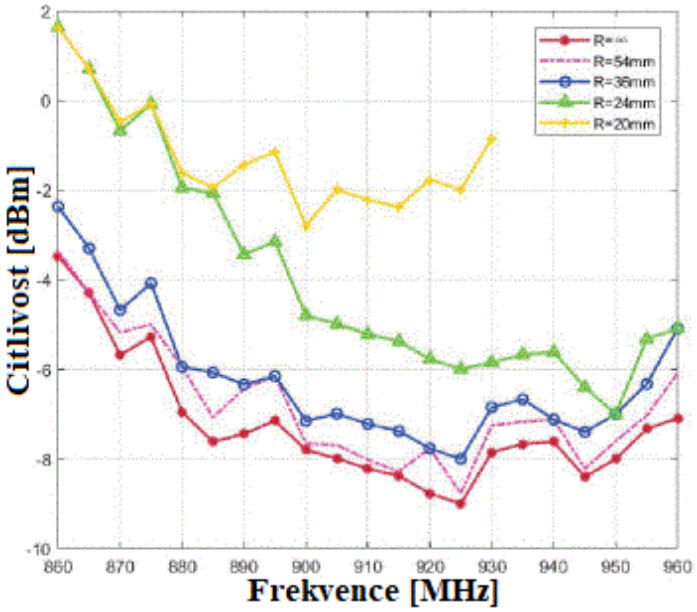


Obr. 35 Citlivost vyšité meandrovité antény pro různá natažení (převzato z [30]*)*

Měření (Obr. 35) ukazuje, že se správně navrženou a optimalizovanou geometrií vyšívané antény je vykazován dobrý vztah mezi citlivostí a prodloužením antény [30].

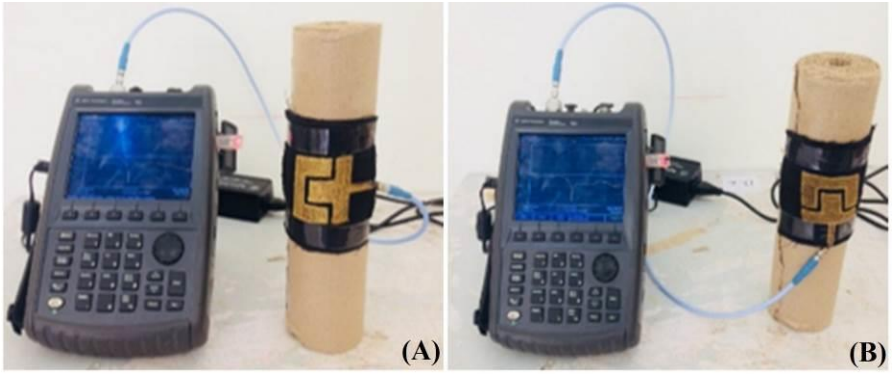
Výkon antény je také významně ovlivněn zakřivením antén. Závislost citlivosti antény (Obr. 36) na ohybu je patrná na Obr. 37. Čím větší je ohnutí, anténa je ohnuta na co nejmenší průměr, tím je výkon slabší [40].

Obr. 36 Vyšitá textilní anténa citlivá na ohyb (převzato z [40]*)*



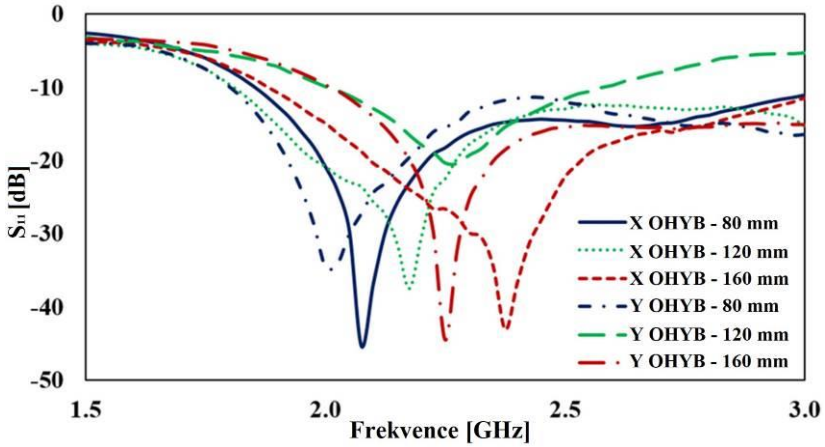
Obr. 37 Závislost citlivosti antény na poloměru ohybu (převzato z [40]*)*

Další vyšitou anténou je kompaktní symetrická mikropásková textilní anténa skládající se ze čtyřvrstvé struktury se dvěma vrstvami substrátu vloženého mezi patch a zemní rovinu. Vodivé části, výšivka a zemní rovina jsou vyrobeny pomocí stříbrné kovové příze zabalené do jádra hedvábné nitě (Zari) a substrát z tkané bavlněné tkaniny [46].



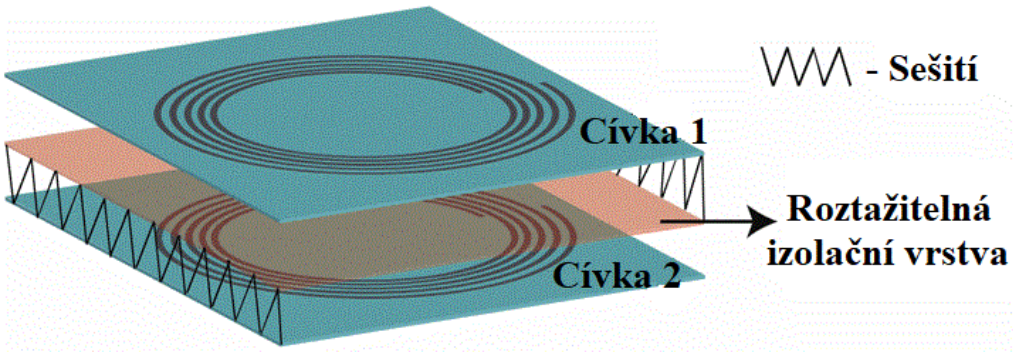
Obr. 38 Měření vlivu ohybu na anténu ve dvou směrech (A - směr X, B - směr Y) (převzato z [46]*)*

Výsledky měření ohybu antén podle Obr. 38 jsou na Obr. 39. Je patrné, že se parametry antén mění vlivem poloměru ohybu, ale také směrem působení. S rostoucím poloměrem se zvyšuje rezonanční frekvence a anténa má tendenci dosahovat své normální (žádný ohyb antény) rezonanční frekvence.



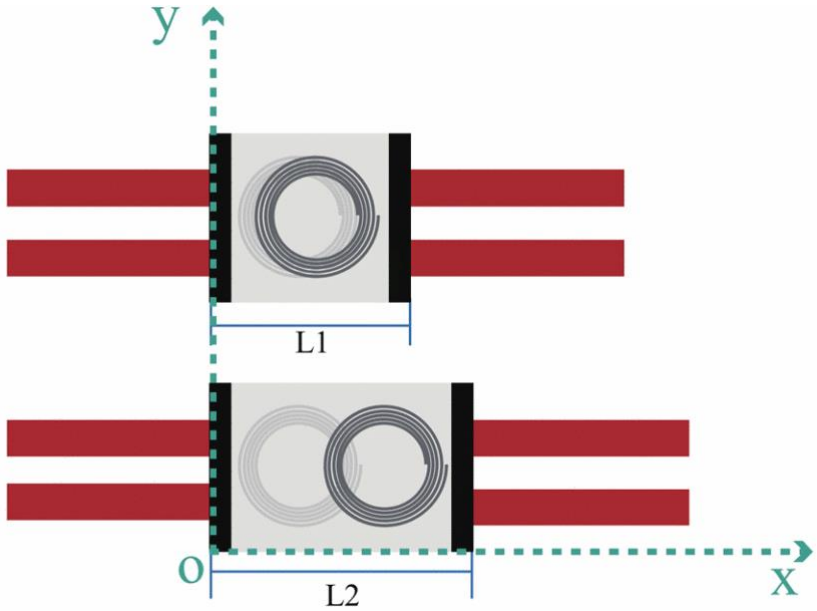
Obr. 39 Vstupní činitel odrazu s_{11} pro různé ohyby (převzato z [46]*)*

Namáhání umožňuje snímat i vyšívaný indukční snímač složený ze dvou rovinných cívek se vzájemnou vazbou (CPC). Tento snímač je vyšit pomocí běžných vodivých přízí a všechny materiály jsou komerčně dostupné ve velkém množství, proto má také dobrý potenciál být komercializován jako nízkonákladový systém monitorování zdraví, jako je například monitorování dýchání. Na bavlněnou tkaninu jako nevodivý substrát se vyšijí vodivou přízí (vrstvený svazek vláken z nerezové oceli) dvě sériově připojené cívky. Cívky vytvoří indukční snímač namáhání na bázi CPC a 3D pleteniny (roztažitelná izolační vrstva) (Obr. 40) [47].



Obr. 40 Indukční snímač namáhání na bázi CPC (převzato z [47]*)*

Při nadechnutí dojde k natažení snímače, dojde k posunu mezi dvěma cívkami (Obr. 41), to způsobí změnu odražené vlny, kterou přijímá NFC čtečka.



Obr. 41 Schéma natažení indukčního snímače (převzato z [47]*)*

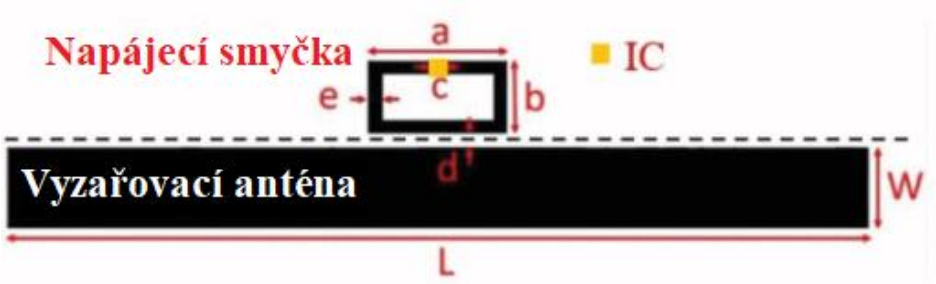
3.5 Textilní antény realizované pomocí tisku

Jako textilní antény pro snímání mechanických deformací se dále používá i tištěná elektronika. Tisk je rychlý a jednoduchý výrobní proces. Metodou sítotisku se vytvoří na textilním či pružném PVC substrátu pomocí inkoustu se stříbrem či jiným kovem vodiče a RFID tagy [48], [49], [41].

Jako konkrétní příklad je uvedena mikropásková flíčková anténa navržena na pružném textilním polyesterovém materiálu, na který je nanesena měděná vrstva [39]. Mechanické namáhání mění velikost antény, to vytváří změnu rezonanční frekvence a faktoru kvality antény.

3.6 Kombinované textilní antény

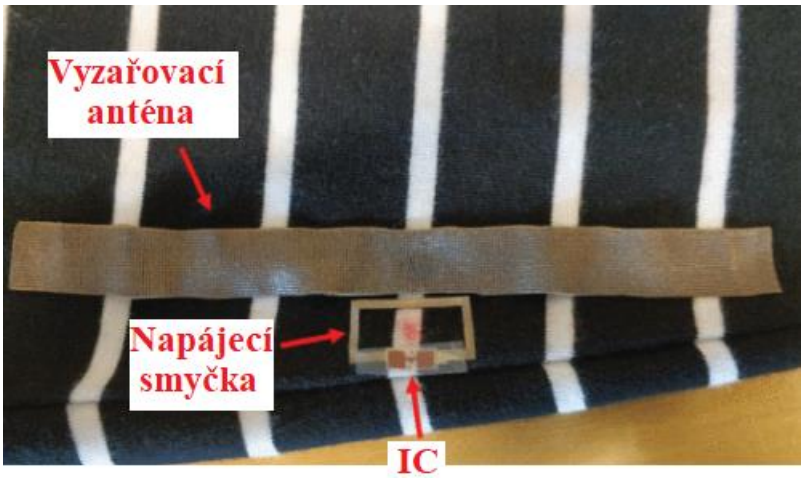
Aby se zabránilo problémům se spolehlivostí, využívá se dvoudílná anténní struktura, opět s UHF RFID ke snímání natažení. Samostatná struktura antény (Obr. 42) obsahuje vyzařovací anténu a napájecí smyčku s integrovaným obvodem. Tyto dvě části antény jsou spojeny indukční vazbou a IC část tak může být umístěna v malé vzdálenosti od vyzařující antény. Konstrukce antény má dvě oddělené části, napájecí smyčku a vyzařovací anténu. Je tedy možné připojit IC k neroztažitelnému substrátu, zatímco vyzařovací anténa může být plně roztažitelná [28].



a	b	c	d	e	W	L
21.6 mm	11.3 mm	2 mm	2.5 mm	1.9 mm	12.6 mm	135 mm

Obr. 42 Návrh dvoudílné antény (převzato z [28]*)*

Vyzařovací anténa je vyrobena z roztažitelné pletené vodivé tkaniny se stříbrem. Napájecí smyčka je vyříznuta z poniklované textilie. Celá platforma senzoru se poté připevní na běžnou textilii (Obr. 43) pomocí textilního lepidla (Prym Textil + lepidlo). Prodloužení antény o 20 % vede k rozdílu 10 dB zpětně rozptýleného výkonu, což znamená, že tento snímač může dosáhnout vysoké citlivosti na natažení [28].



Obr. 43 Dvoudílná anténa na bavlněném tričku (převzato z [28]*)*

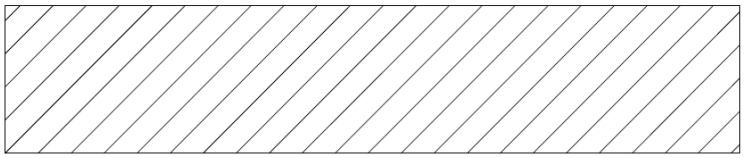
4 Návrh textilní antény pro detekci natažení a deformace

V praktické části této práce byly navrženy vzorky textilních antén pro snímání mechanického deformace, konkrétně natažení.

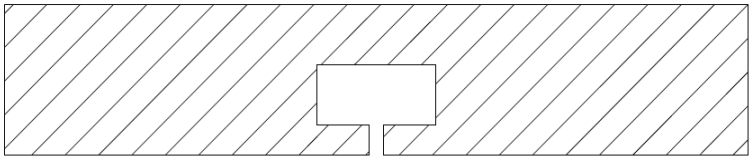
4.1 Návrhy antén

Vzorky byly navrhovány převážně pro výrobu pomocí technologie pletení a vyšívání. Tyto dvě technologie umožňují vpletení vodivých nití či vyšití obrazce vodivými nitěmi, které vytvoří pružnou a ohebnou anténu. Při navrhování těchto antén se neřešily výpočty parametrů antén, vycházelo se pouze z rešerší o textilních anténách snímající natažení ([5], [27], [28], [40], [42], [43], [44]) zmíněných výše v kapitole 3. Díky rešerši byl vybrán tvar antény připomínající písmeno C - přerušený obdélníkový prstencový rezonátor (SRR), zobrazený na Obr. 45 a Obr. 46. Na základě běžné topologie dipólových antén byl zvolen ještě tvar motýlkové antény (Obr. 47) a obyčejný dipól (Obr. 48).

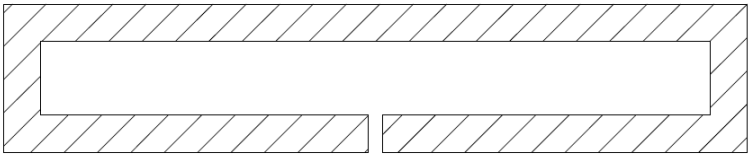
Dohromady bylo navrženo 5 tvarů antén: obdélník, přerušený obdélníkový prstencový rezonátor (SRR) připomínající písmeno C ve dvou různých šířkách, motýlek a obyčejný dipól. Níže na Obr. 44 - Obr. 48 jsou znázorněny tvary těchto antén, rozměry se nacházejí v příloze - Rozměry návrhů antény.



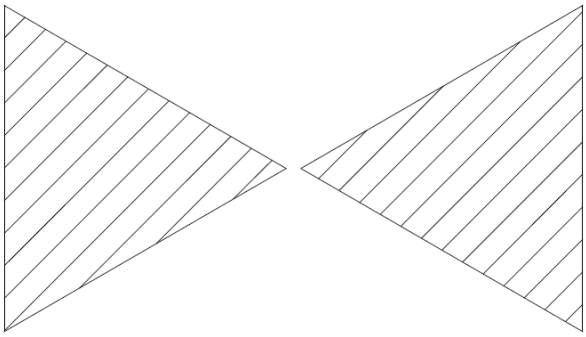
Obr. 44 Návrh tvaru antény – obdélník



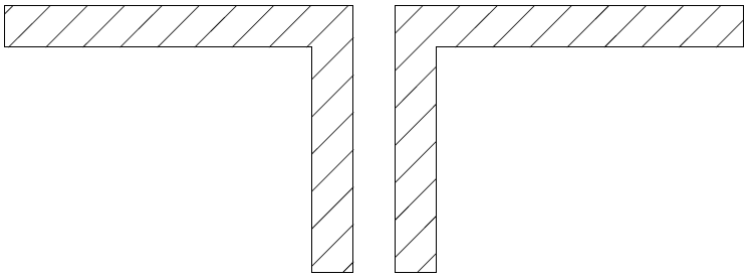
Obr. 45 Návrh tvaru antény – přerušený obdélníkový prstencový rezonátor (SRR) – široký



Obr. 46 Návrh tvaru antény – přerušený obdélníkový prstencový rezonátor (SRR) – úzký



Obr. 47 Návrh tvaru antény – motýlek



Obr. 48 Návrh tvaru antény – obyčejný dipól

4.2 Realizace antén

V plánu bylo vyrobit převážně pletené vzorky antén a poté pár vyšívaných. Pletení bylo preferováno před vyšíváním díky své pružnosti. Pletené struktury lze natahovat více v porovnání s vyšívanými a nemají takové sklony k porušení vodivých struktur. Při výrobě pletených vzorků textilních antén externí firmou došlo ale ke komplikacím způsobených koronavirovou krizí, pletené vzorky nebyly vyrobeny (až na jeden vzor) a bylo nutné vyrobit vzorky pomocí vyšívání.

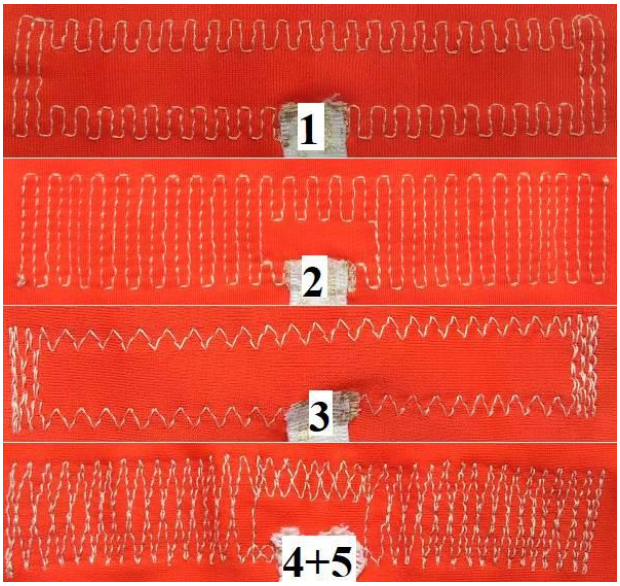
4.2.1 Vyšité antény

Vyšívání antén probíhalo pomocí vyšívacího stroje Bernina 750. Návrhy výšivek byly vytvořeny v programu Inkscape a poté byly konvertovány do vyšívacího softwaru Bernina designer verze 7 (BERNINA 7 – DesignerPlus). Pro vyšívání byly zvoleny 4 tvary antén: přerušený obdélníkový prstencový rezonátor (SRR) připomínající písmeno C ve dvou různých šířkách (Obr. 49), motýlek (Obr. 50) a obyčejný dipól (Obr. 51), tedy všechny navržené tvary kromě obdélníku.

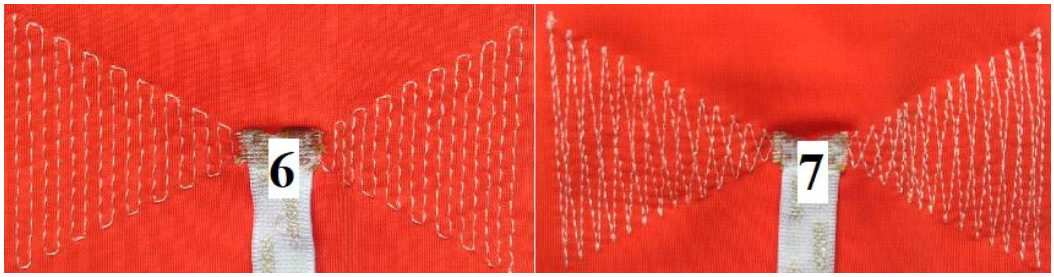
Aby byly vyšité antény pružné, bylo nutné vybrat velmi elastickou látku, to splnila plavkovina složená z 20 % elastanu a 80 % polyamidu. Jako vyšívací nit byla použita hybridní niť 47/53 PES/Cu_Ag, tedy polyesterová vlákna s postříbřenou mědí. Je důležité zmínit, že kompletně vyplněná výšivka není pružná, i když je zhotovena na velmi elastické látce. Proto bylo nutné navrhnout několik provedení výšivky, tak aby výšivka pružila.

Prvním návrhem bylo vyšití pouze obrysu antény, další návrhy vyplnily tvar antény a to meandrovitým nebo křížícím stylem, struktury výšivek jsou znázorněny na Obr. 49. Všechny tyto návrhy výšivek vytvořily pružnou strukturu textilní antény.

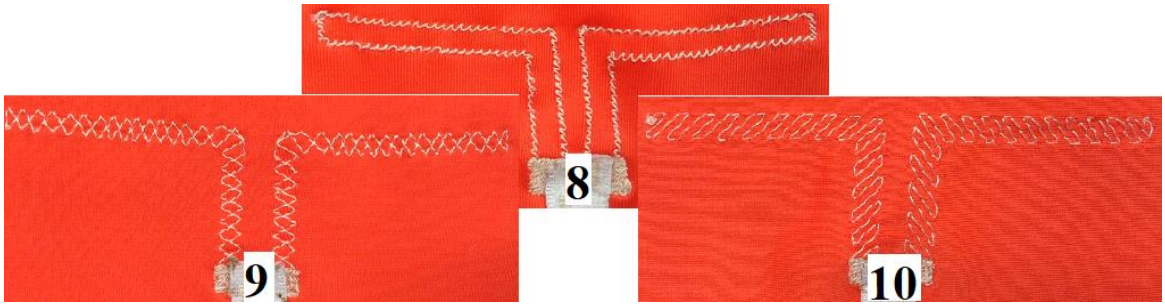
Vyšíváním bylo dohromady vytvořeno 20 textilních antén. Jednalo se o 10 odlišných vzorů antén (Obr. 49 - Obr. 51) provedených ve 2 vyhotoveních, antény se lišily tvarem (SRR, motýlek, obyčejný dipól) a způsobem provedení výšivky (obrys, meandr, křížení).



Obr. 49 Vyšité antény - přerušený obdélníkový prstencový rezonátor (1 a 3 – obrys, 2 – meandr, 4 a 5 - křížení)



Obr. 50 Vyšité antény – motýlek (6 – meandr, 7 - křížení)



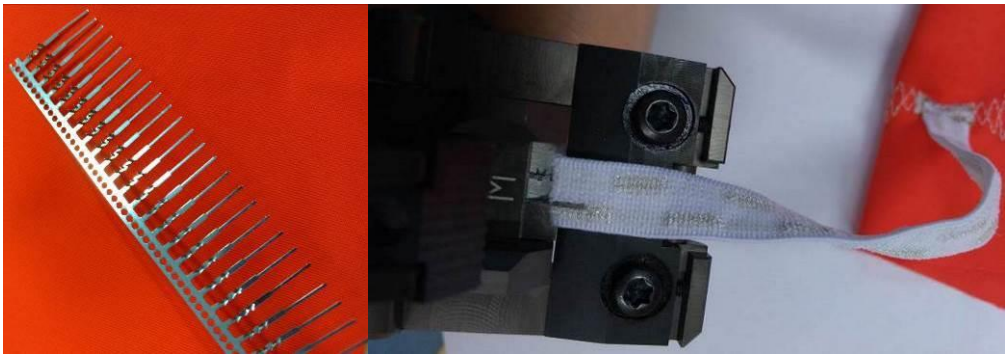
Obr. 51 Vyšité antény – obyčejný dipól (8 – obrys, 9 – křížení, 10 - meandr)

Dalším krokem bylo nakontaktování antén SMA konektorem z důvodu jejich připojení k měřicímu přístroji. K tomu bylo zapotřebí vytvořit pružné a ohebné propojení, ke

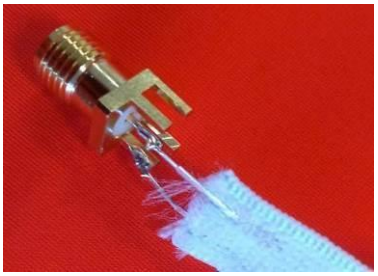
kterému by šel SMA konektor nakontaktovat. K tomuto účelu byly zvoleny pružné vodivé stuhy. Nejprve byla vybrána vodivá stuha se 4 vodivými cestami, která byla k anténě přišita pomocí vodivých nití. Přišití vodivé stuhy se ale neosvědčilo, docházelo k třepení a vodivé nitě měly tendenci se oddělovat od stuhy. Takto vytvořený kontakt byl nespolehlivý, proto bylo dále zvoleno odporové svařování vodivé stuhy se 2 vodivými cestami a antény. Při použití odporového svařování ke spojení vyšité antény a vodivé stuhy již nedocházelo k žádnému třepení a kontakt byl spolehlivý i v případě opakovaného natahování antény. Vzorky s přišitou vodivou stuhou (vzorky č. 5) nebyly vyřazeny, byly na nich prováděny totožné práce jako na zbylých vzorcích se spojem vytvořeným odporovým svařováním. Změna technologie byla zvolena z důvodu obav, že by při delším používání mohlo dojít k většímu mechanickému poškození spojů.

Obr. 52 Detail na připojení vodivé stuhy k textilní anténě – vlevo přišité, vpravo odporové svařování

Na druhý konec vodivé stuhy se dále upevnily dva textilní zařezávací krimpy, na které byl následně připájen zlacený SMA konektor (RF2-143-T-17-50-G ADAM TECH).



Obr. 53 Crimpflex™ konektory a upevnění krimpů k vodivé stuze



Obr. 54 SMA konektor připájený na krimpy

4.2.2 Pletené antény

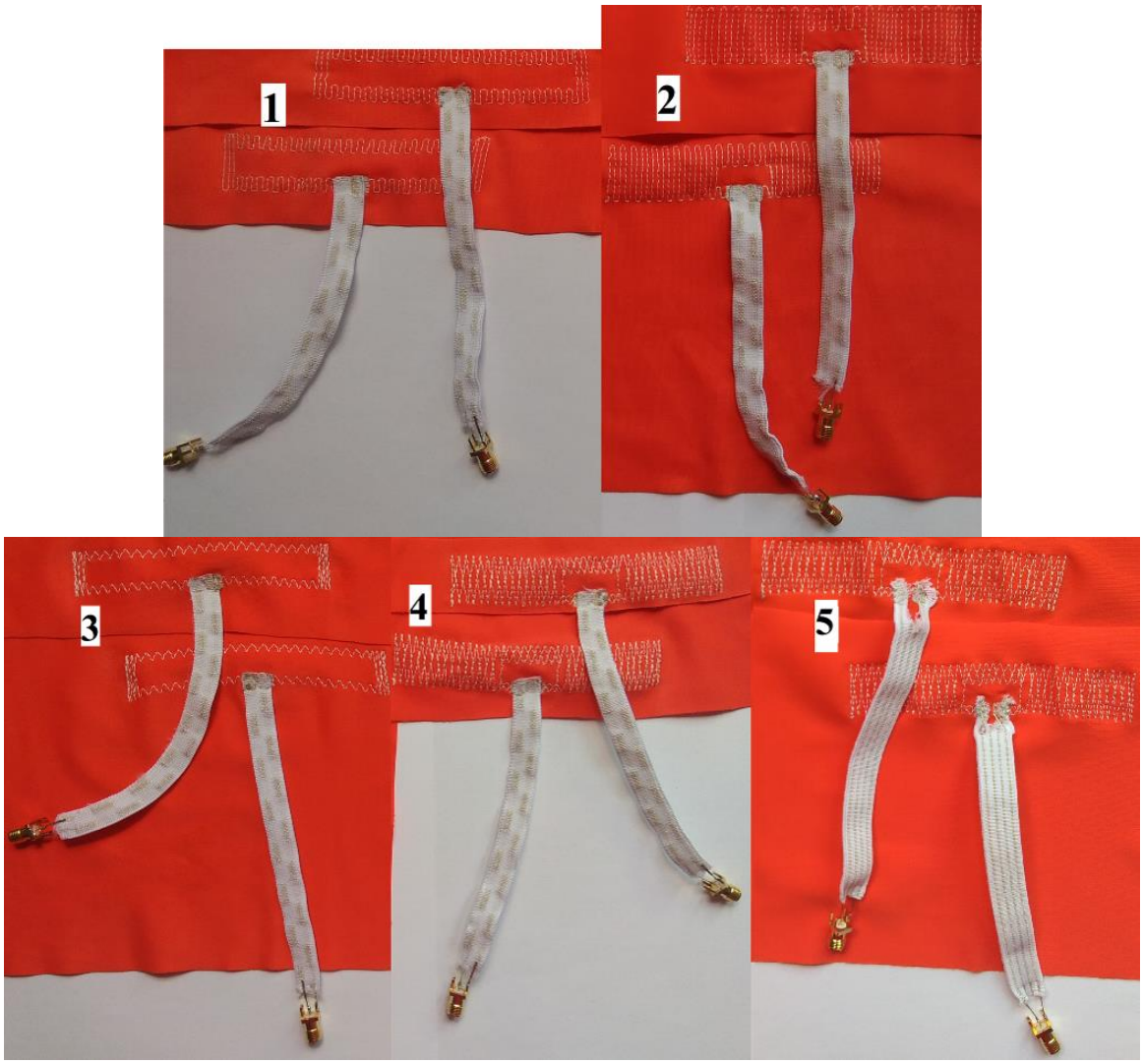
Jak bylo zmíněno výše, nebyla vyrobena celá série pletených antén, byly vytvořeny pouze 2 obdélníkové vzorky textilních antén (Obr. 55). Jedna anténa byla vpletena technologii intarzie do funkční bílé polyesterové (PES) textilie a druhá do černé funkční polyamidové (PAD) textilie bez elastanu. U obou vzorků byla použita vodivá nit č. 95 (hybridní nit obsahující drátky z konstantanu). U pletených vzorků nedocházelo k jejich kontaktování jako u vyšitých vzorků z důvodu odlišného způsobu měření (popsáno v kapitole 5).

Obr. 55 Pletené vzorky textilních antén

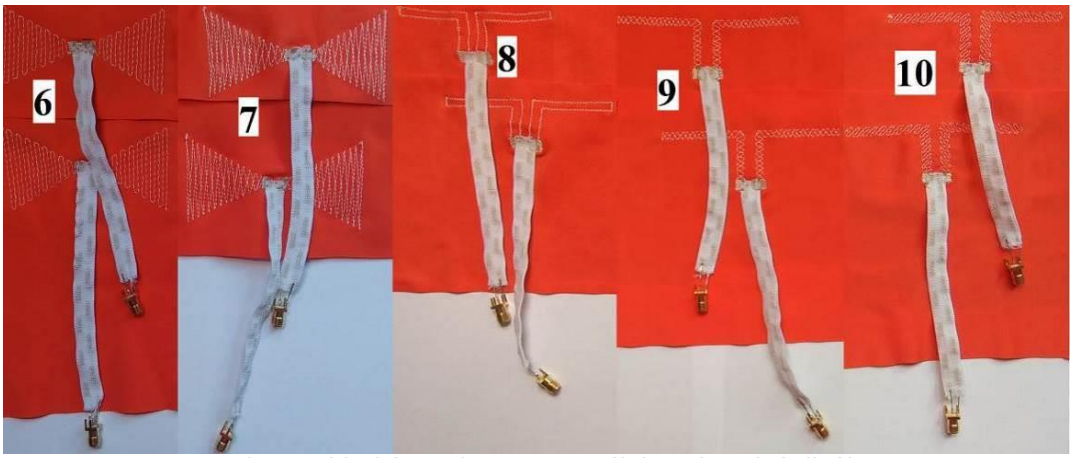
5 Měření navržených antén

Měření navržených antén se provádělo odlišnými způsoby a byly zkoumány změny rezonanční frekvence vlivem natažení. Změny rezonanční frekvence vlivem natažení vyšitých antén byly zkoumány nejprve na základě snímání RLC parametrů pomocí RLC můstku a poté na základě snímání rozptylového parametru s_{11} pomocí vektorového analyzátoru. U pletených vzorků se k anténě přikládal planární rezonátor tvořený planární cívkou a SMD kondenzátorem a pomocí spektrálního analyzátoru s tracking generátorem byly zkoumány změny rezonanční frekvence vlivem natažení.

Níže na Obr. 56 a Obr. 57 jsou zobrazeny všechny vzorky vyšitých antén připravených k měření, dohromady se jedná o 20 vzorků.



Obr. 56 Vyšité vzorky antény – tvar SRR



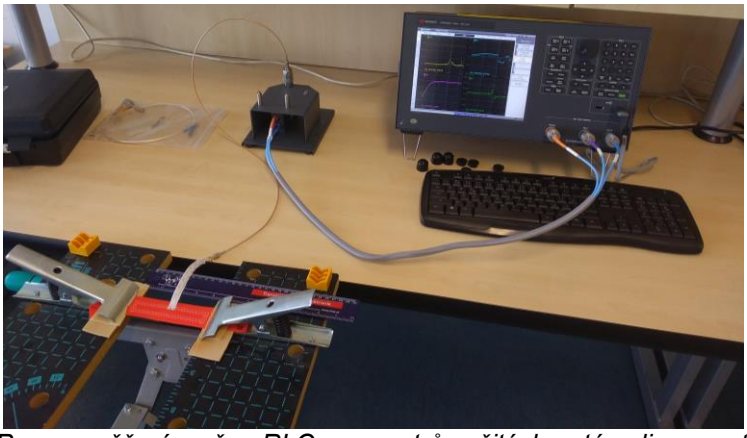
Obr. 57 Vyšité vzorky - tvar motýlek a obyčejný dipól

Natahování vyšívaných vzorků bylo u obou měření (RLC parametry a s_{11}) prováděno totožně. Vzorek byl upevněn do natahovacího přípravku a postupně byl natahován s krokem 1 cm do možného maxima. Maximum se lišilo podle vzorků, u vzorků č. 1-5 (tvar SRR) bylo možné vzorky natáhnout až o 4 cm od původního stavu, u vzorků č. 6-10 až o 5 cm.

Obr. 58 Upevnění antény do svorek natahovacího přípravku

5.1 Měření natažení vyšitých antén na základě RLC parametrů

Měření RLC parametrů antén, tedy impedance Z, paralelní kapacity Cp a sériové indukčnosti Ls, bylo prováděno LCR metrem Keysight (E4982A, 1 MHz – 3 GHz).



Obr. 59 Proces měření změny RLC parametrů vyšitých antén vlivem natahování

Nejprve se měřilo na frekvenčním rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz. Poté byly podle výsledků zvoleny užší frekvenční rozsahy, konkrétně 50 MHz – 400 MHz, 100 MHz – 600 MHz a 600 MHz – 1,2 GHz. Výběr zvolených frekvenčních rozsahů pro jednotlivé antény je vyznačen v Tab. 2.

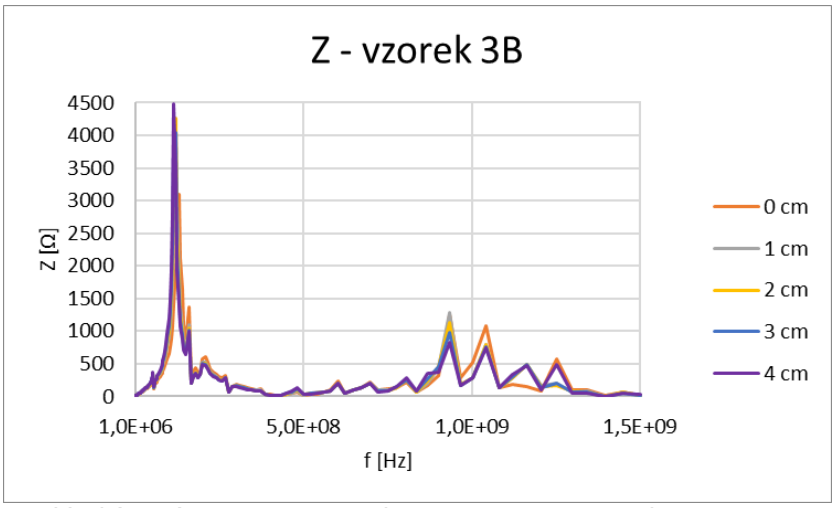
Tab. 2 Zvolené frekvenční rozsahy pro jednotlivé antény

Vzorek	1 MHz – 1,5 GHz	50 MHz – 400 MHz	100 MHz – 600 MHz	600 MHz – 1,2 GHz
1	x	x		
2	x		x	
3	x	x		
4	x	x		
5	x	x		
6	x		x	x
7	x		x	x
8	x		x	x
9	x		x	x
10	x		x	x

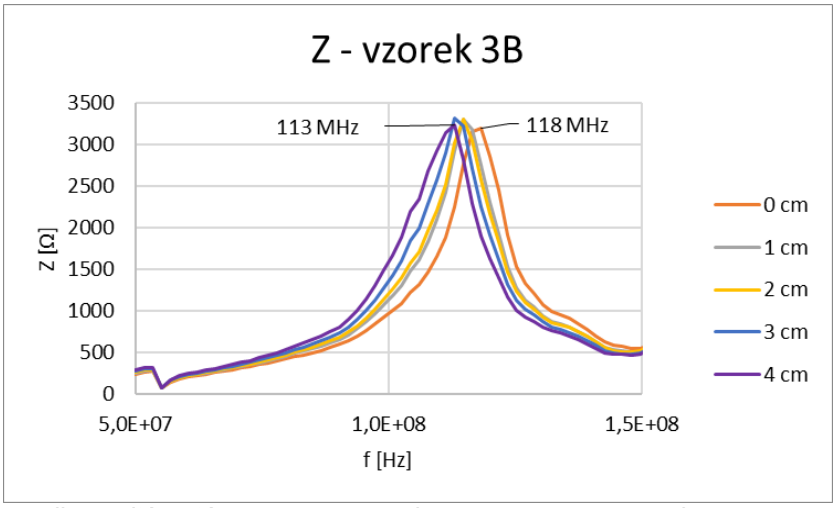
Při měření RLC parametrů docházelo k jejich změně a tedy změně rezonanční frekvence vlivem natahování. Ukázalo se, že ne všechny vzorky vyšitých antén mají zřejmou závislost na natahování. Kompletní přehled všech závislostí je v příloze - Charakteristiky vyšitých antén.

Vzorky antén s tvarem SRR (antény č. 1-5) mají výraznou sériovou indukčnost Ls, vyšité antény tvaru motýlek (antény č. 6-7) a obyčejného dipólu (antény č. 9-10) mají výraznou paralelní kapacitu Cp. Ls a Cp odpovídají zvolenému tvaru antén, tvar SRR představuje cívku, motýlek a dipól nejsou propojené a lze si je představit jako kondenzátor.

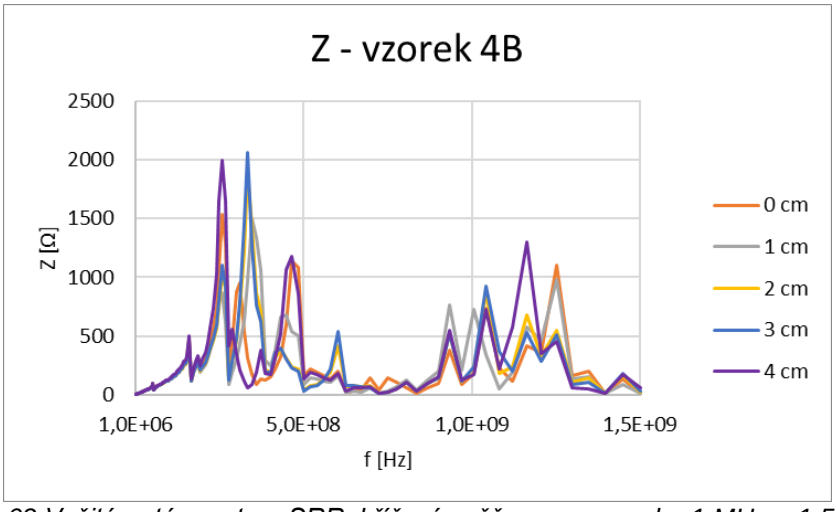
Vyšité antény s tvarem SRR (antény č. 1-5) vykazují závislosti rezonanční frekvence na natažení, jen pokud se jedná o obrys výšivky či meandr (antény č. 1-3) (Obr. 60 až Obr. 61). V případě křížící se výšivky (antény č. 4-5) nelze jasně konstatovat závislost na natažení, důvodem jsou dílčí rezonance, ty jsou pravděpodobně způsobeny sérioparalelními kombinacemi nití v místě křížení (Obr. 62). Závislost rezonanční frekvence na natažení při měření RLC parametrů antén s tvarem SRR (antény č. 1-3) je, že s rostoucím natažením klesá hodnota rezonanční frekvence.



Obr. 60 Vyšitá anténa – tvar SRR, obrys, měřeno na rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz



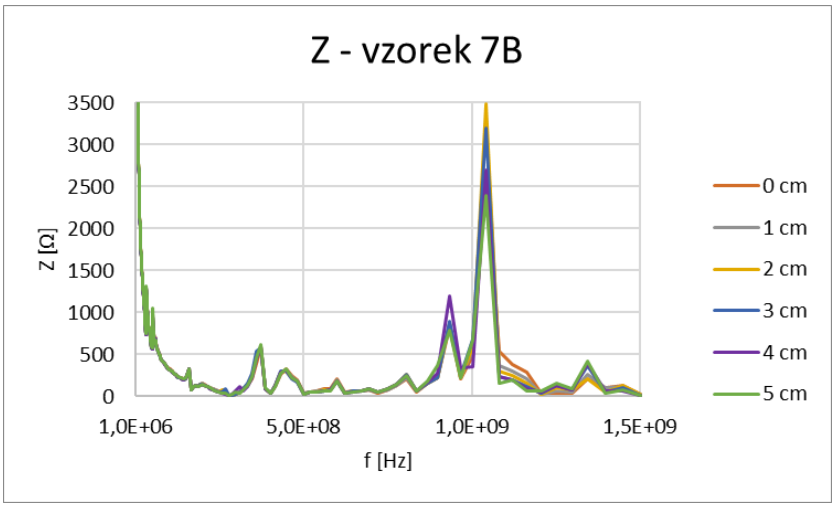
Obr. 61 Detail - vyšitá anténa – tvar SRR, obrys, měřeno na rozsahu 50 MHz – 400 MHz



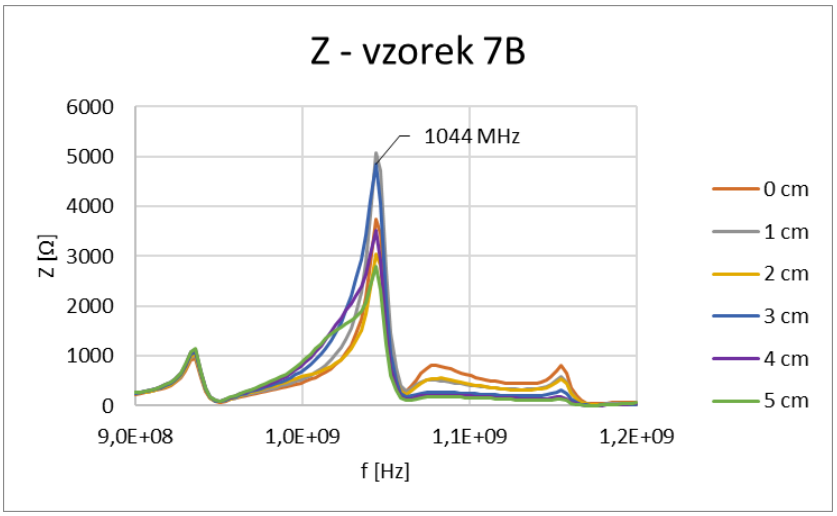
Obr. 62 Vyšitá anténa – tvar SRR, křížení, měřeno na rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz

Vyšité antény tvaru motýlek (antény č. 6-7) a obyčejného dipólu (antény č. 9-10) nemají jednoznačné závislosti rezonanční frekvence na natahování při měření RLC parametrů (Obr. 63 až Obr. 66) v porovnání s tvarem SRR. U všech těchto antén (č. 6-10)

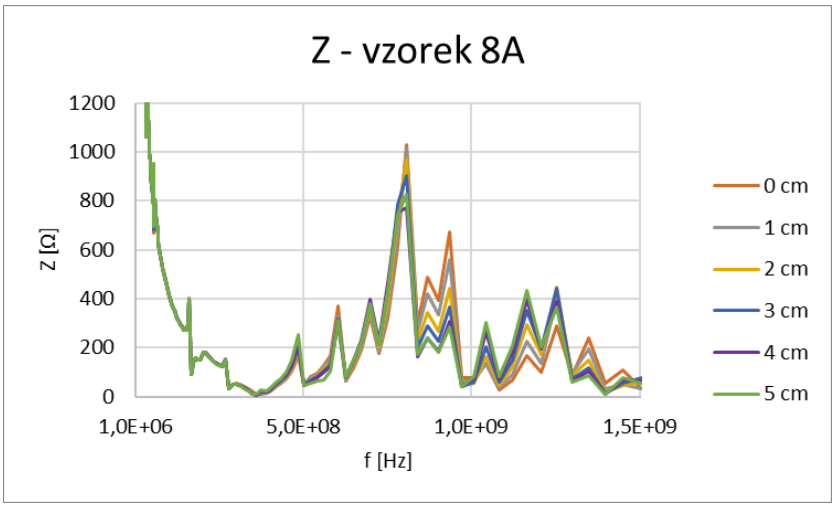
dochází k dílčím rezonancím, u křížících se výšivek dochází k dílčím rezonancím nejvíce. Rezonanční frekvence se vlivem natahování u motýlkové antény a obyčejného dipólu spíše neposouvá, ale mění se hodnota Z při této rezonanční frekvenci.



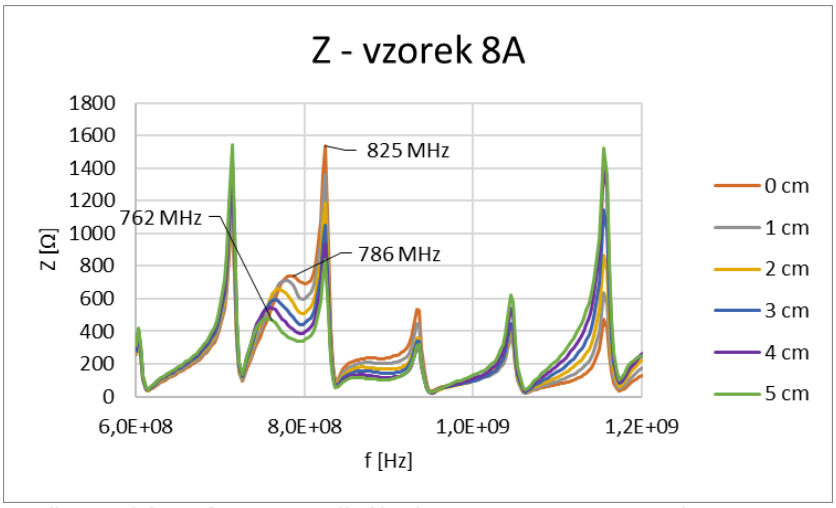
Obr. 63 Vyšitá anténa – tvar motýlek, křížení, měřeno na rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz



Obr. 64 Detail – vyšitá anténa – tvar motýlek, křížení, měřeno na rozsahu 600 MHz – 1,2 GHz



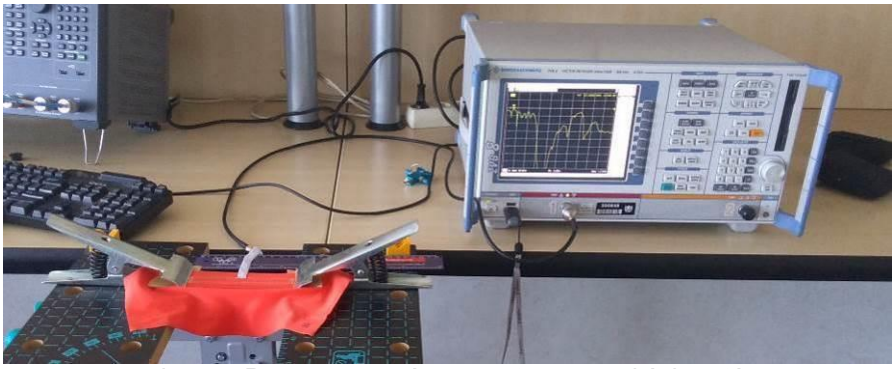
Obr. 65 Vyšitá anténa – tvar dipól, obrys, měřeno na rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz



Obr. 66 Detail – vyšitá anténa – tvar dipól, obrys, měřeno na rozsahu 600 MHz – 1,2 GHz

5.2 Měření natažení vyšitých antén na základě parametru s_{11}

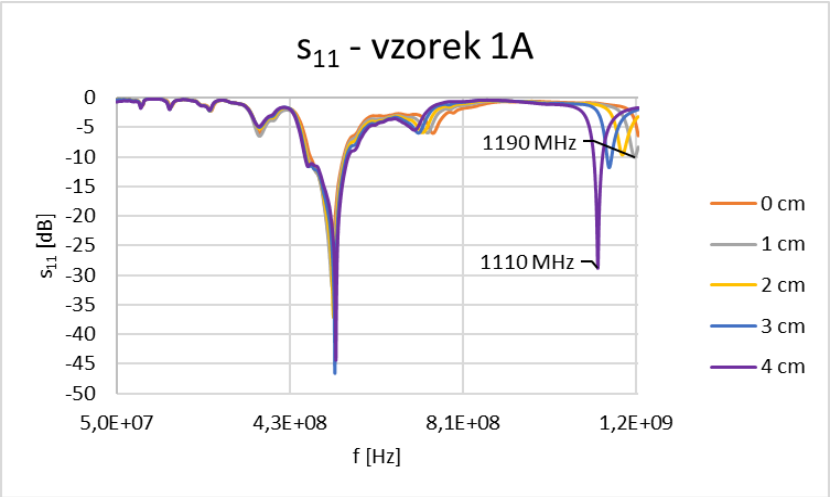
Měření vstupního činitele odrazu antény (s_{11}) bylo prováděno vektorovým síťovým analyzátorem Rohde and Schwarz ZVB8 (300 kHz – 8 GHz) ve frekvenčním rozsahu 50 MHz – 1,2 GHz pro všechny vyšité antény.



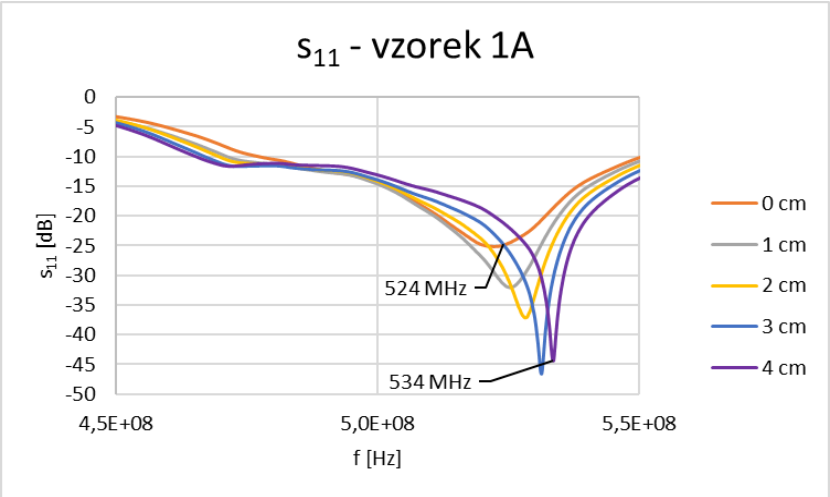
Obr. 67 Proces měření parametru s_{11} vyšitých antén

Při měření vstupního činitele odrazu (s_{11}) docházelo k jeho změně a změně rezonanční frekvence vlivem natahování. Opět se ukázalo, že ne všechny vzorky vyšitých antén mají viditelnou závislost na natahování. Kompletní přehled všech závislostí je v příloze - Charakteristiky vyšitých antén.

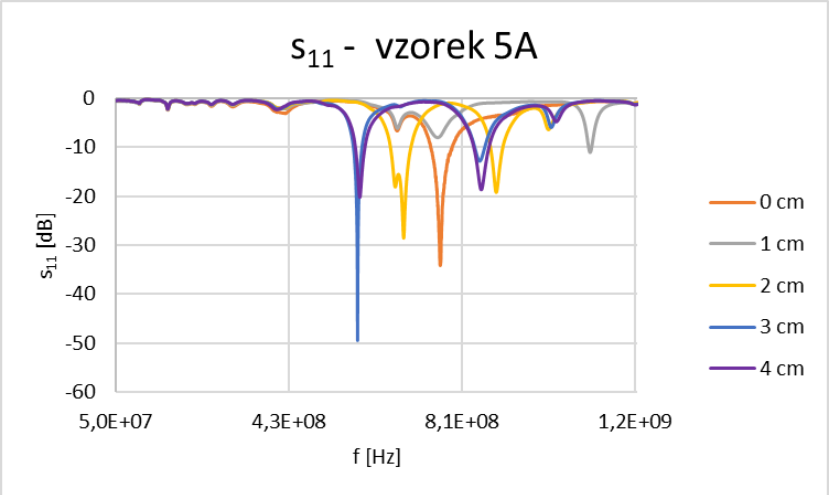
Vyšité antény s tvarem SRR (antény č. 1-5) vykazují závislosti rezonanční frekvence na natažení, jen pokud se jedná o obrys výšivky či meandr (Obr. 68 a Obr. 69). V případě křížící se výšivky nelze konstatovat jasná závislost frekvenční rezonance na natažení, vyskytují se dílčí rezonance, které jsou pravděpodobně způsobeny sérioparalelními kombinacemi mezi nitěmi (Obr. 70).



Obr. 68 Vyšitá anténa – tvar SRR, obrys



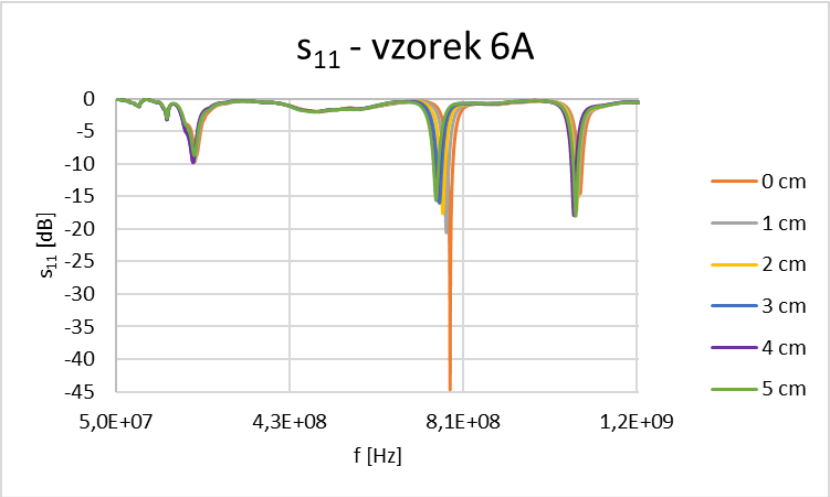
Obr. 69 Detail – vyšitá anténa – tvar SRR, obrys



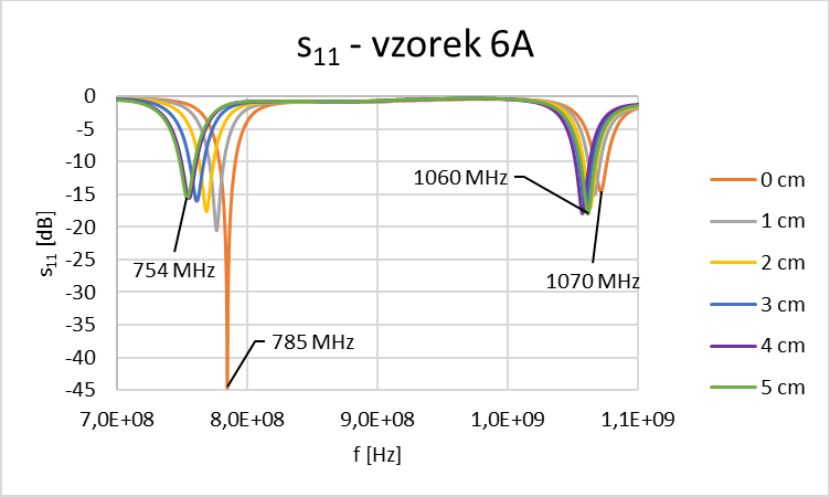
Obr. 70 Vyšitá anténa – tvar SRR, křížení

Vyšité antény tvaru motýlek (antény 6-7) a obyčejného dipólu (antény 9-10) mají evidentní závislosti rezonanční frekvence na natahování (Obr. 71 až Obr. 75) v porovnání s tvarem SRR. Nedochází tolik k dílčím rezonancím u křížících se výšivek. Závislost

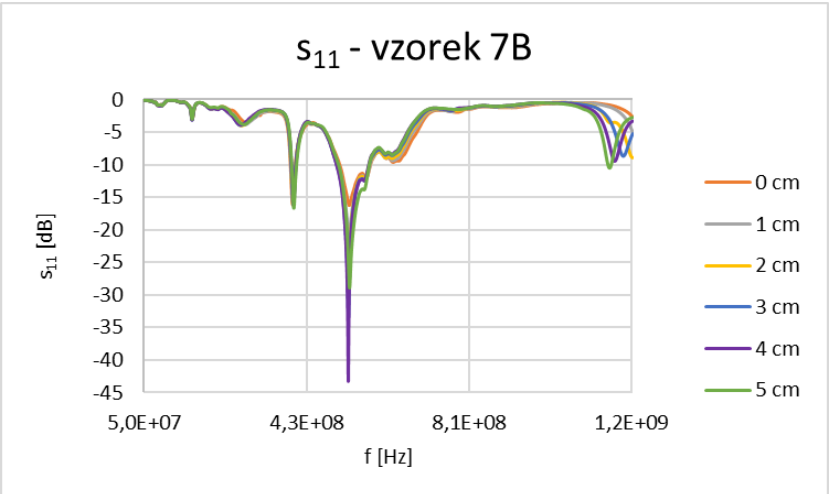
rezonanční frekvence na natažení při měření s_{11} je, že s rostoucím natažením klesá hodnota rezonanční frekvence.



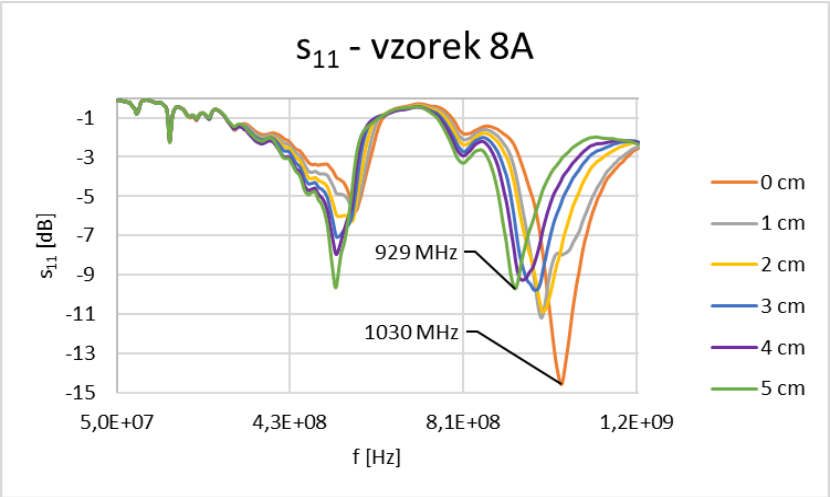
Obr. 71 Vyšitá anténa – tvar motýlek, meandr



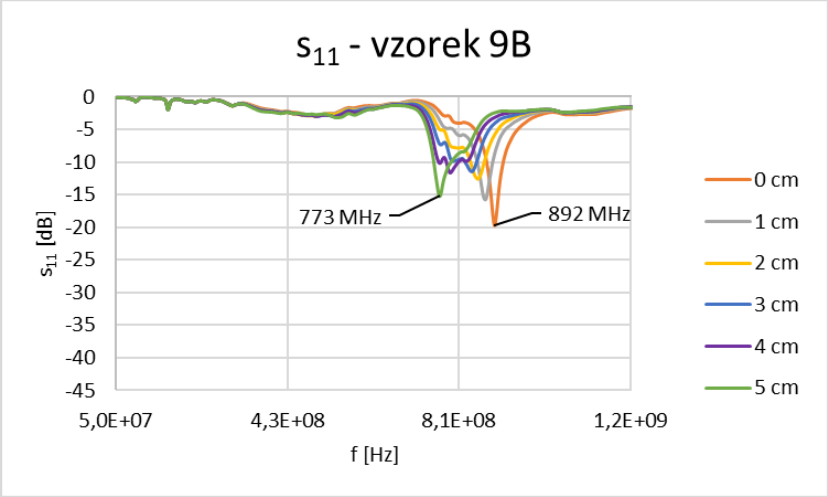
Obr. 72 Detail – vyšitá anténa – tvar motýlek, meandr



Obr. 73 Vyšitá anténa – tvar motýlek, křížení



Obr. 74 Vyšitá anténa – tvar dipól, obrys



Obr. 75 Vyšitá anténa – tvar dipól, křížení

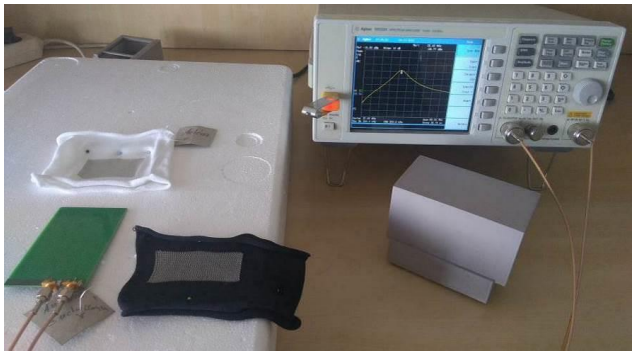
Při porovnání rezonančních frekvencí získaných při měření RLC parametrů a parametru s_{11} je vidět, že nejsou shodné u totožných vzorků. Při měření parametrů s_{11} docházelo k dílčím rezonancím, které mohou být způsobené kontaktování, pružnou stuhou a SMA konektorem, ale i samotnou vyšitou anténou.

Výsledek měření vyšitých antén je, že ne všechny topologie antén mají potenciál pro snímání natažení. Ale lze konstatovat, že s rostoucím natažením klesá rezonanční frekvence při volbě vhodné topologie antény, způsobu výšivky a typu měření. Při porovnání stejných vzorků, tedy dvojice, nedocházelo k odchylkám, charakteristiky závislostí vycházely totožně.

5.3 Měření pletených antén

U pletených antén byly měřeny změny rezonance vlivem natahování pomocí spektrálního analyzátoru s tracking generátorem Agilent N9320A (9 kHz – 3 GHz) a planárního rezonátoru tvořeného planární cívkou na rigidním substrátu a SMD kondenzátorem (Obr. 76) ve frekvenčním rozsahu 5 MHz – 60 MHz. Samotný planární rezonátor bez přiložené textilní antény rezonuje při 28 MHz.

Obr. 76 Planární rezonátor tvořený planární cívkou a SMD kondenzátorem

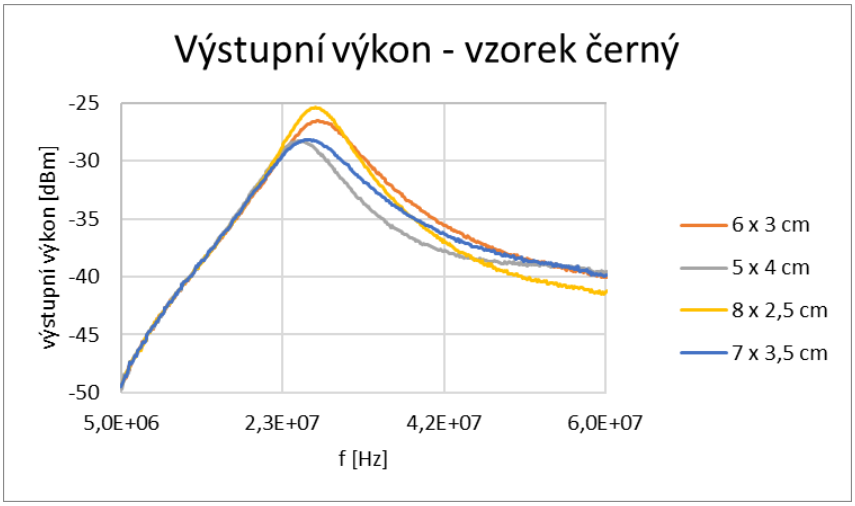


Obr. 77 Připravené měření pletených antén

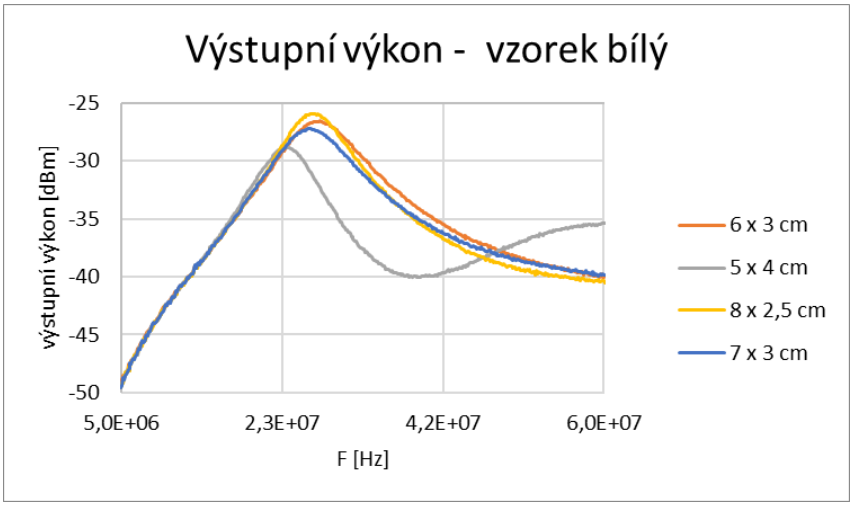
Vzorky pletených antén byly natahovány do dvou směrů na polystyrenové desce pomocí špendlíků. Nenatažený tvar antény byl 6 x 3 cm (délka x šířka), po natažení antény jak do šířky, tak i do délky vznikly další tři rozměry antény: 5 x 4 cm, 8 x 2,5 cm a 7 x 3 (3,5) cm. Po upevnění vzorků byl přiložen planární rezonátor připojený ke spektrálnímu analyzátoru. Planární rezonátor byl dále zatížen závažím pro vyvinutí totožného přítlaku při všech měřeních.

Obr. 78 Přiložení rezonančního vzorku k pletené anténě

Když se k planárnímu rezonátoru přiloží kovový prvek, dojde ke změně elektromagnetického pole planární cívky, a tedy změně rezonanční frekvence v závislosti na rozměrech kovového prvku. Natahováním pletené antény jako kovového prvku dochází ke změnám výsledné rezonanční frekvence, to je patrné ze závislostí na Obr. 79 a Obr. 80.

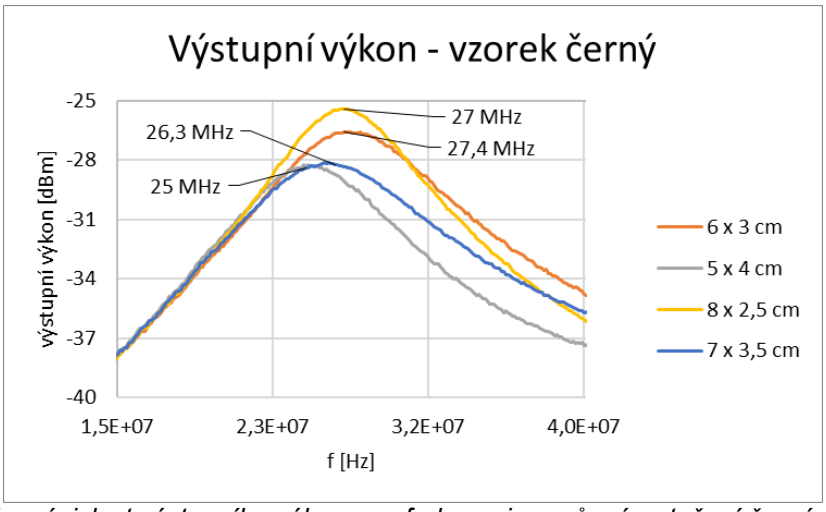


Obr. 79 Závislost výstupního výkonu na frekvenci pro různá natažení černé pletené antény

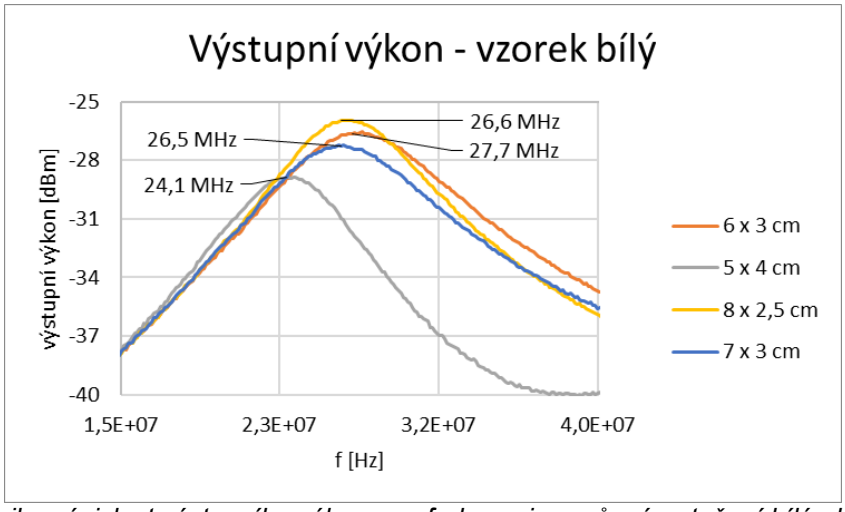


Obr. 80 Závislost výstupního výkonu na frekvenci pro různá natažení bílé pletené antény

Při detailnějším pohledu na závislosti (Obr. 81 a Obr. 82) je zde zřejmý posun rezonančních frekvencí v závislosti na natažení a směru natažení (do délky, do šířky). Z charakteristik je patrná závislost na šířce antény, nejširší anténa má nejnižší rezonanční frekvenci, avšak natahování pletené antény do šířky je doprovázeno změnou její délky a naopak, proto může docházet k odchylkám.



Obr. 81 Detail – závislost výstupního výkonu na frekvenci pro různá natažení černé pletené antény



Obr. 82 Detail – závislost výstupního výkonu na frekvenci pro různá natažení bílá pletené antény

Závěr

Textilní antény v chytrých textiliích mají své uplatnění v mnoha odvětvích. Chytré textilie s textilními anténami si udržují svoji flexibilitu, pružnost, pohodlnost a omyvatelnost, některé dokáží snímat různé změny a fungují jako textilní anténní senzory. Využijeme je ke komunikaci, lokalizaci, ale i ve zdravotnictví, při domácí péči, při sportu, k záchraně života, ale také v dopravě a v průmyslu. Slouží k ulehčení a zpříjemnění života při každodenních činnostech. Ve zdravotnictví se využívají textilní antény pro rychlé přivolání pomoci, ke snímání vlhkosti, tlaku či natažení. Je možné tedy monitorovat vlhkost, otoky končetin, či jejich flexibilita.

Neopomenutelnou částí práce je vlastní návrh vzorků textilních antén pro snímání natažení a deformace. Bylo vyrobeno 20 vyšívaných vzorků, zkoumány byly změny rezonančních frekvencí vlivem natahování pomocí RLC můstku a měření impedance a dále změny rezonančních frekvencí pomocí vektorového analyzátoru a měření rozptylového parametru s_{11}. Natahování vyšívaných antén do jejich možného maxima bylo prováděno v jednom směru s krokem 1 cm na natahovacím přípravku. Z naměřených výsledků některých vyšitých antén můžeme usoudit, že s rostoucím natažením klesá hodnota rezonanční frekvence, jak u měření RLC parametrů, tak i u měření parametru s_{11}.

Pletených vzorků byly vyrobeny 2 kusy a opět byly zkoumány změny rezonanční frekvence vlivem jejich natahování, tedy na základě změny rozměrů. Vyhodnocení bylo provedeno na základě změny rezonanční frekvence přikládaného planárního rezonátoru vlivem změny rozměrů antény. Měření bylo provedeno spektrálním analyzátorem s tracking generátorem. Pletené antény byly natahovány do dvou směrů. U pletených antén klesá rezonanční frekvence s rostoucí šířkou antény.

Z výsledků je patrné, že některé textilní antény mají velký potenciál pro snímání míry natažení, jelikož s rostoucím natažením klesá rezonanční frekvence. Je důležité znát způsob výšivky dané antény, protože obrysové výšivky vykazují mnohem lepší závislost na natažení v porovnání s motivem vyšití, kde dochází ke křížení vodivých nití. U křížících se výšivek, tedy výšivek, kdy se jednotlivé vodivé dráhy (nitě) kříží, dochází k dílčím rezonancím kvůli sérioparalelním kombinacím vzniklých při křížení a není možné provést jednoznačné vyhodnocení míry natažení v závislosti na změně rezonanční frekvence.

Tyto jednoduché vzorky textilních antén snímající natažení posloužily k prvním poznatkům. Z naměřených výsledků je patrné, jaké topologie textilních antén jsou vhodné a jaké naopak nevykazují přesvědčivé výsledky. Dále byly testovány různé způsoby měření vedoucích ke zjištění změn rezonanční frekvence, a tedy ke zjištění míry natažení. Experimenty s laboratorními vzorky textilních antén snímající natažení a deformace nejsou v žádném případě u konce. V dalších experimentech by měla být vytvořena větší série vzorků textilních antén, které nyní vykazovaly potenciál a ověřit tak opakovatelné závislosti na natažení. Rovněž by měl být zkoumán vliv a další způsoby kontaktování textilních antén. Lze předpokládat, že pletené antény budou mít větší vliv na změnu rezonančních charakteristik a tyto předpoklady bude nutné ověřit. Je zřejmé, že dosažené výsledky bude nutné ověřit, stejně tak bude zapotřebí ověřit vliv dalších parametrů než dojde k implementaci navržených textilních antén do funkčního systému vhodného například pro bezdrátové snímaní otoků končetin pro ulehčení zdravotnické péče.

Tato diplomová práce byla vypracována podle jednotlivých bodů zadání. Byl získán přehled o anténách vhodných pro realizaci na textiliích. Dále byly vytvořeny návrhy textilních antén pro detekci natažení a deformace. Realizované vzorky byly proměřené v závislosti na natažení a výsledky z měření byly vyhodnoceny. Všechny body zadání diplomové práce tak byly splněny.

Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] XU, Lulu, Xiao CHEN, Sirui TAN, Zhirun HU, Baoan YING, Terry Tao YE a Yi LI. Characterization and Modeling of Embroidered NFC Coil Antennas for Wearable Applications. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2020, **20**(23), 14501–14513. ISSN 15581748. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2020.3008594

[2] MERILAMPI, Sari, Han HE, Lauri SYDANHEIMO, Leena UKKONEN a Johanna VIRKKI. The possibilities of passive UHF RFID textile tags as comfortable wearable sweat rate sensors. *2016 Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2016 - Proceedings* [online]. 2016, 3984–3987. Dostupné z: doi:10.1109/PIERS.2016.7735504

[3] NIE, Baoqing, Rong HUANG, Ting YAO, Yiqiu ZHANG, Yihui MIAO, Changrong LIU, Jian LIU a Xinjian CHEN. Textile-Based Wireless Pressure Sensor Array for Human-Interactive Sensing. *Advanced Functional Materials* [online]. 2019, **29**(22), 1–10. ISSN 16163028. Dostupné z: doi:10.1002/adfm.201808786

[4] EMBRO. *Textile Sensors and Antennas* [online]. [vid. 2021-02-19]. Dostupné z: https://www.embro-tech.eu/textile-sensors-and-UHF-RFID-tags.html

[5] PATRON, Damiano, William MONGAN, Timothy P. KURZWEG, Adam FONTECCHIO, Genevieve DION, Endla K. ANDAY a Kapil R. DANDEKAR. On the Use of Knitted Antennas and Inductively Coupled RFID Tags for Wearable Applications. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems* [online]. 2016, **10**(6), 1047–1057. ISSN 19324545. Dostupné z: doi:10.1109/TBCAS.2016.2518871

[6] SMUTNÝ, Martin. *Anténa pro impulzní širokopásmový signál*. B.m., 2015. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.

[7] *Antény – princip, zákl. vlastnosti antén* [online]. [vid. 2020-11-16]. Dostupné z: https://www.mylms.cz/69-anteny-princip-zakl-vlastnosti-anten/

[8] MATTILA, H., ed. *Intelligent textiles and clothing*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006. ISBN 9781855735460.

[9] MIČÚCH, Jaroslav. *Antény realizované pomocí technologie šití nebo pletení*. B.m., 2018. FEL ZČU.

[10] TAO, Xiaoming. *Handbook of smart textiles* [online]. Singapore: Springer, 2015. ISBN 9789814451451. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-4451-45-1

[11] VALLOZZI, L, C HERTLEER a H ROGIER. 26 - Latest developments in the field of textile antennas. In: Vladan B T - Smart Textiles and their Applications KONCAR, ed. *Woodhead Publishing Series in Textiles* [online]. Oxford: Woodhead Publishing, 2016, s. 599–626. ISBN 978-0-08-100574-3. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100574-3.00026-6

[12] *Základní druhy antén* [online]. [vid. 2020-11-16]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/sireni_vln/teze/otazka_18.pdf

[13] TARÁBEK, Pavol a Petra ČERVINKOVÁ. *Odmaturuj z fyziky*. Brno: Didaktis, 2006. ISBN 80-7358-058-6.

[14] ELECTRONIC NOTES. *Antenna Ground Plane: theory & design* [online]. Dostupné z: https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/grounding-earthing/antenna-ground-plane-theory-design.php

[15] SAMAL, Purna B., Ping Jack SOH a Guy A.E. VANDENBOSCH. UWB all-textile antenna with full ground plane for off-body WBAN communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* [online]. 2014, **62**(1), 102–108. ISSN 0018926X. Dostupné z: doi:10.1109/TAP.2013.2287526

[16] CHUMA, EUCLIDES; PAJUELO, Diego. Design of a Thin and Flexible Textile Antenna for Smart Clothing. *Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*. 2018, (August).

[17] BAIT-SUWAILAM, Mohammed M., Isidoro I. LABIANO a Akram ALOMAINY. Impedance enhancement of textile grounded loop antenna using high-impedance surface (HIS) for healthcare applications. *Sensors (Switzerland)* [online]. 2020, **20**(14), 1–18. ISSN 14248220. Dostupné z: doi:10.3390/s20143809

[18] ABDULLAH, M. A., M. K.A. RAHIM, N. A. SAMSURI, N. A. MURAD a M. E. JALIL. Textile dipole antenna for wearable application. *Jurnal Teknologi* [online]. 2015, **77**(1), 101–107. ISSN 01279696. Dostupné z: doi:10.11113/jt.v77.3049

[19] TETIK, Erkan. Design Of An Electro-Textile Based Wearable Antenna. 2018, (October 2017).

[20] HITACHI. *EBG structure* [online]. [vid. 2021-05-03]. Dostupné z: https://www.hitachi.com/rd/glossary/e/ebg_structure.html

[21] MORO, Riccardo, Sam AGNEESSENS, Hendrik ROGIER a Maurizio BOZZI. Circularly-polarised cavity-backed wearable antenna in SIW technology. *IET Microwaves, Antennas and Propagation* [online]. 2018, **12**(1), 127–131. ISSN 17518733. Dostupné z: doi:10.1049/iet-map.2017.0271

[22] BOZZI, Maurizio. Substrate integrated waveguide (SIW) technology: New research trends for low-cost and eco-friendly wireless systems [online]. 2012. Dostupné z: doi:10.1109/imws2.2012.6338240

[23] MOHAMADZADE, Bahare, Raheel M HASHMI, Roy B V B SIMORANGKIR, Reza GHARAEI, Sabih UR REHMAN a Qammer H ABBASI. Recent Advances in Fabrication Methods for Flexible Antennas in Wearable Devices: State of the Art. *Sensors (Basel, Switzerland)* [online]. 2019, **19**(10). ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s19102312

[24] CHEN, Xiaochen, Aruhan LIU, Zhigang WEI, Leena UKKONEN a Johanna VIRKKI. Experimental study on strain reliability of embroidered passive UHF RFID textile tag antennas and interconnections. *Journal of Engineering (United Kingdom)* [online]. 2017, **2017**. ISSN 23144912. Dostupné z: doi:10.1155/2017/8493405

[25] XU, Lulu, Yulong LIU, Yi LI, Pui Yi LAU, Haitao SI a Terry Tao YE. Design and Fabrication of Embroidered RFID Antennas for Wearable Applications. *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics, SOLI 2018* [online]. 2018, 118–122. Dostupné z: doi:10.1109/SOLI.2018.8476693

[26] KLAUZ, Milan. *Jaký je rozdíl mezi aktivní a pasivním RFID?* [online]. [vid. 2021-02-12]. Dostupné z: https://www.dps-az.cz/vyvoj/id:53208/jaky-je-rozdil-mezi-aktivnim-a-pasivnim-rfid-

[27] VENA, Arnaud, Karoliina KOSKI, Elham MORADI, Abdul Ali BABAR, Lauri SYDANHEIMO, Leena UKKONEN a Manos M. TENTZERIS. An Embroidered Two-Dimensional Chipless Strain Sensor for Wireless Structural Deformation Monitoring. *Ieee Sensors Journal*. 2013, **13**(12), 4627–4637.

[28] HE, Han, Xiaochen CHEN, Leena UKKONEN a Johanna VIRKKI. Clothing-integrated passive RFID strain sensor platform for body movement-based controlling. *2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications, RFID-TA 2019* [online]. 2019, 236–239. Dostupné z: doi:10.1109/RFID-TA.2019.8892118

[29] YI, Xiaohua, Chunhee CHO, James COOPER, Yang WANG, Manos M TENTZERIS a Roberto T LEON. Passive wireless antenna sensor for strain and crack sensing—electromagnetic modeling, simulation, and testing. *Smart Materials and Structures* [online]. 2013, **22**(8), 085009. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/22/8/085009

[30] YU, Mengxia, Silong WANG, Yulong LIU, Lulu XU a Terry Tao YE. Passive embroidered stretch sensor utilizing UHF RFID antennas. *Proceedings - 2019 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence and Computing, Advanced and Trusted Computing, Scalable Computing and Communications, Internet of People and Smart City Innovation, SmartWorld/UIC/ATC/SCALCOM/IOP/SCI 2019* [online]. 2019, (1), 497–501. Dostupné z: doi:10.1109/SmartWorld-UIC-ATC-SCALCOM-IOP-SCI.2019.00126

[31] LIN, Xiaoyou, Boon Chong SEET a Frances JOSEPH. Fabric antenna with body temperature sensing for BAN applications over 5G wireless systems. *Proceedings of the International Conference on Sensing Technology, ICST* [online]. 2016, **2016-March**, 591–595. ISSN 21568073. Dostupné z: doi:10.1109/ICSensT.2015.7438467

[32] LIN, Xiaoyou, Boon-Chong SEET a Frances JOSEPH. Wearable humidity sensing antenna for BAN applications over 5G networks [online]. 2018, 1–4. Dostupné z: doi:10.1109/wamicon.2018.8396055

[33] ELIAS, N. A., N. A. SAMSURI, M. K.A. RAHIM, N. OTHMAN a M. E. JALIL. Effects of human body and antenna orientation on dipole textile antenna performance and SAR. *2012 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics, APACE 2012 - Proceedings* [online]. 2012, (Apace), 132–136. Dostupné z: doi:10.1109/APACE.2012.6457647

[34] SERRA, Andrea A., Paolo NEPA a Giuliano MANARA. A wearable two-antenna system on a life jacket for cospas-sarsat personal locator beacons. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* [online]. 2012, **60**(2 PART 2), 1035–1042. ISSN 0018926X. Dostupné z: doi:10.1109/TAP.2011.2173151

[35] LILJA, Juha, Vesa PYNTTÄRI, Tero KAIJA, Riku MÄKINEN, Eerik HALONEN, Hannu SILLANPÄÄ, Jouko HEIKKINEN, Matti MÄNTYSALO, Pekka SALONEN a Peter DE MAAGT. Body-worn antennas making a splash: Lifejacket-integrated antennas for global search and rescue satellite system. *IEEE Antennas and Propagation Magazine* [online]. 2013, **55**(2), 324–341. ISSN 10459243. Dostupné z: doi:10.1109/MAP.2013.6529385

[36] DIERCK, Arnaut, Sam AGNEESSENS, Frederick DECLERCQ, Bart SPINNEWYN, Gert Jan STOCKMAN, Patrick VAN TORRE, Luigi VALLOZZI, Dries VANDE GINSTE, Thomas VERVUST, Jan VANFLETEREN a Hendrik ROGIER. Active textile antennas in professional garments for sensing, localisation and communication. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies* [online]. 2014, **6**(3–4), 331–341. ISSN 17590795. Dostupné z: doi:10.1017/S175907871400018X

[37] LAIRD. *Conductive Fabric - Flectron* [online]. [vid. 2021-02-18]. Dostupné z: https://www.laird.com/products/enclosure-solutions/emi-tapes/conductive-fabric

[38] AGNEESSENS, Sam, Patrick VAN TORRE, Frederick DECLERCQ, Bart SPINNEWYN, Gert Jan STOCKMAN, Hendrik ROGIER a Dries VANDE GINSTE. Design of a wearable, low-cost, through-wall doppler radar system. *International Journal of Antennas and Propagation* [online]. 2012, **2012**. ISSN 16875869. Dostupné z: doi:10.1155/2012/840924

[39] DEY, Shuvashis a Nemai Chandra KARMAKAR. Chipless RFID strain sensors: A novel feasibility analysis in terms of conventional patch antennas. *IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference 2015, IMaRC 2015* [online]. 2016, 72–75. Dostupné z: doi:10.1109/IMaRC.2015.7411449

[40] YU, Mengxia, Xuanyu SHANG, Miao WANG, Yulong LIU a Terry Tao YE. Deformation sensitivity study of embroidered UHF RFID antennas. *2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications, RFID-TA 2019* [online]. 2019, 322–326. Dostupné z: doi:10.1109/RFID-TA.2019.8891966

[41] MERILAMPI, S., T. BJÖRNINEN, L. SYDÄNHEIMO a L. UKKONEN. Passive UHF RFID strain sensor tag for detecting limb movement. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems* [online]. 2012, **5**(2), 315–328. ISSN 11785608. Dostupné z: doi:10.21307/ijssis-2017-483

[42] LONG, Feiyuan, Xiao Dong ZHANG, Toni BJORNINEN, Johanna VIRKKI, Lauri SYDANHEIMO, Yan Cheong CHAN a Leena UKKONEN. Implementation and wireless readout of passive UHF RFID strain sensor tags based on electro-textile antennas. *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2015*. 2015.

[43] CHEN, Xiaochen, Leena UKKONEN a Toni BJORNINEN. Passive E-Textile UHF RFID-Based Wireless Strain Sensors with Integrated References. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2016, **16**(22), 7835–7836. ISSN 1530437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2016.2608659

[44] LIU, Yuqiao, Ariana LEVITT, Christina KARA, Cem SAHIN, Genevieve DION a Kapil R. DANDEKAR. An improved design of wearable strain sensor based on knitted RFID technology. *2016 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications, CAMA 2016* [online]. 2017. Dostupné z: doi:10.1109/CAMA.2016.7815769

[45] HASANI, M., A. VENA, L. SYDANHEIMO, L. UKKONEN a M. M. TENTZERIS. Implementation of a dual-interrogation-mode embroidered RFID-Enabled strain sensor. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* [online]. 2013, **12**, 1272–1275. ISSN 15361225. Dostupné z: doi:10.1109/LAWP.2013.2283539

[46] ANBALAGAN, Abirami, Esther Florence SUNDARSINGH a Vimal Samsingh RAMALINGAM. Design and experimental evaluation of a novel on-body textile antenna for unicast applications. *Microwave and Optical Technology Letters* [online]. 2020, **62**(2), 789–799. ISSN 10982760. Dostupné z: doi:10.1002/mop.32075

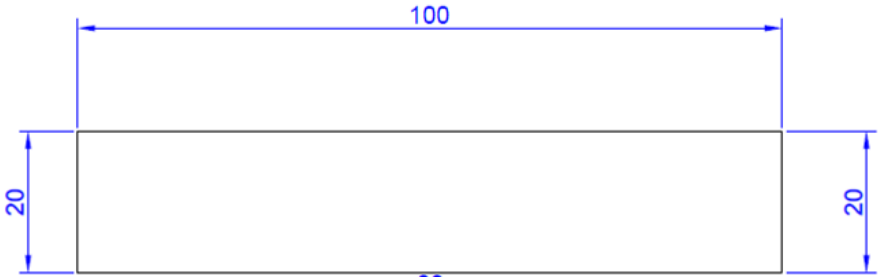
[47] LIU, Yulong, Miao WANG, Mengxia YU, Bingyi XIA a Terry Tao YE. Embroidered Inductive Strain Sensor for Wearable Applications. *2020 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, PerCom Workshops 2020* [online]. 2020. Dostupné z: doi:10.1109/PerComWorkshops48775.2020.9156083

[48] MERILAMPI, Sari, Toni BJÖRNINEN, Leena UKKONEN, Pekka RUUSKANEN a Lauri SYDÄNHEIMO. Embedded wireless strain sensors based on printed RFID tag. *Sensor Review* [online]. 2011, **31**(1), 32–40. ISSN 02602288. Dostupné z: doi:10.1108/02602281111099062

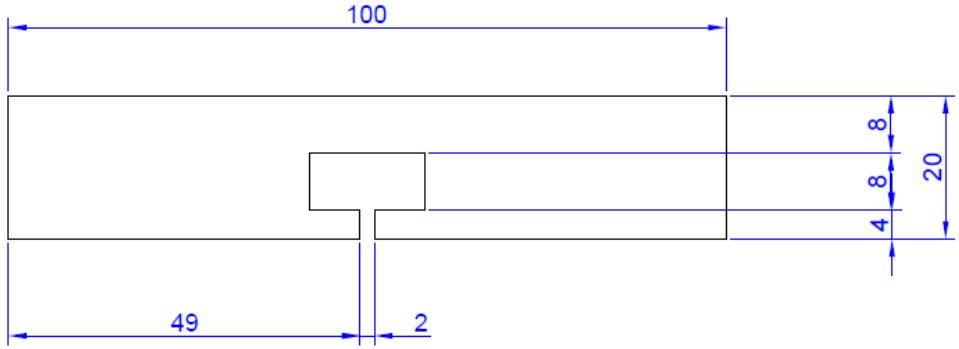
[49] MERILAMPI, Sari, Pekka RUUSKANEN, Toni BJÖRNINEN, Leena UKKONEN a Lauri SYDÄNHEIMO. Printed passive UHF RFID tags as wearable strain sensors. *2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies, ISABEL 2010* [online]. 2010, **2**(1), 13–17. Dostupné z: doi:10.1109/ISABEL.2010.5702779

Přílohy

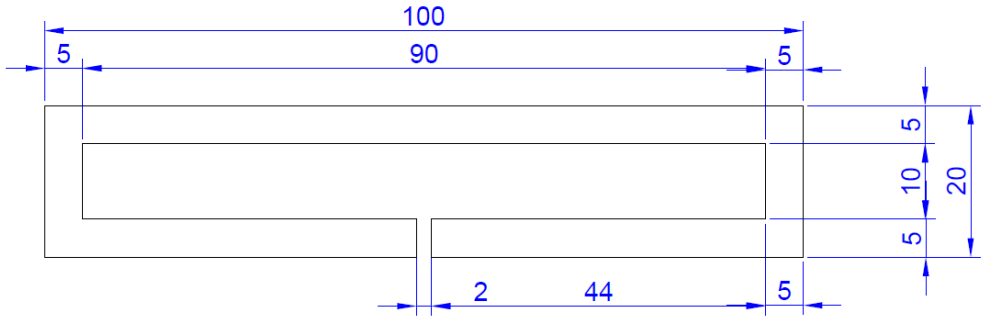
Rozměry návrhů antény



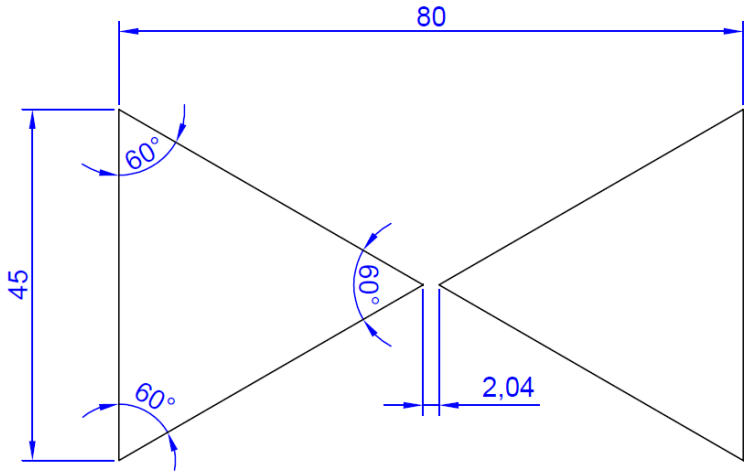
Obr. 83 Návrh tvaru antény – obdélník



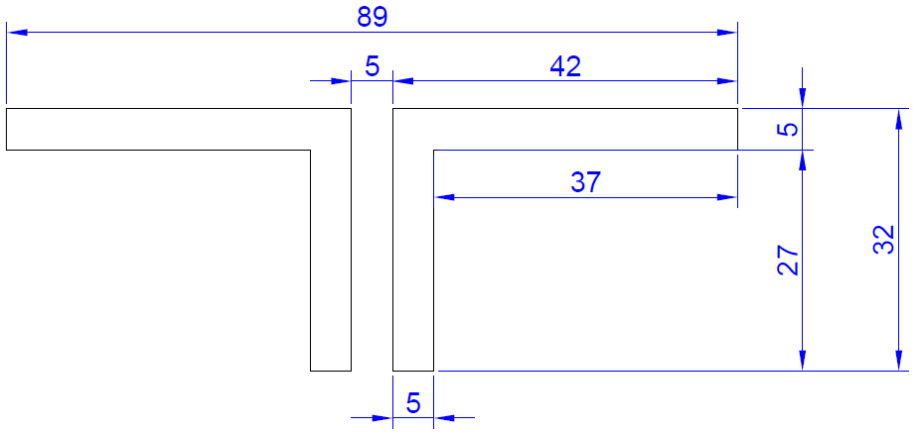
Obr. 84 Návrh tvaru antény - přerušený obdélníkový prstencový rezonátor (SRR) – široký



Obr. 85 Návrh tvaru antény - přerušený obdélníkový prstencový rezonátor (SRR) – úzký

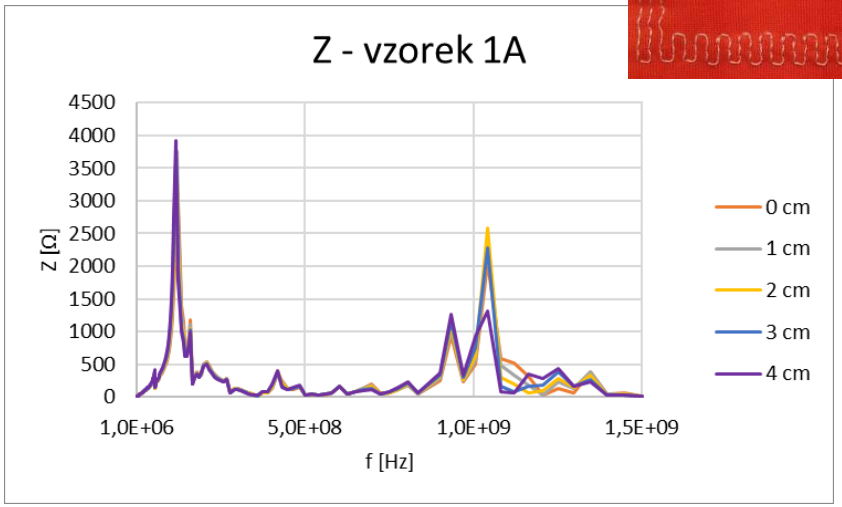


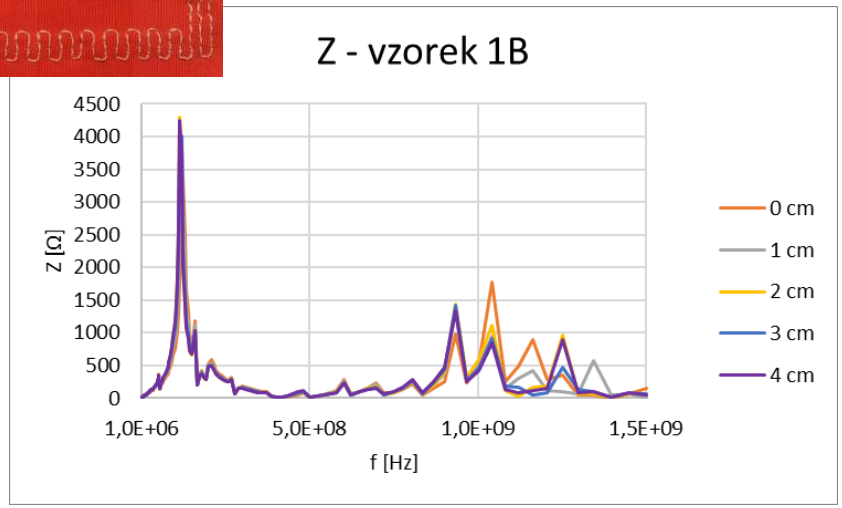
Obr. 86 Návrh tvaru antény – motýlek



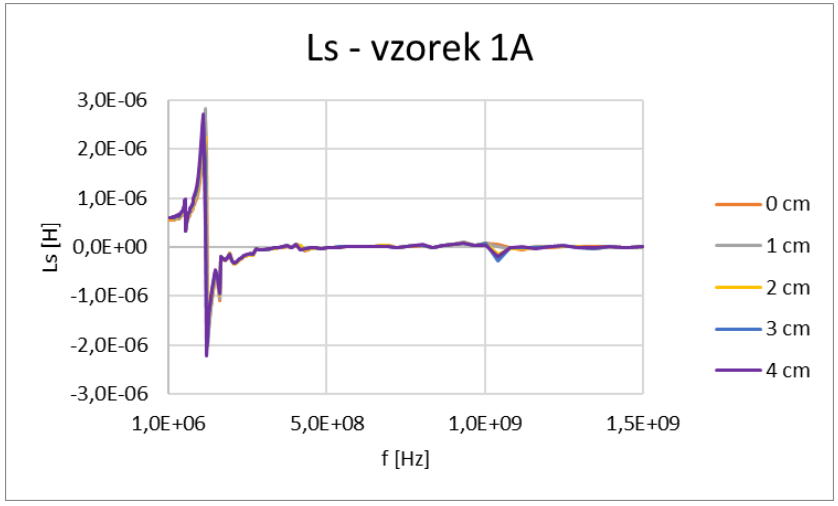
Obr. 87 Návrh tvaru antény – obyčejný dipól

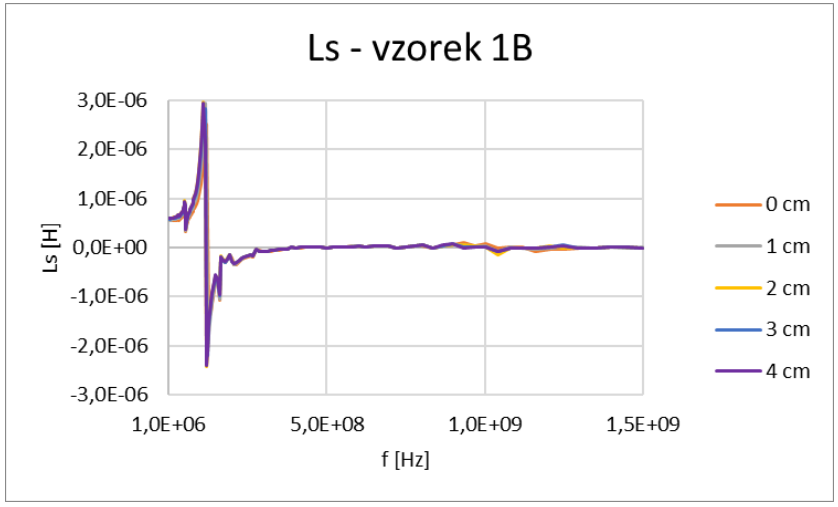
Charakteristiky vyšitých antén



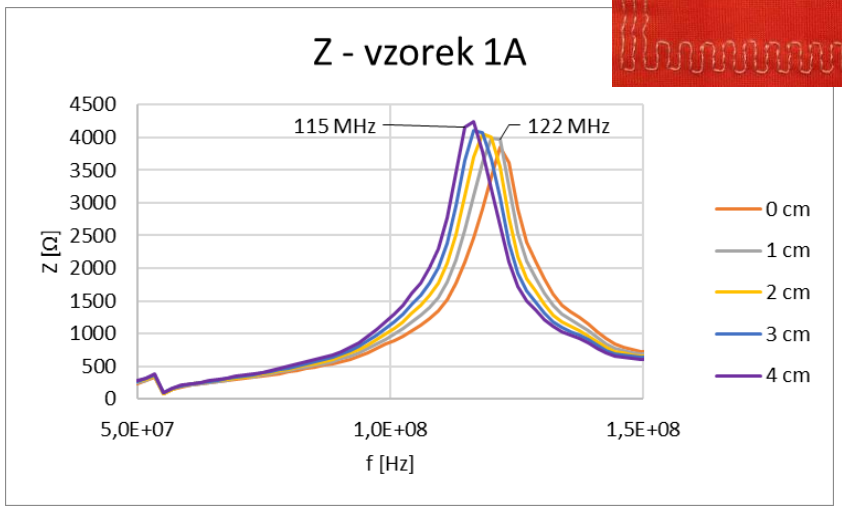


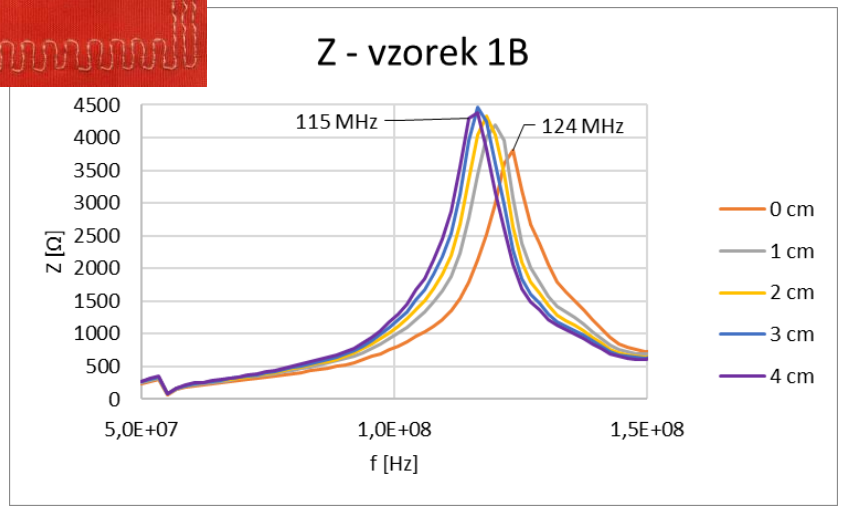
Obr. 88 Závislosti impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz



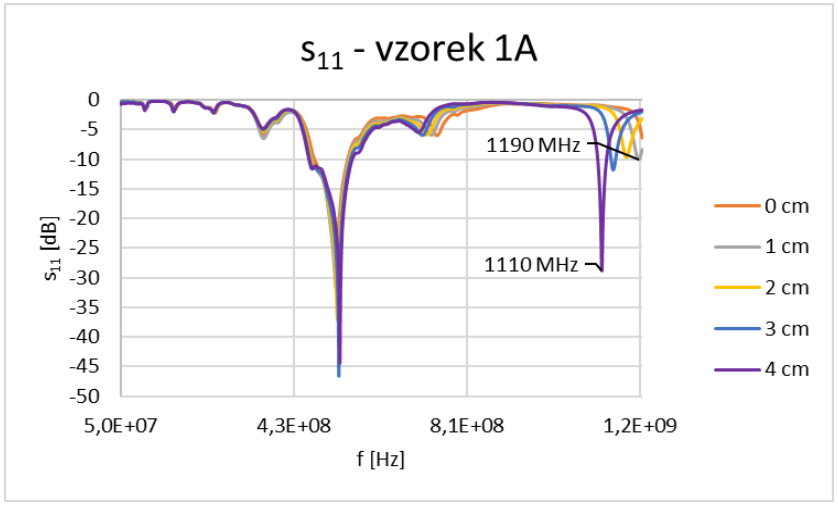


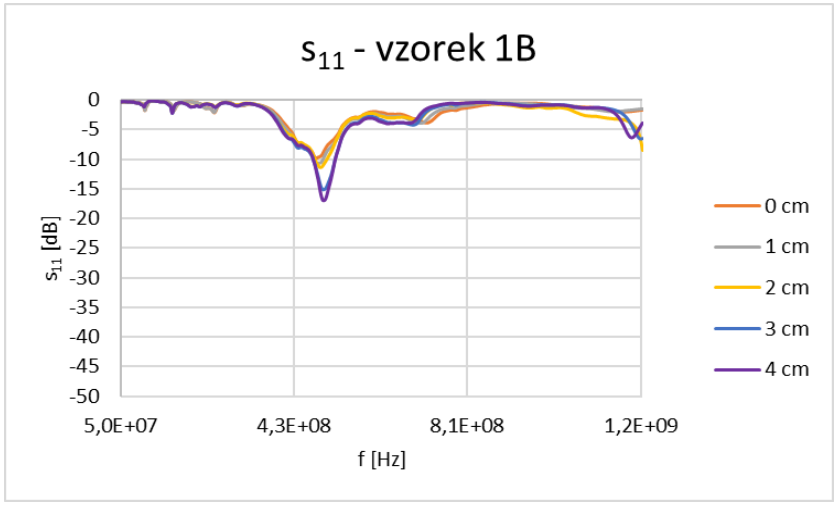
Obr. 89 Závislosti sériové indukčnosti na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz



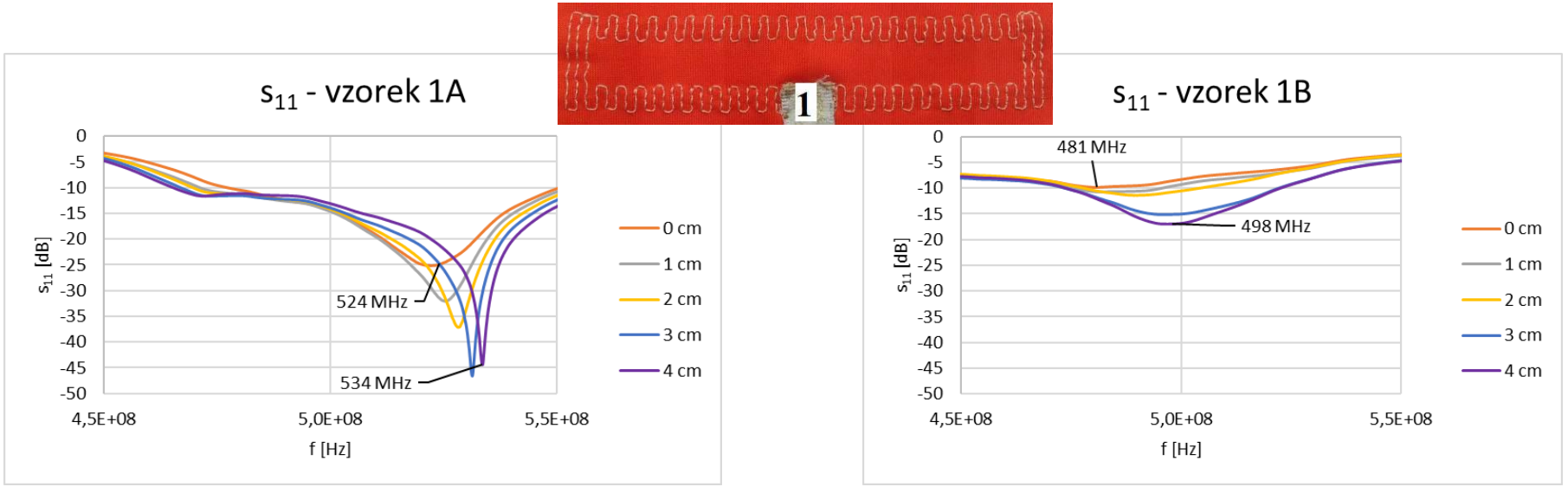


Obr. 90 Závislost impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 400 MHz

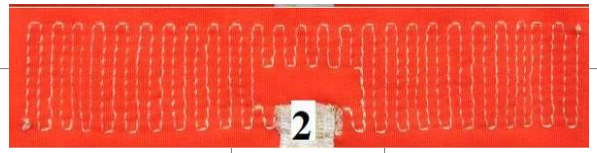


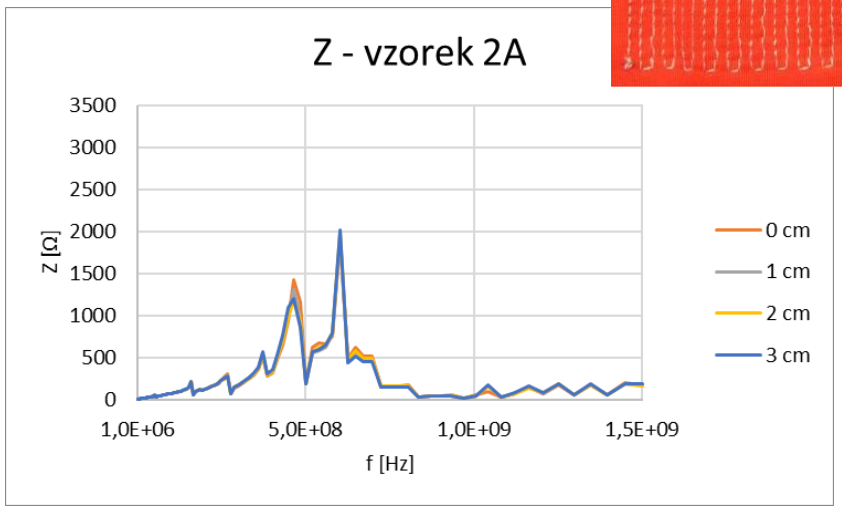


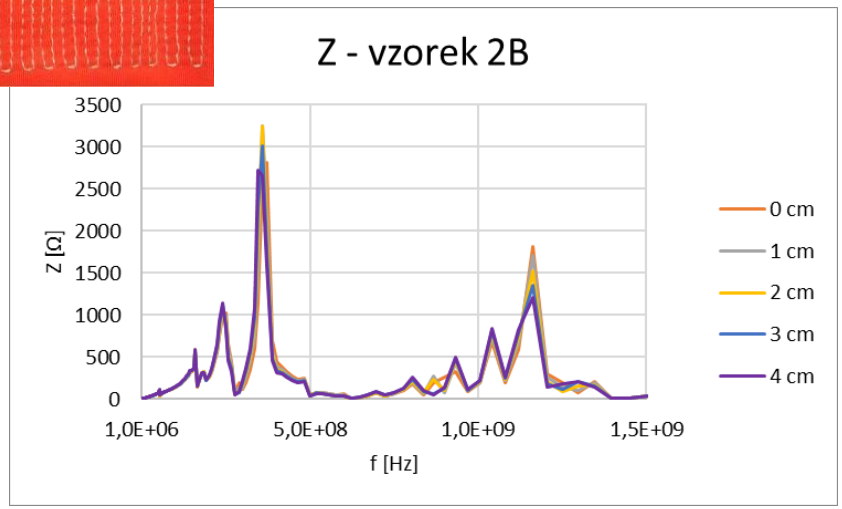
Obr. 91 Závislost s_{11} na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 1,2 GHz



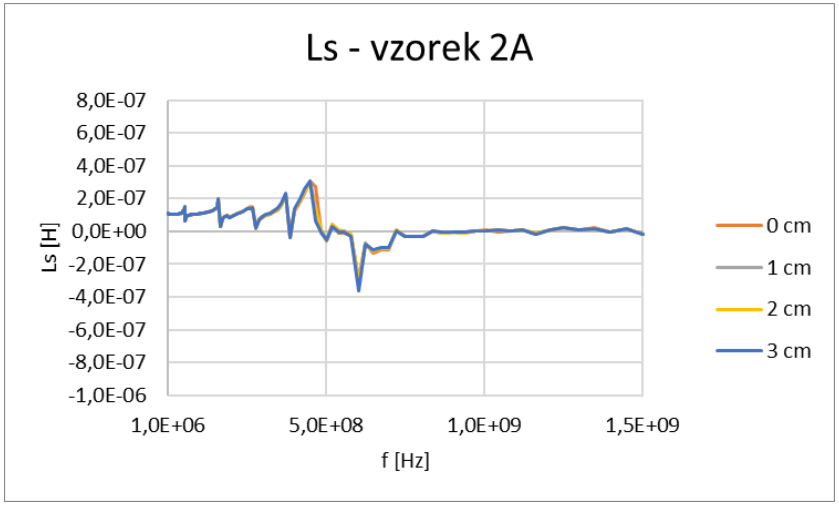
Obr. 92 Detail – závislost s_{11} na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 1,2 GHz

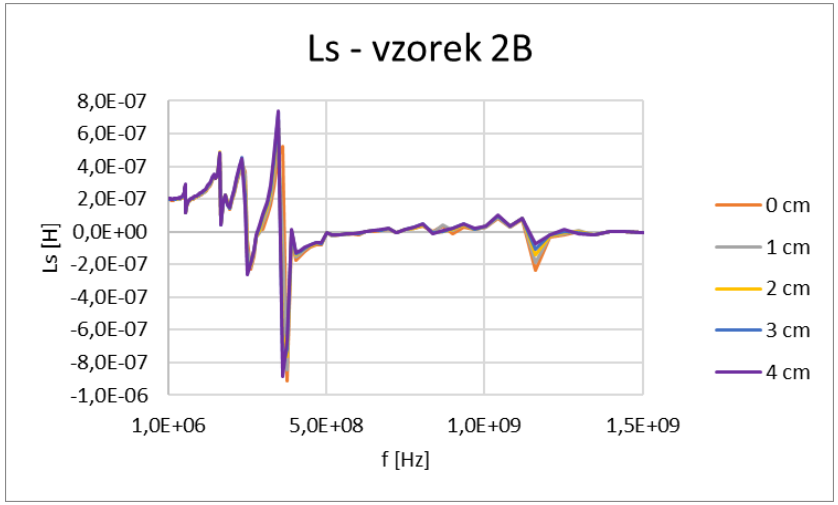




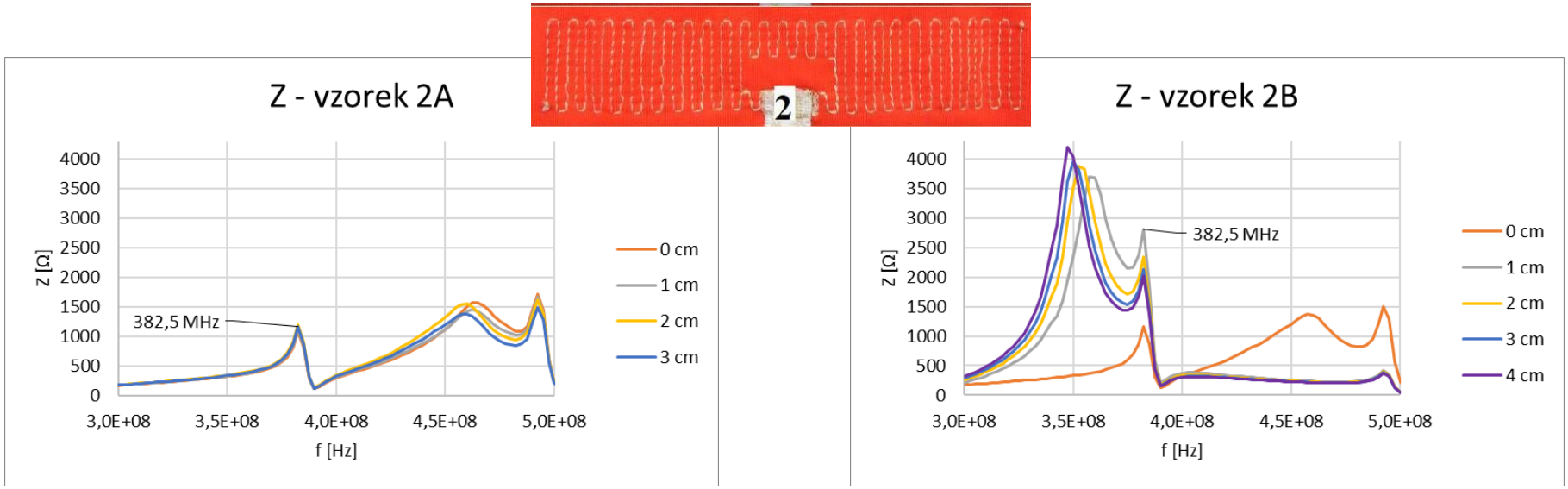


Obr. 93 Závislosti impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz

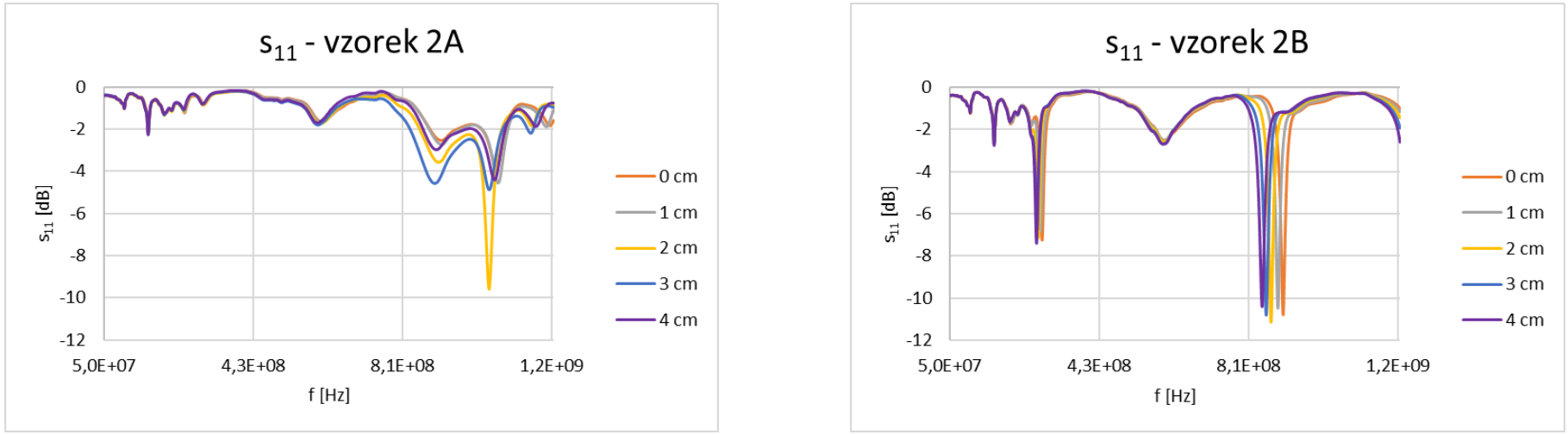




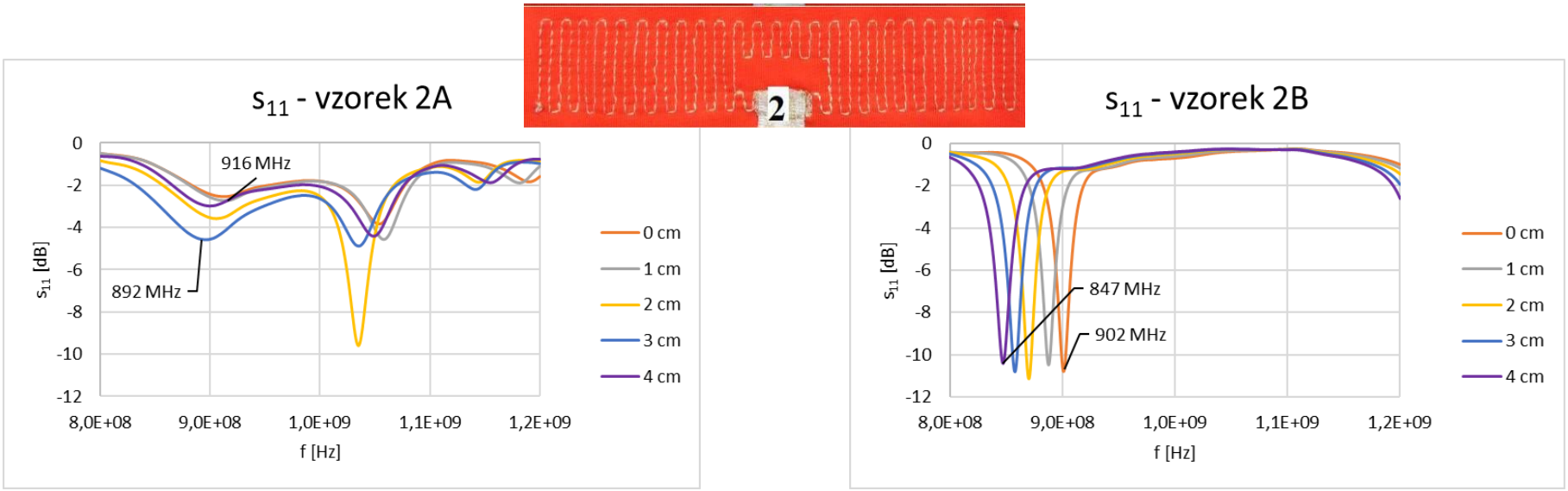
Obr. 94 Závislosti sériové indukčnosti na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz



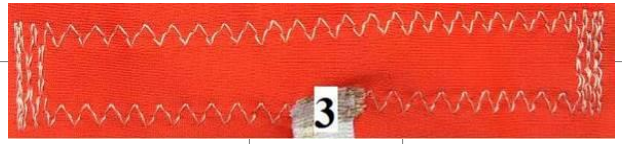
Obr. 95 Závislost impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 100 MHz – 600 MHz

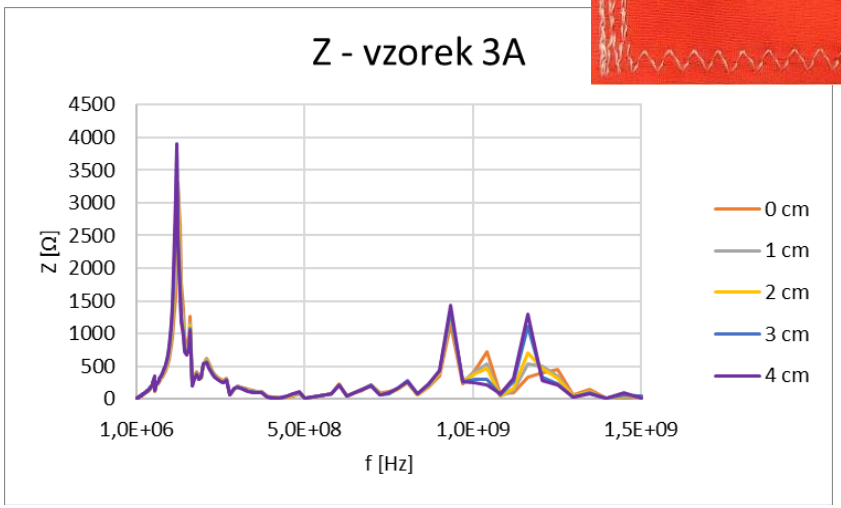


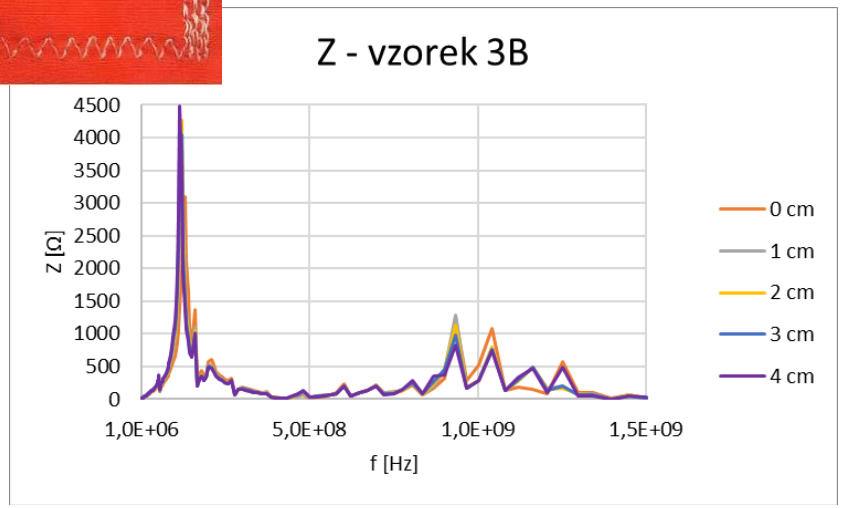
Obr. 96 Závislost s_{11} na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 1,2 GHz



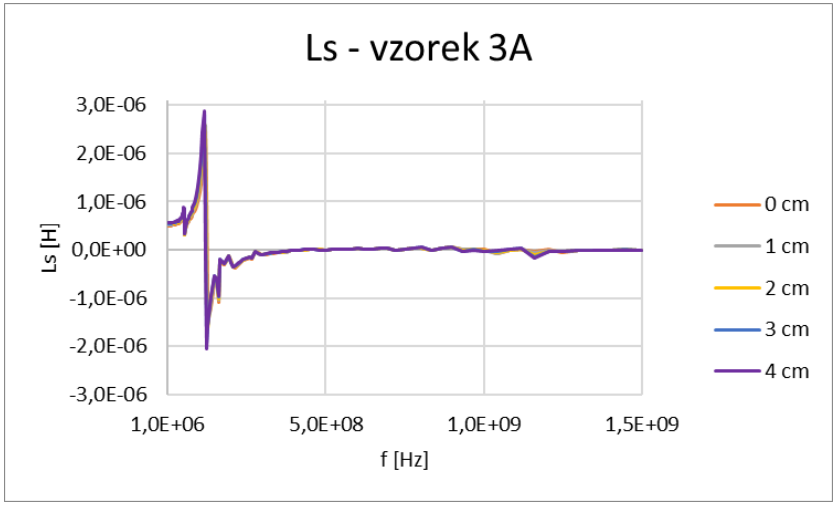
Obr. 97 Detail – závislost s_{11} na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 1,2 GHz

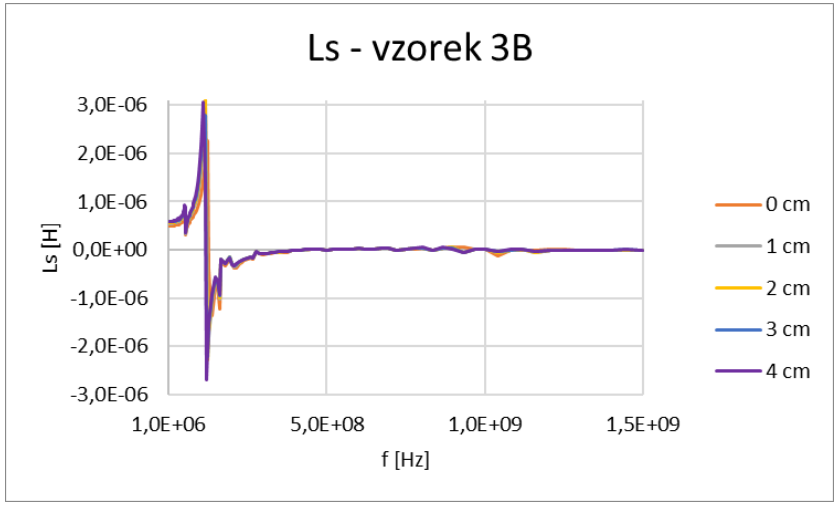




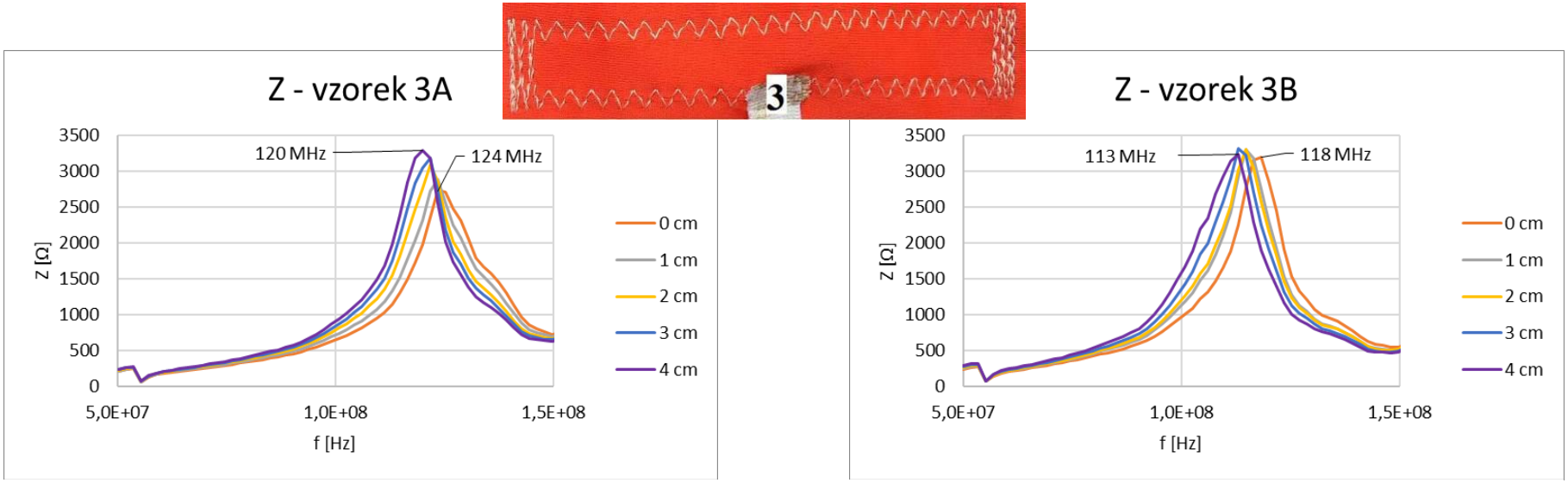


Obr. 98 Závislosti impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz

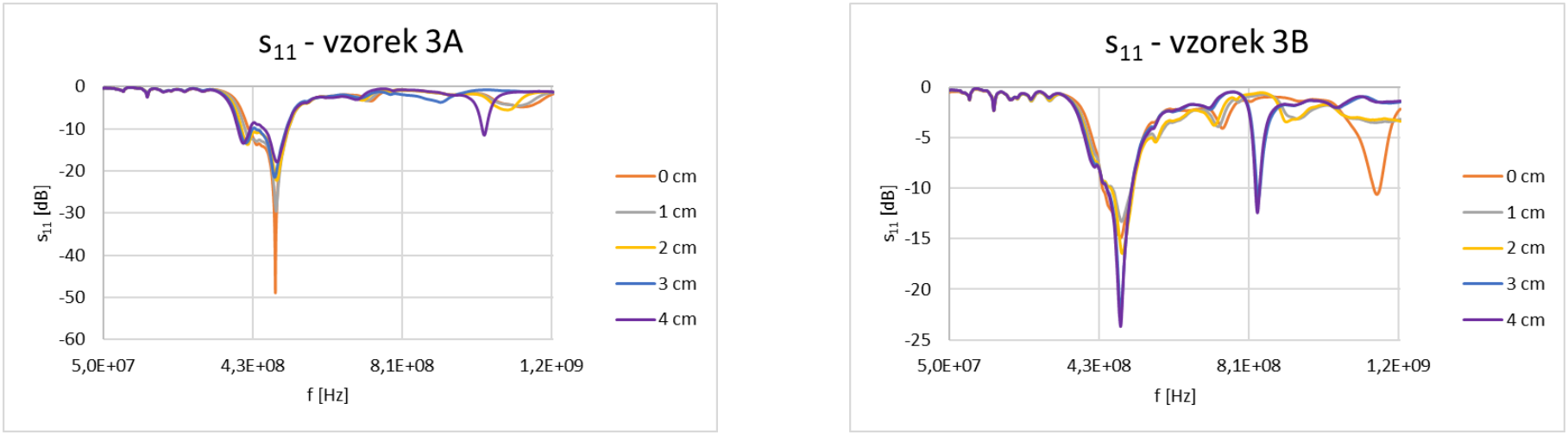




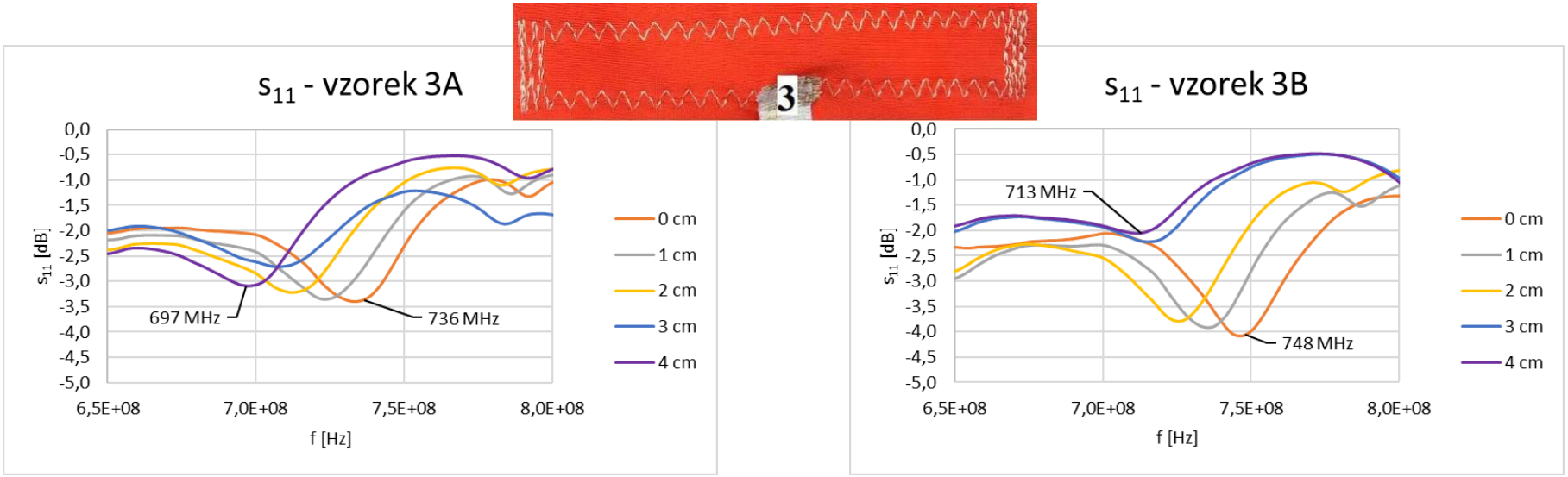
Obr. 99 Závislosti sériové indukčnosti na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz



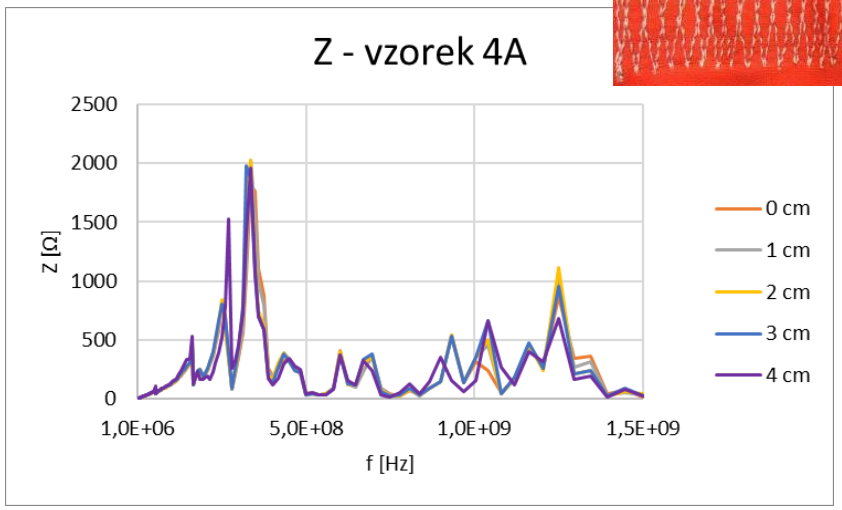
Obr. 100 Závislost impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 400 MHz

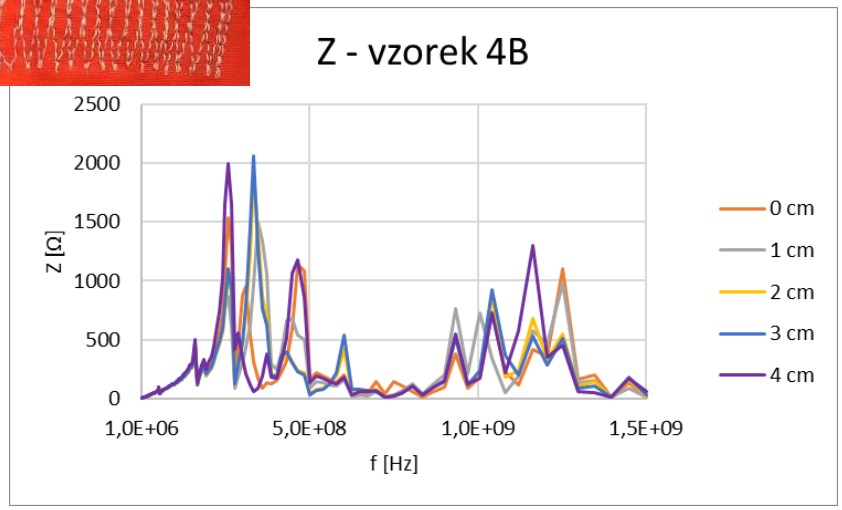


Obr. 101 Závislost s_{11} na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 1,2 GHz

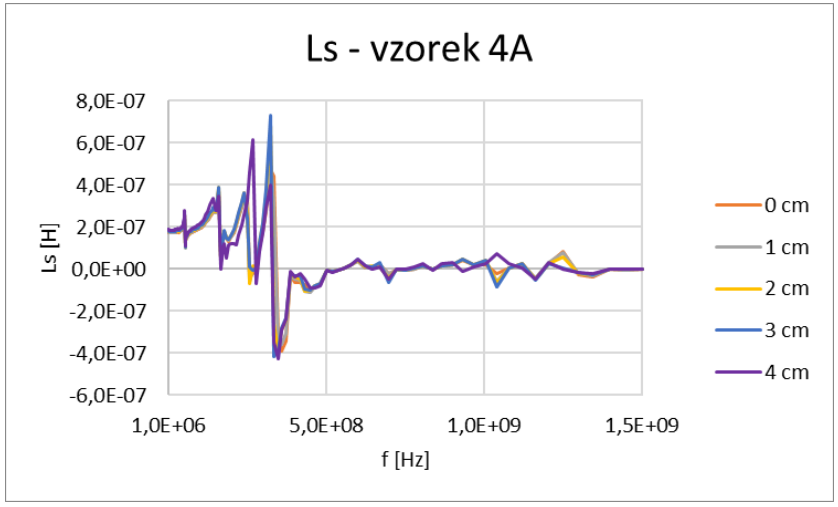


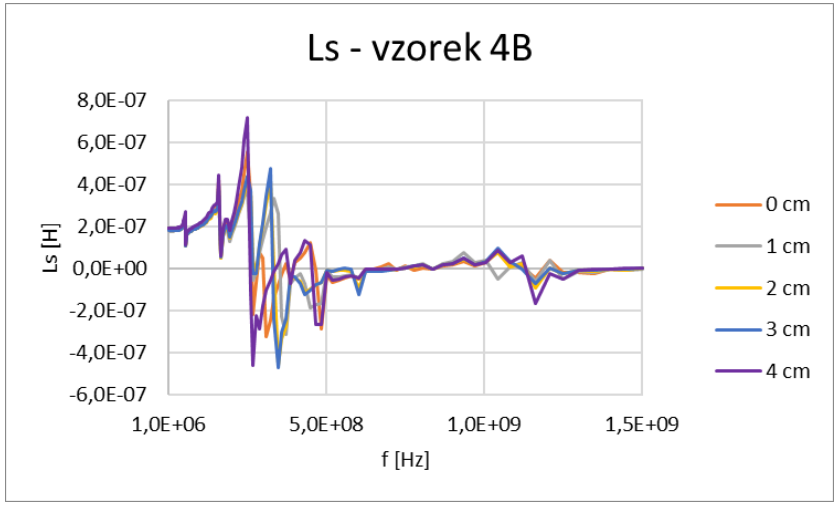
Obr. 102 Detail – závislost s_{11} na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 1,2 GHz



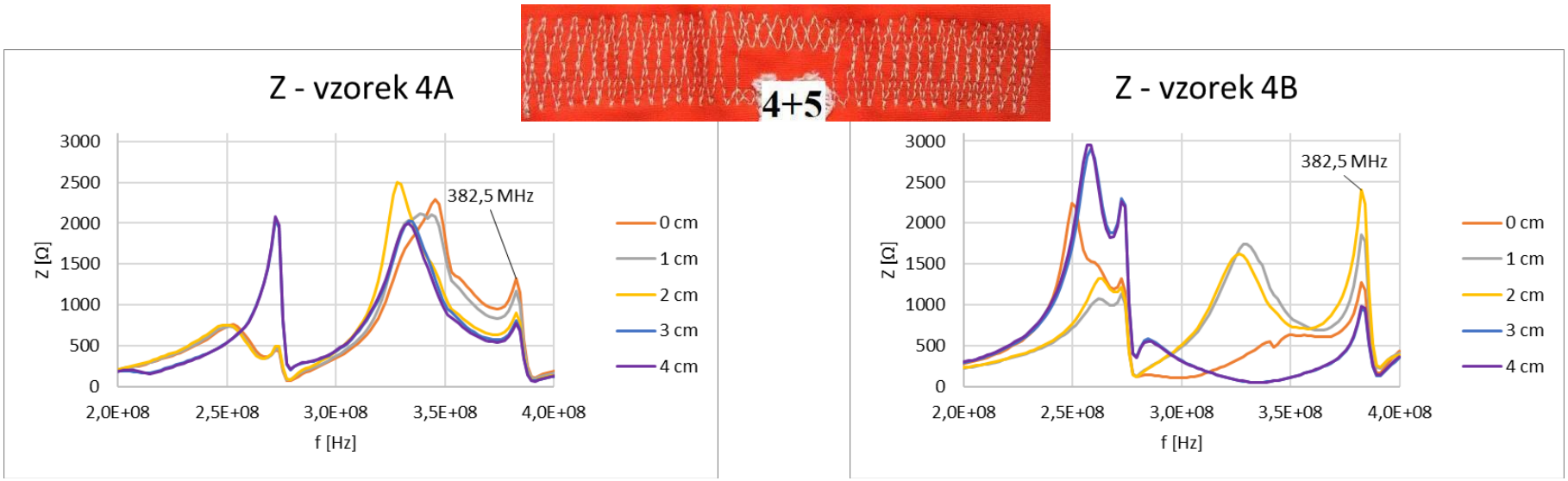


Obr. 103 Závislosti impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz

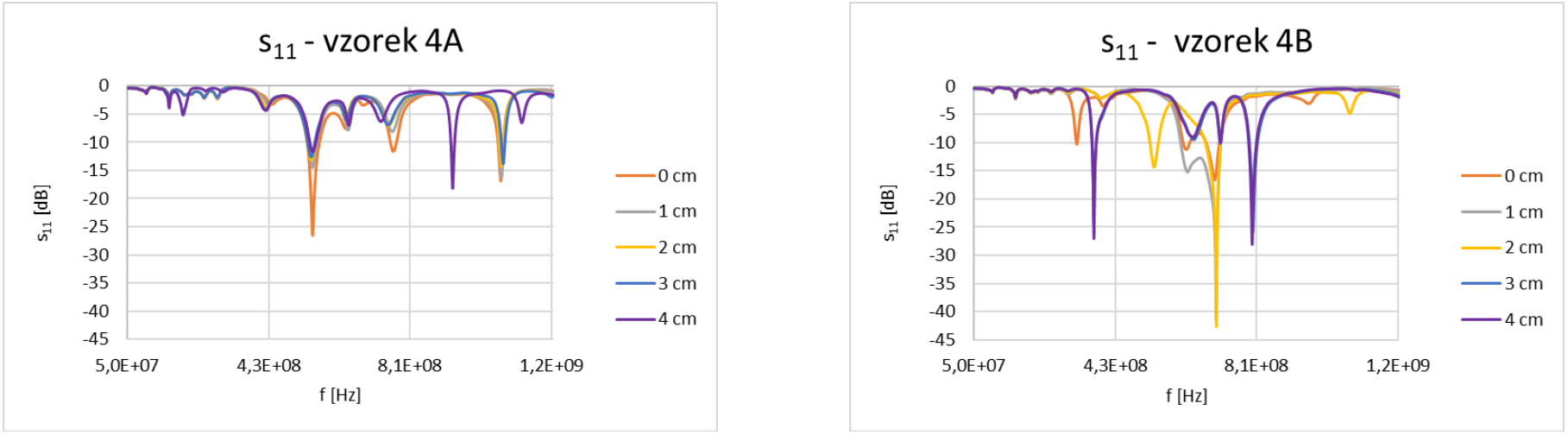




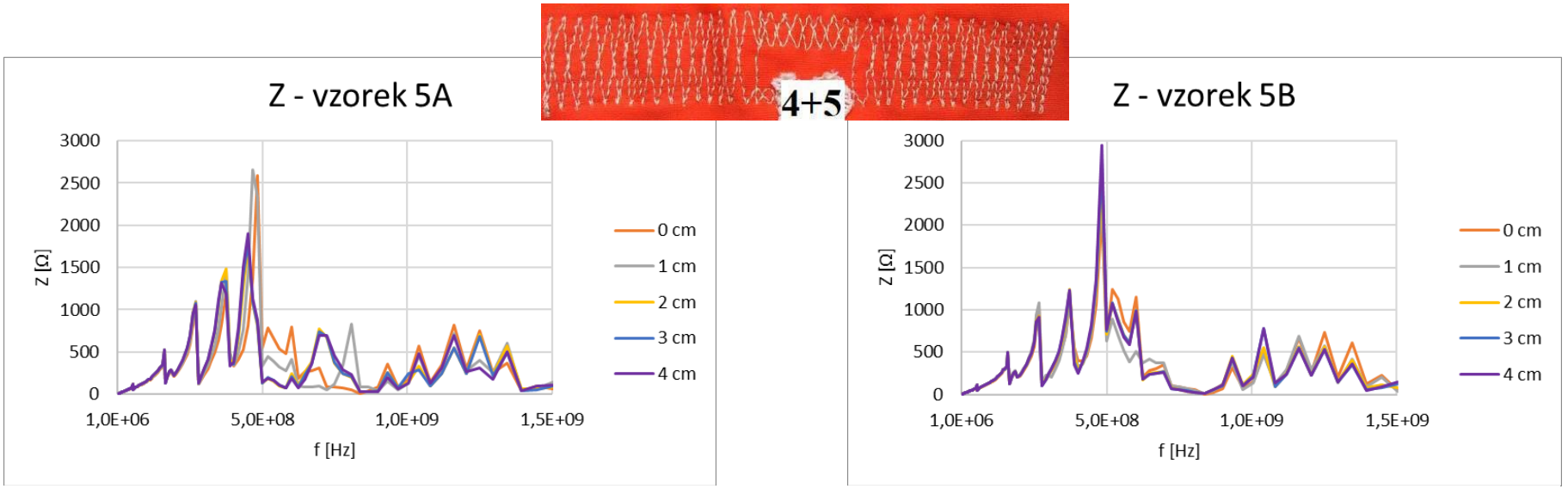
Obr. 104 Závislosti sériové indukčnosti na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz



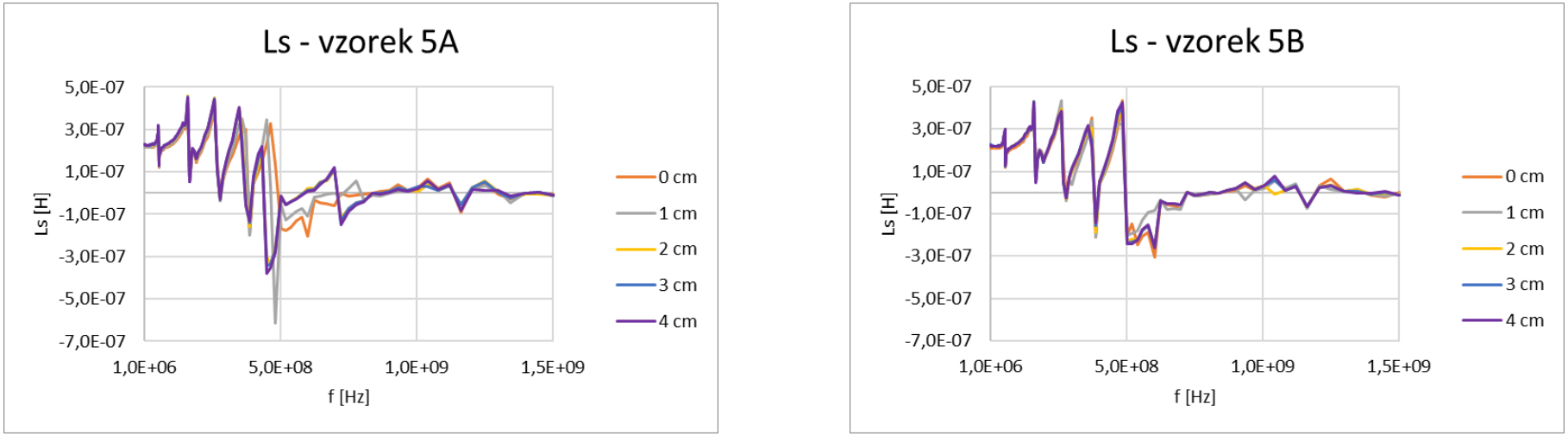
Obr. 105 Závislost impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 400 MHz



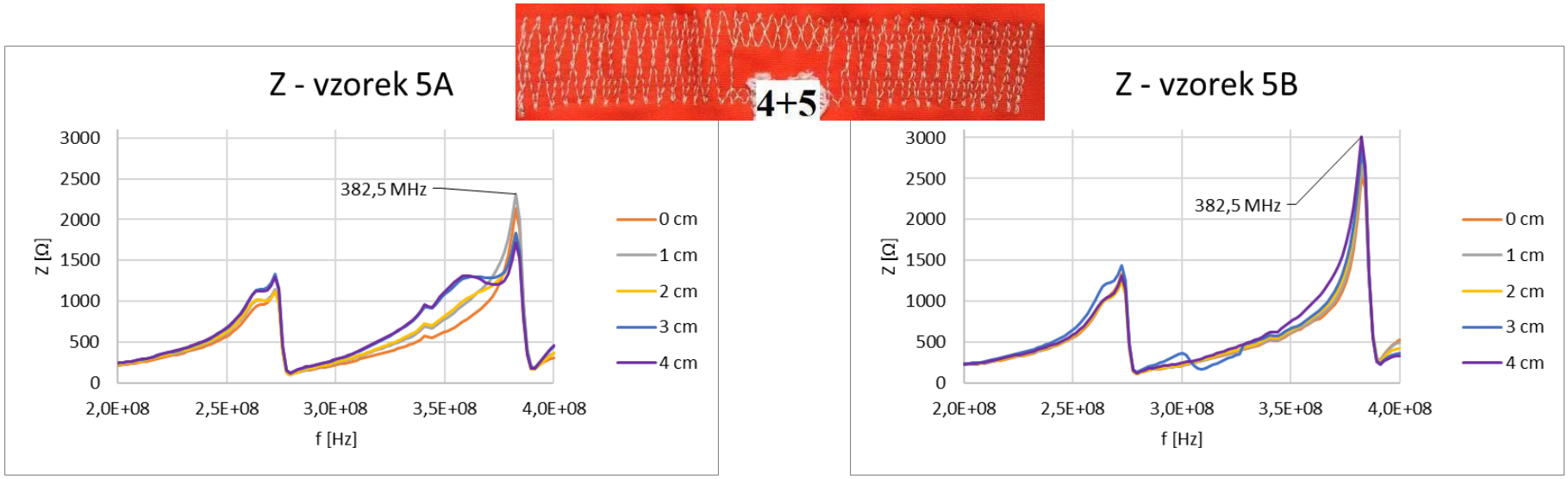
Obr. 106 Závislost s_{11} na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 1,2 GHz



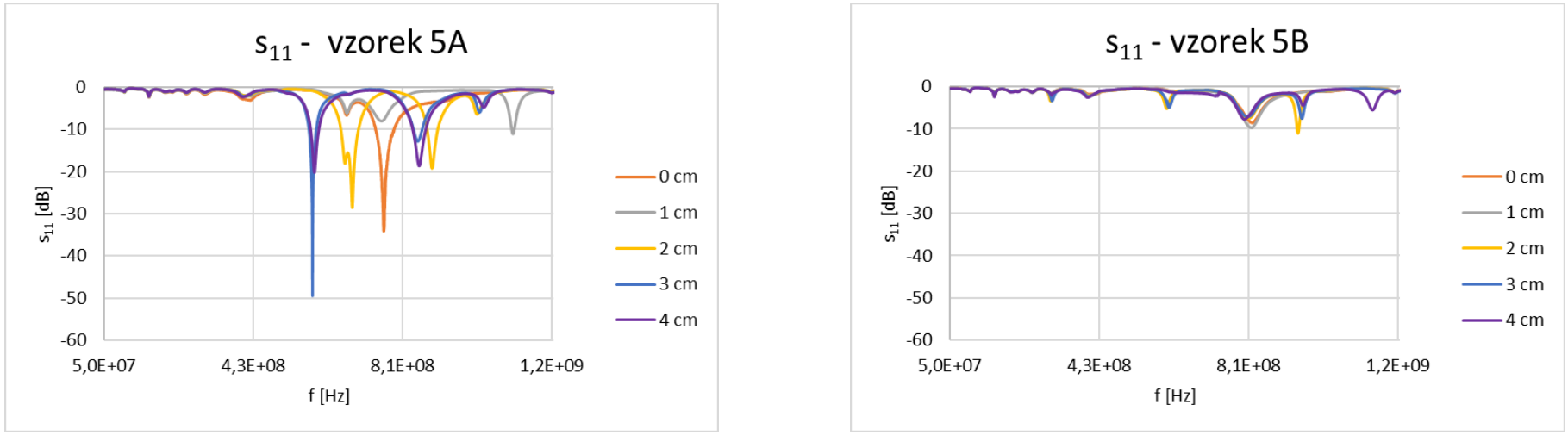
Obr. 107 Závislosti impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz



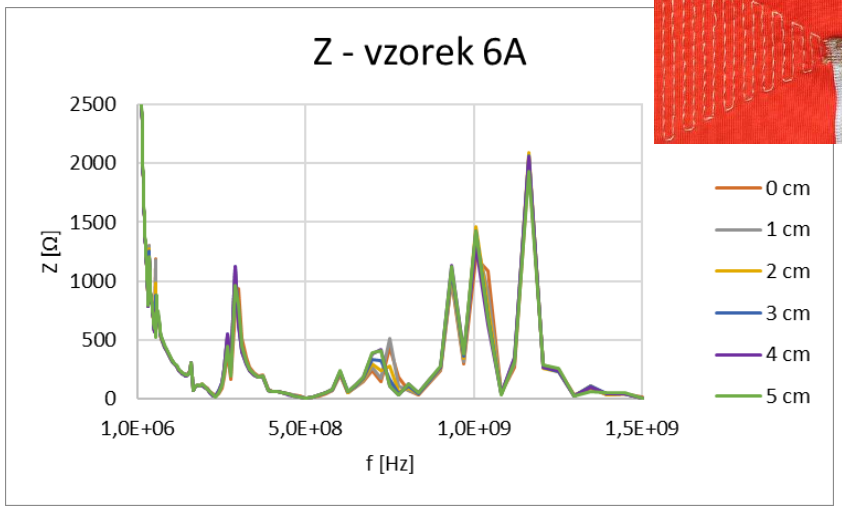
Obr. 108 Závislosti sériové indukčnosti na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz

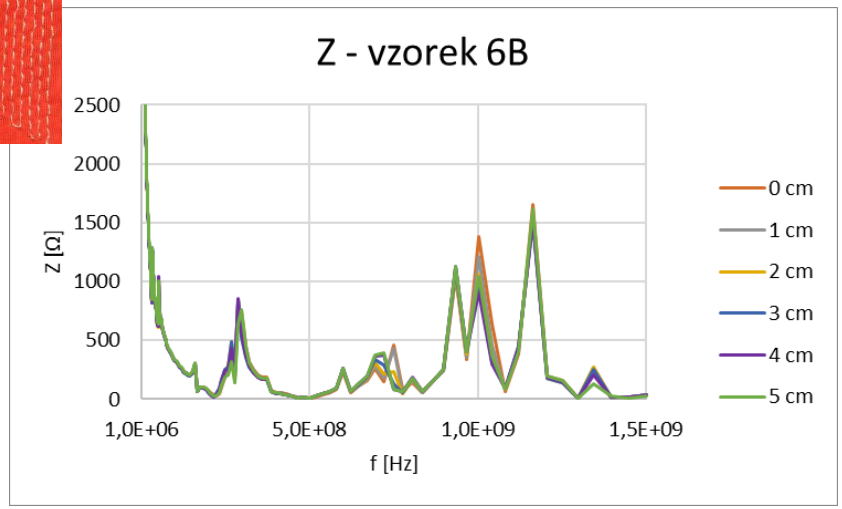


Obr. 109 Závislost impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 400 MHz

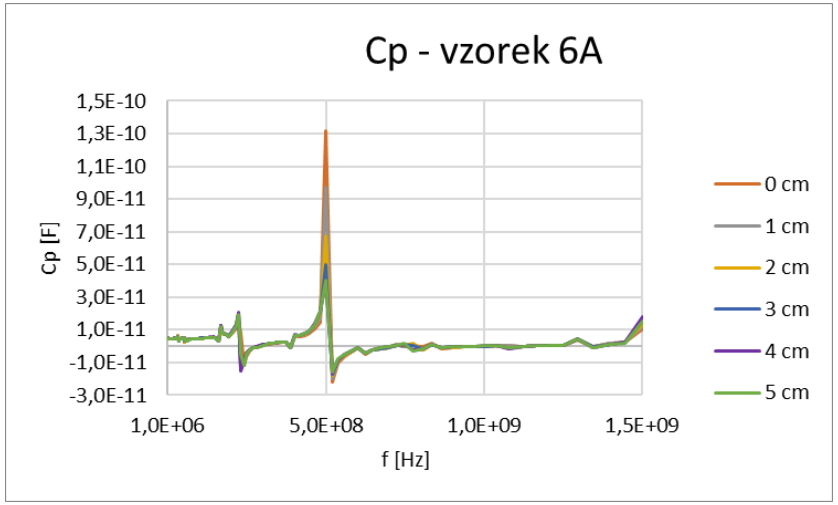


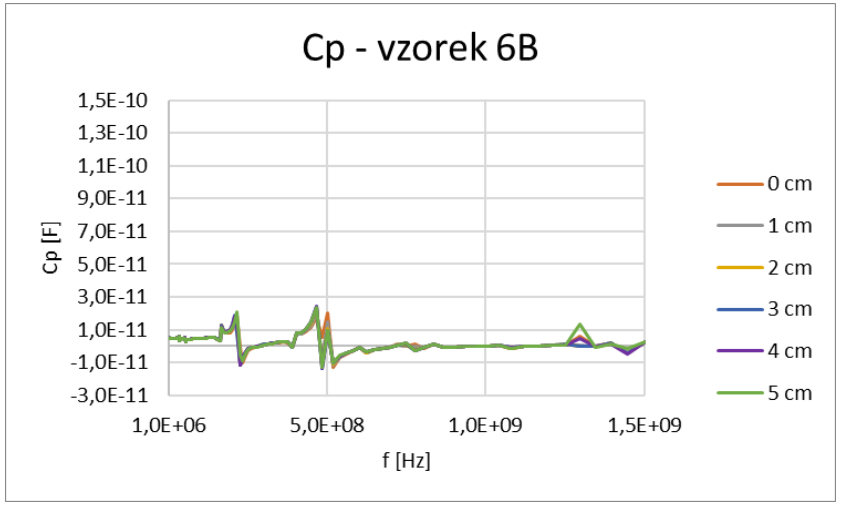
Obr. 110 Závislost s_{11} na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 1,2 GHz



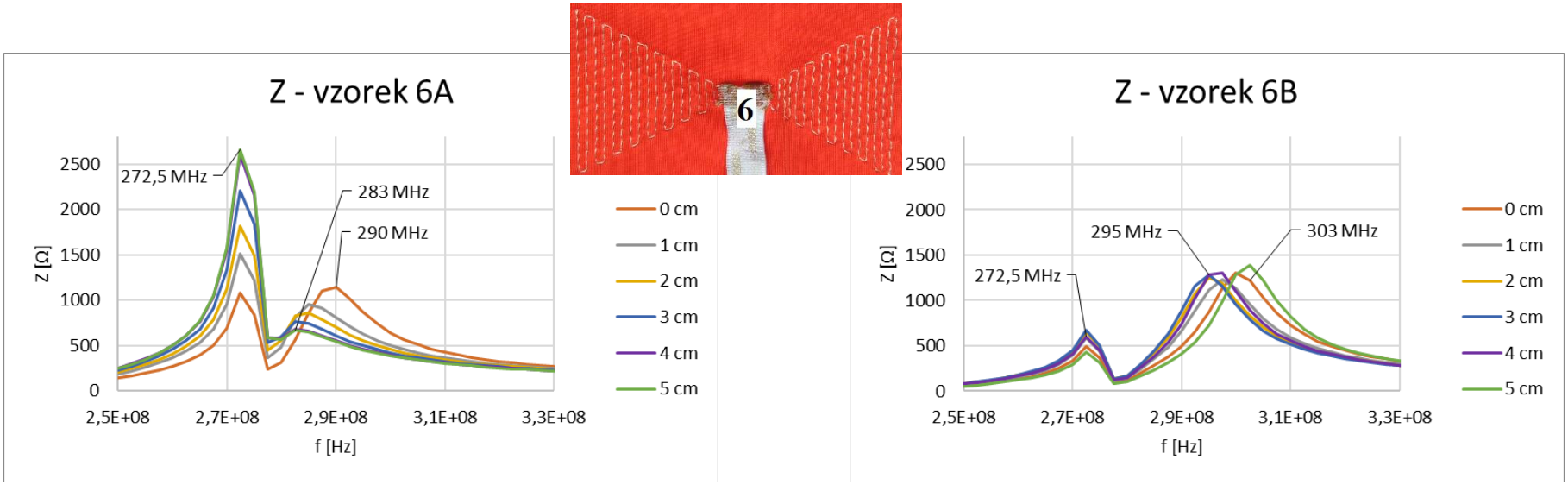


Obr. 111 Závislosti impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz

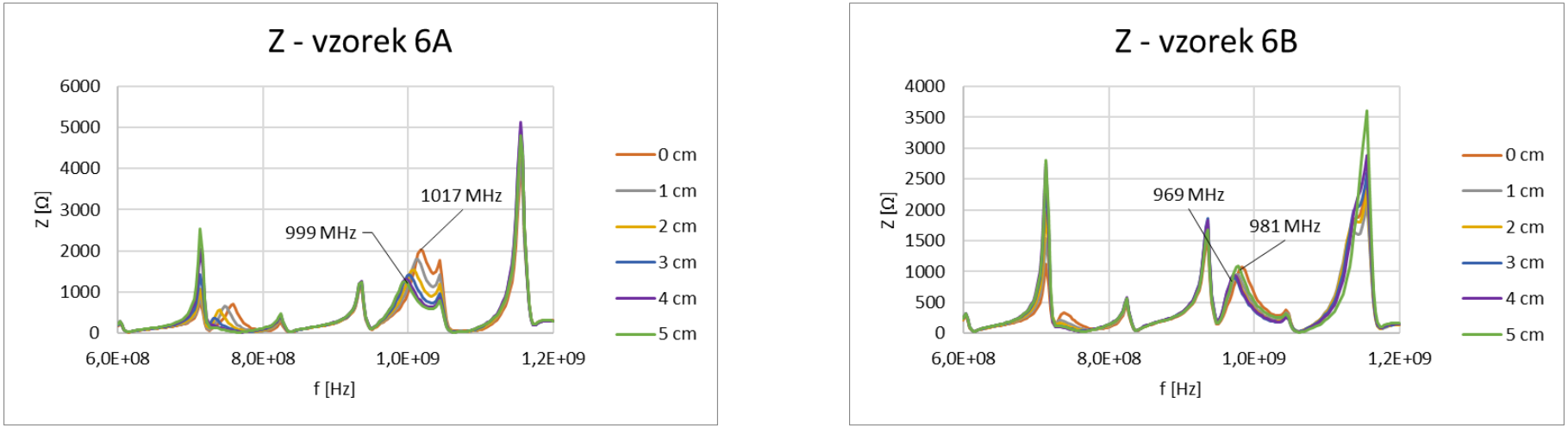




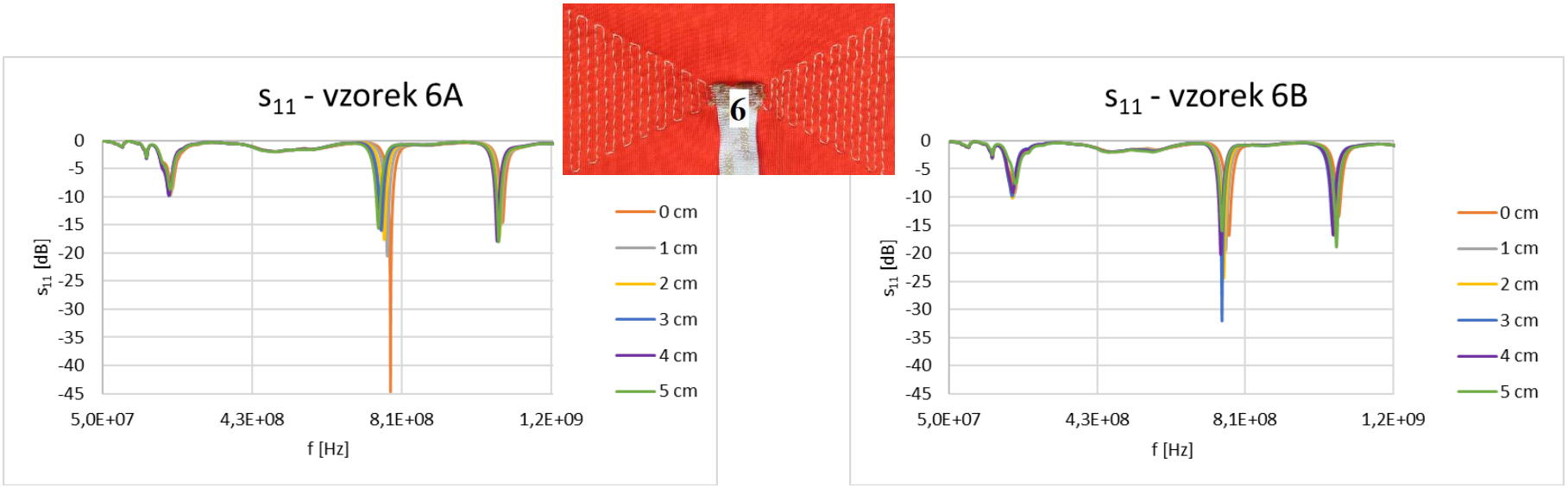
Obr. 112 Závislosti paralelní kapacity na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz



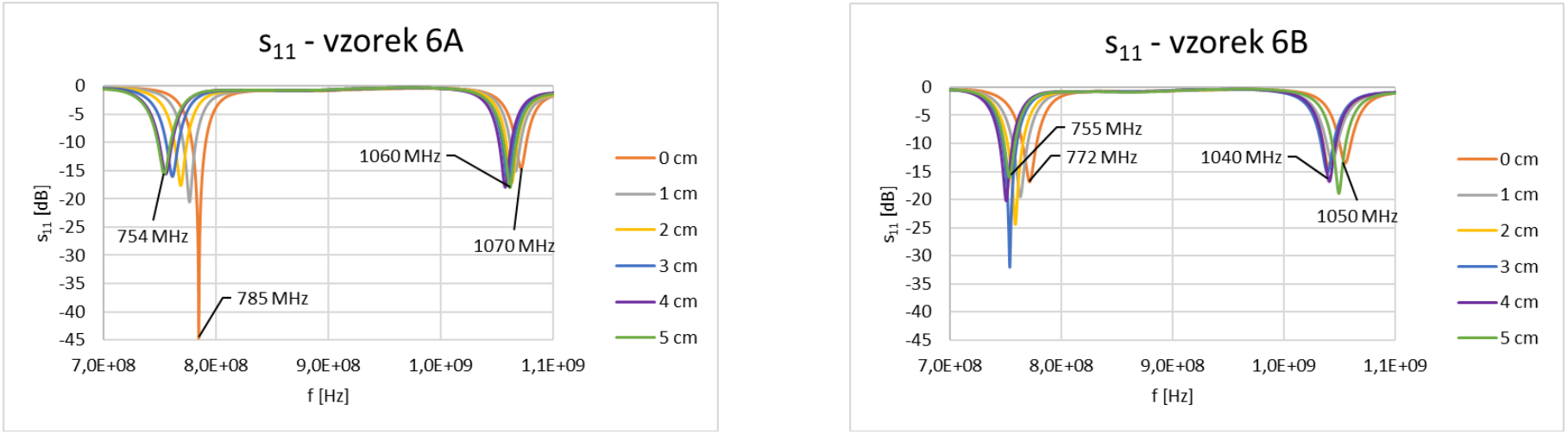
Obr. 113 Závislost impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 100 MHz – 600 MHz



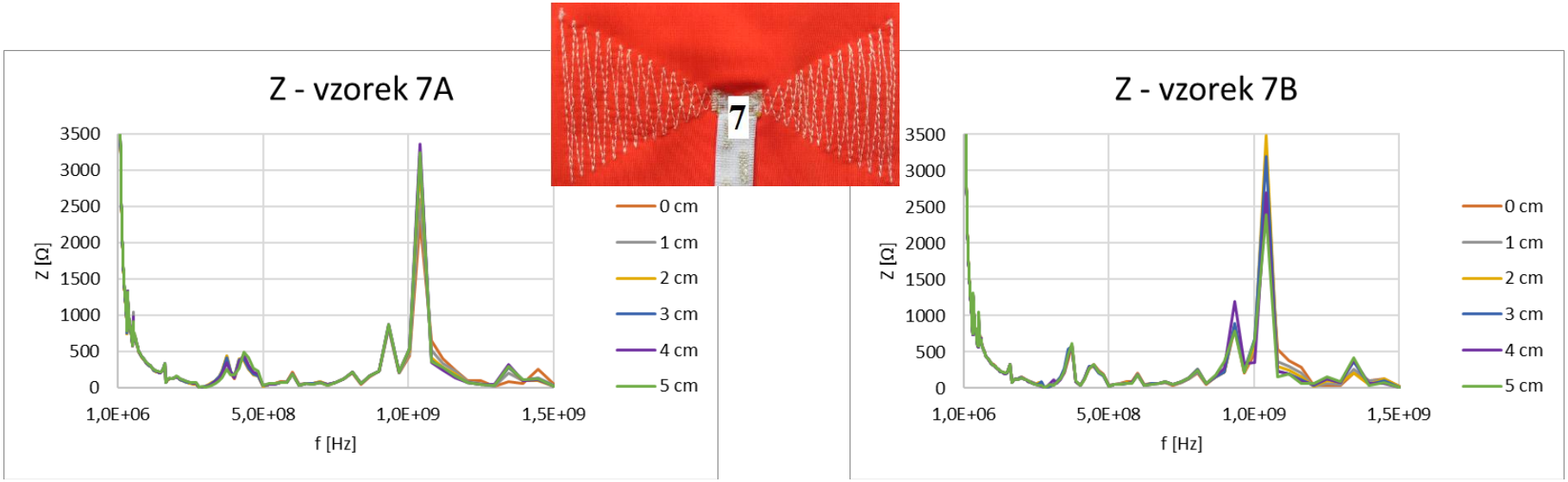
Obr. 114 Závislost impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 600 MHz – 1,2 GHz



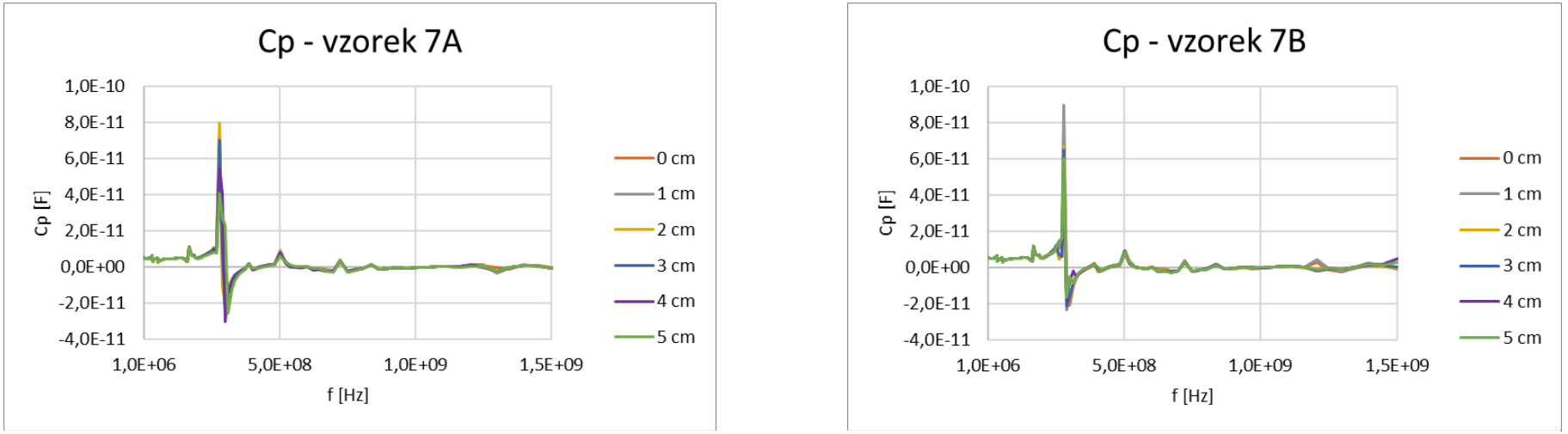
Obr. 115 Závislost s_{11} na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 1,2 GHz



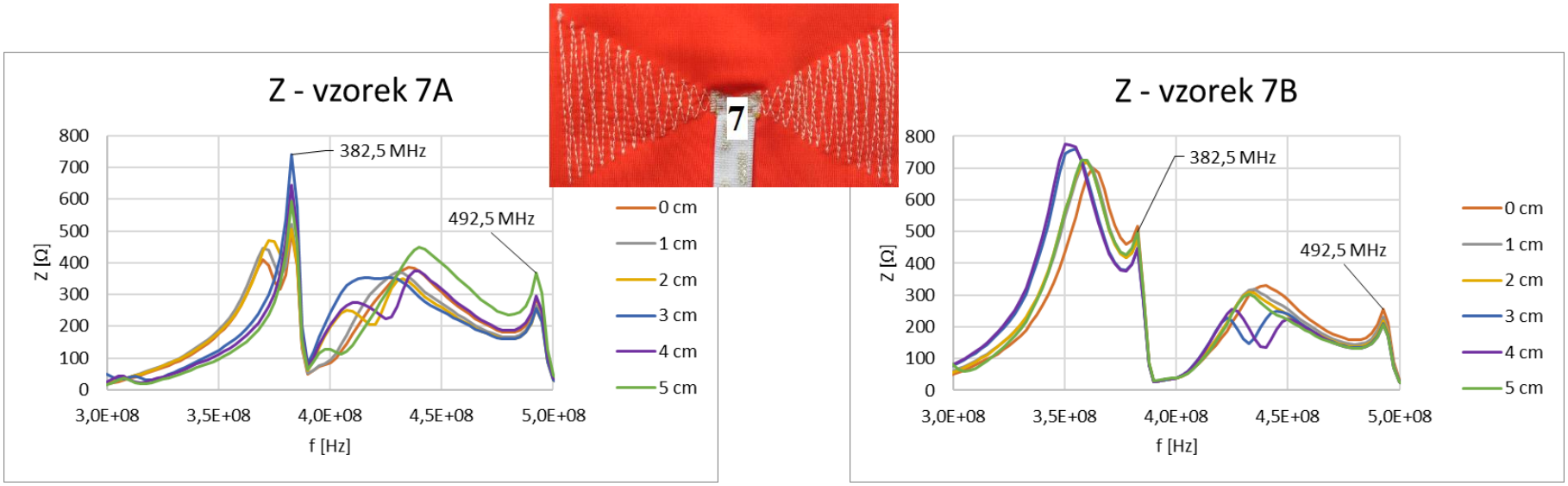
Obr. 116 Detail – závislost s_{11} na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 1,2 GHz



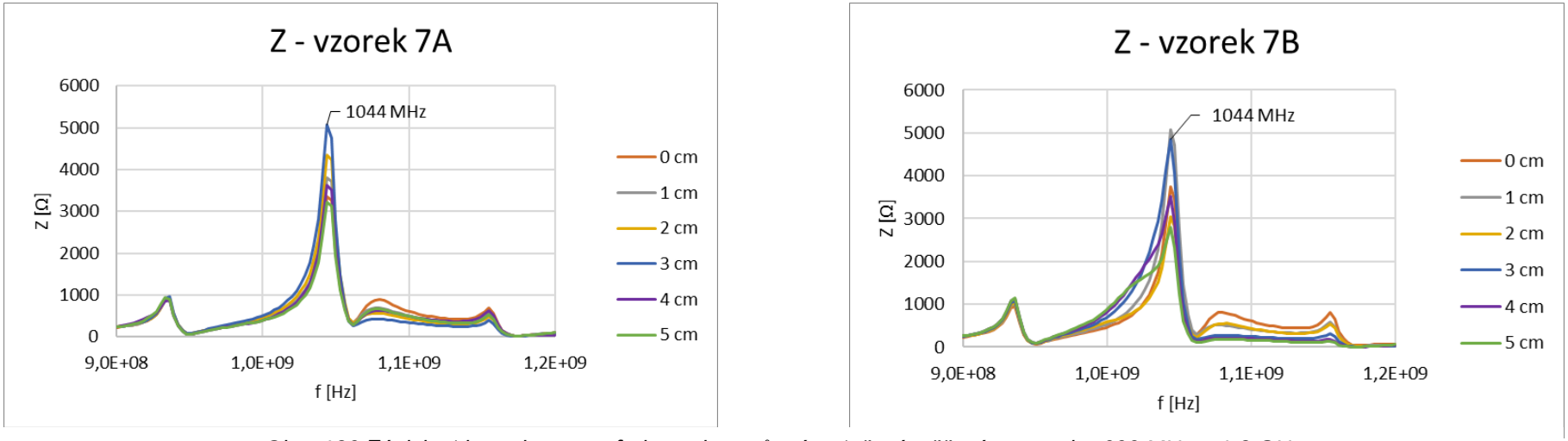
Obr. 117 Závislosti impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz



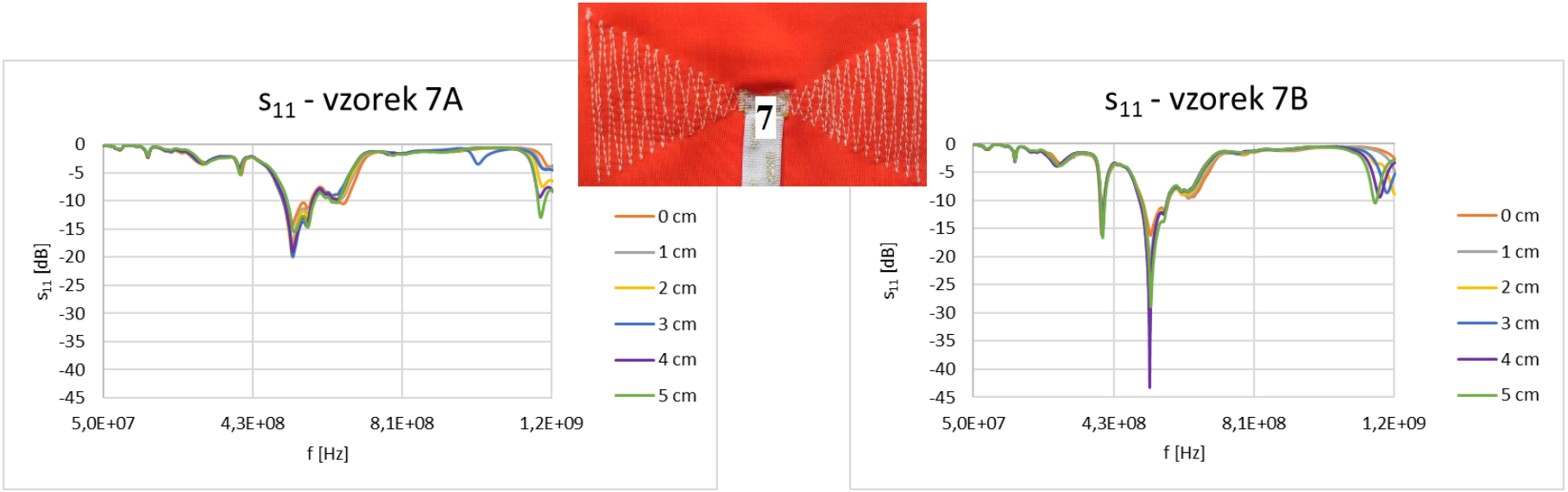
Obr. 118 Závislosti paralelní kapacity na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz



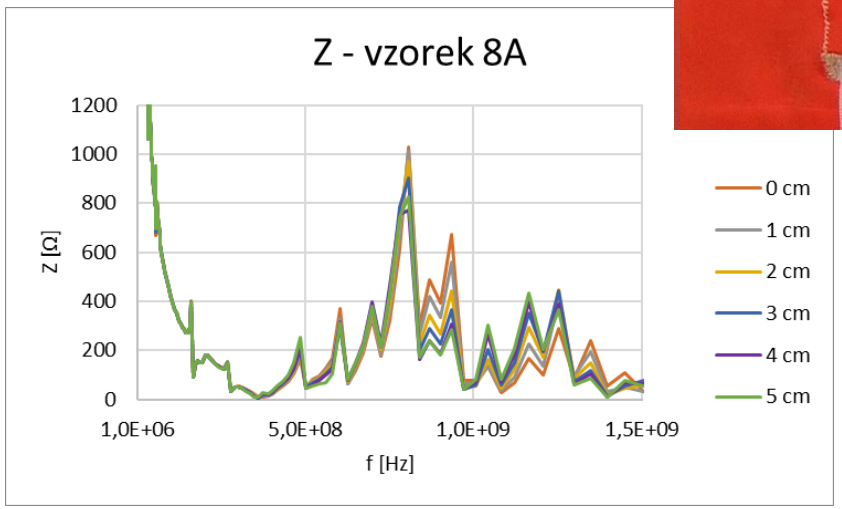
Obr. 119 Závislost impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 100 MHz – 600 MHz

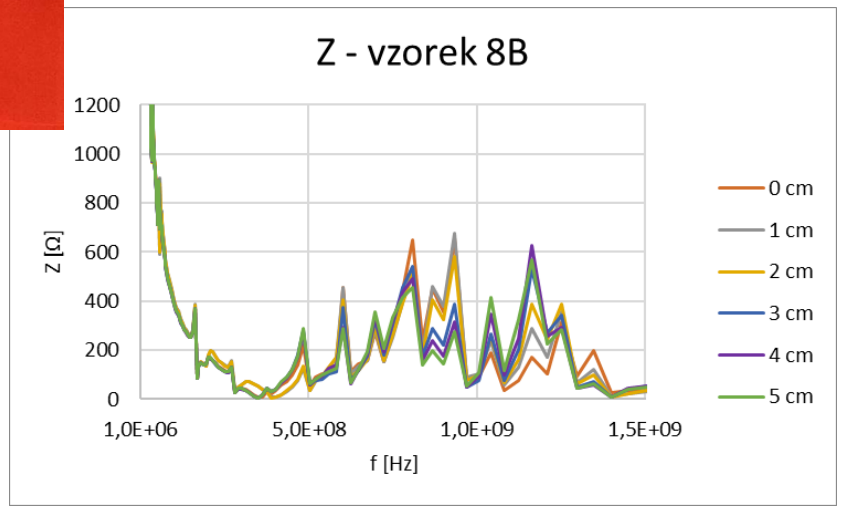


Obr. 120 Závislost impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 600 MHz – 1,2 GHz

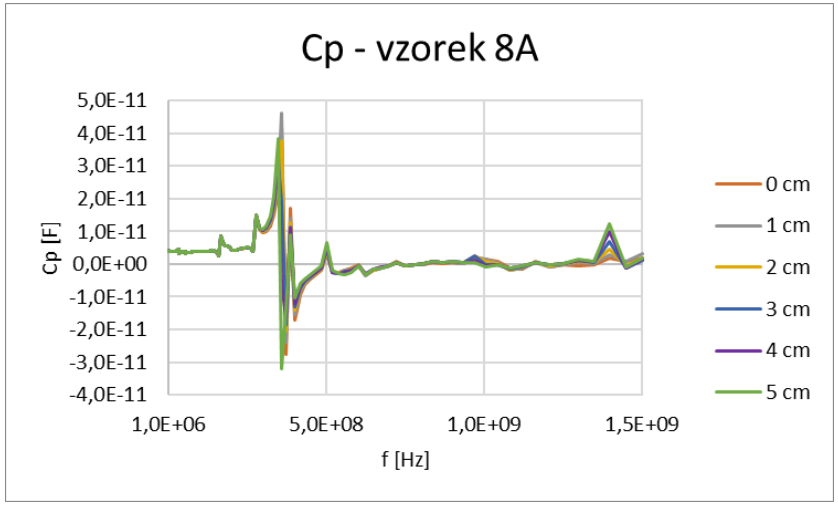


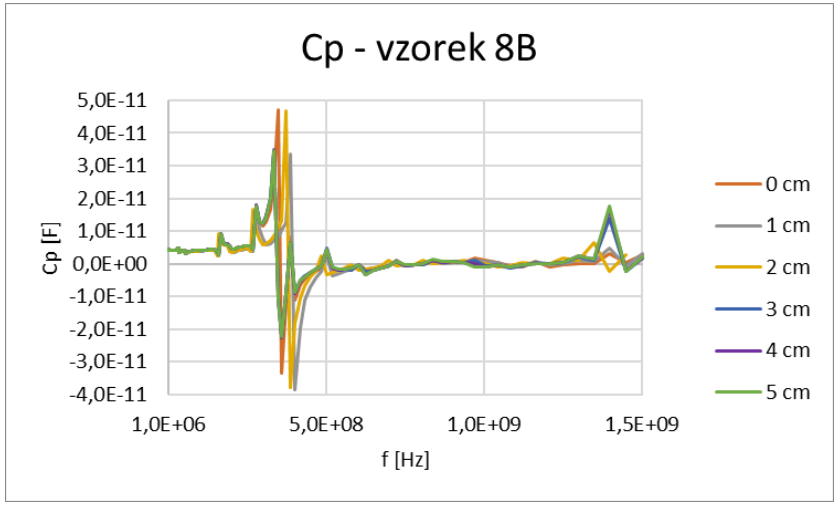
Obr. 121 Závislost s_{11} na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 1,2 GHz



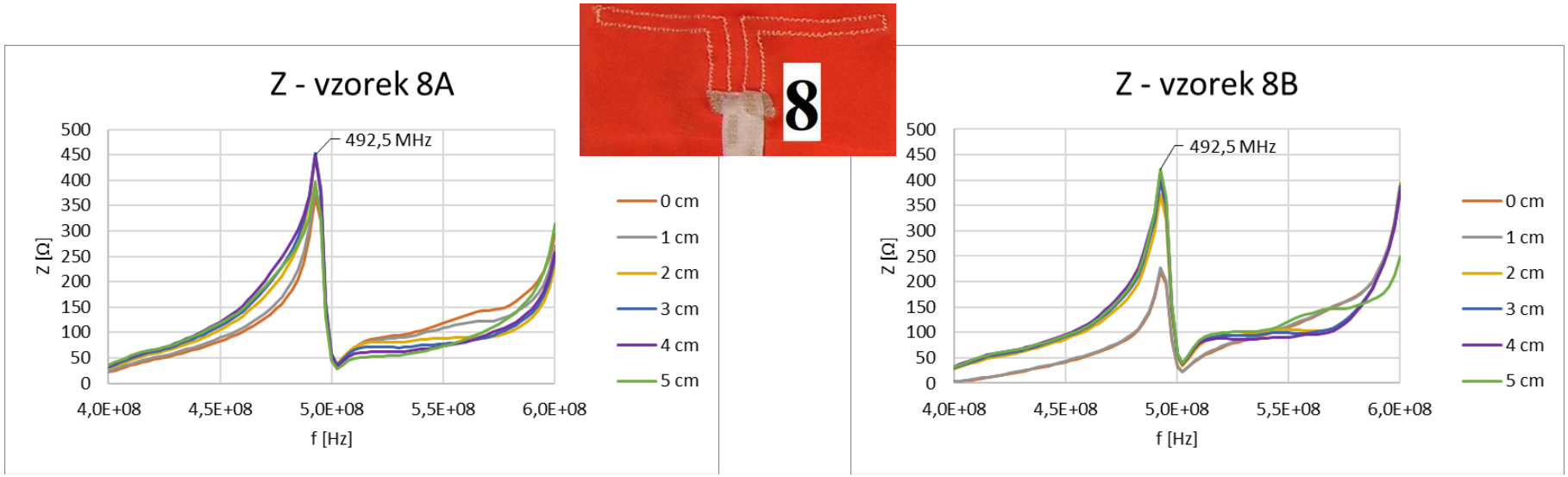


Obr. 122 Závislosti impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz

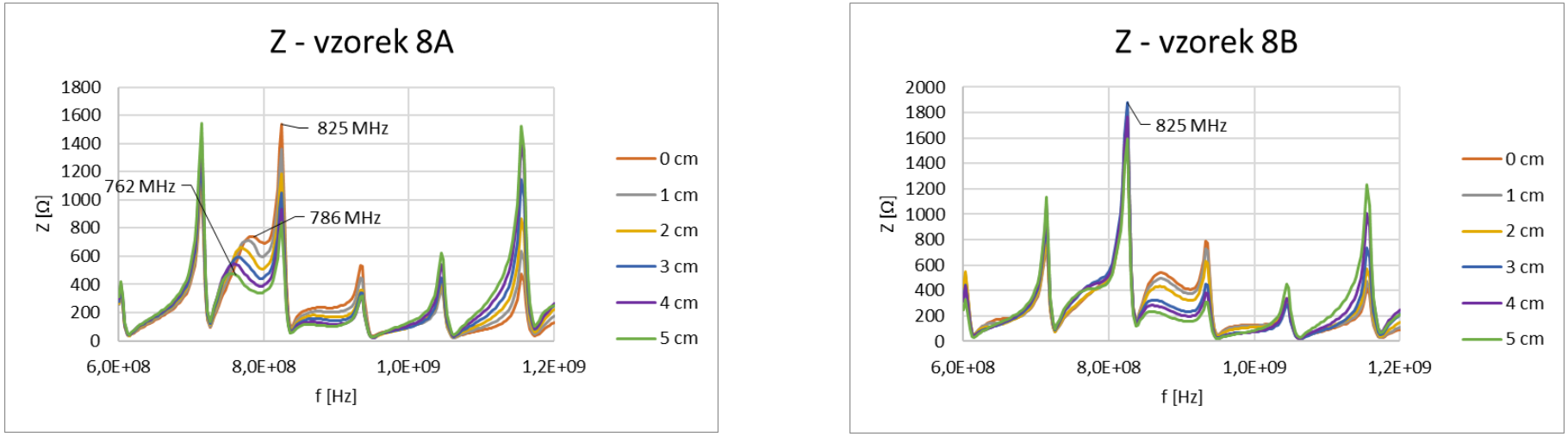




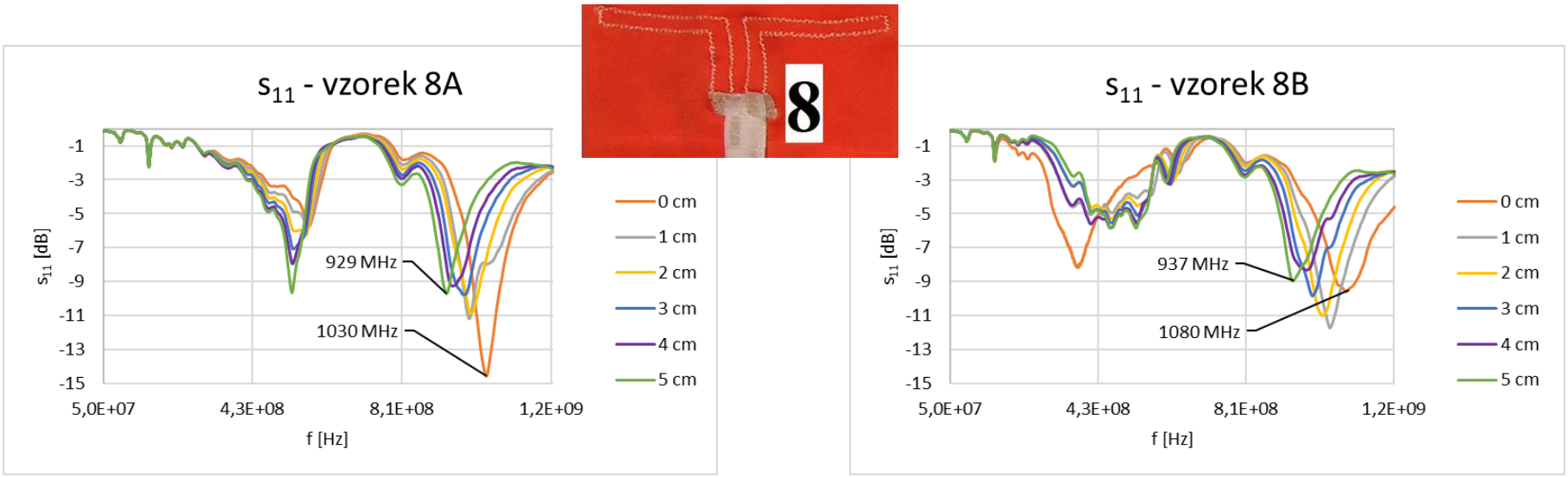
Obr. 123 Závislosti paralelní kapacity na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz



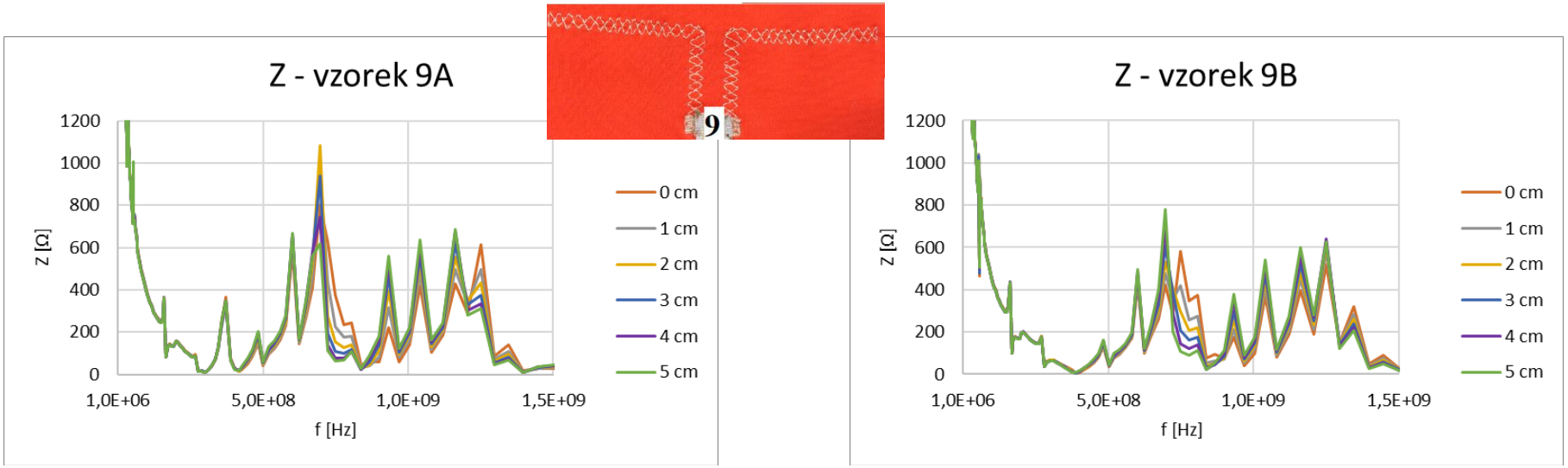
Obr. 124 Závislost impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 100 MHz – 600 MHz



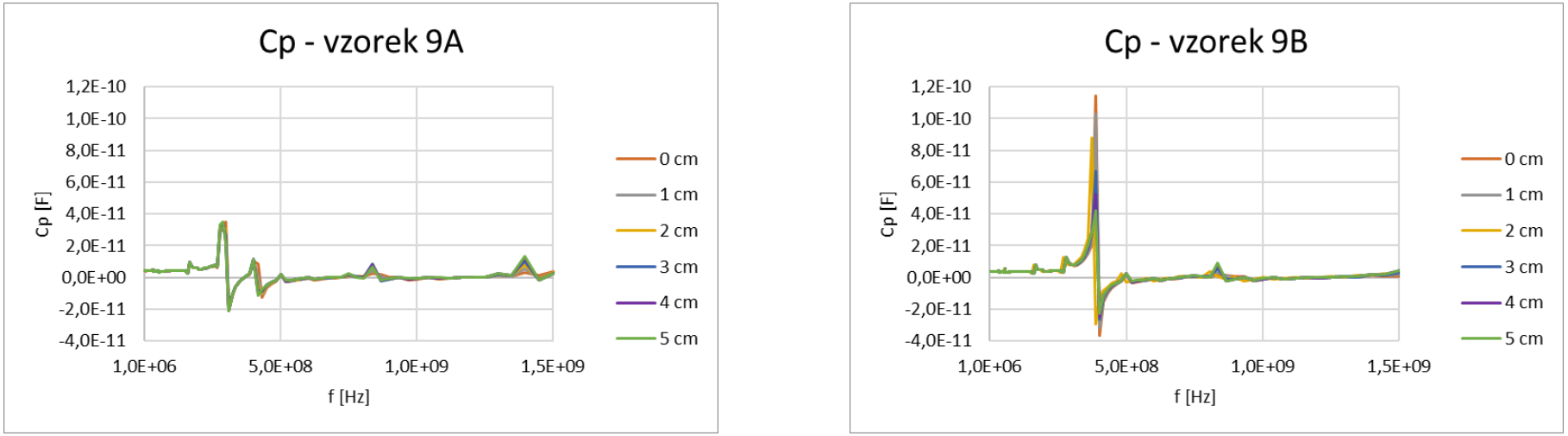
Obr. 125 Závislost impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 600 MHz – 1,2 GHz



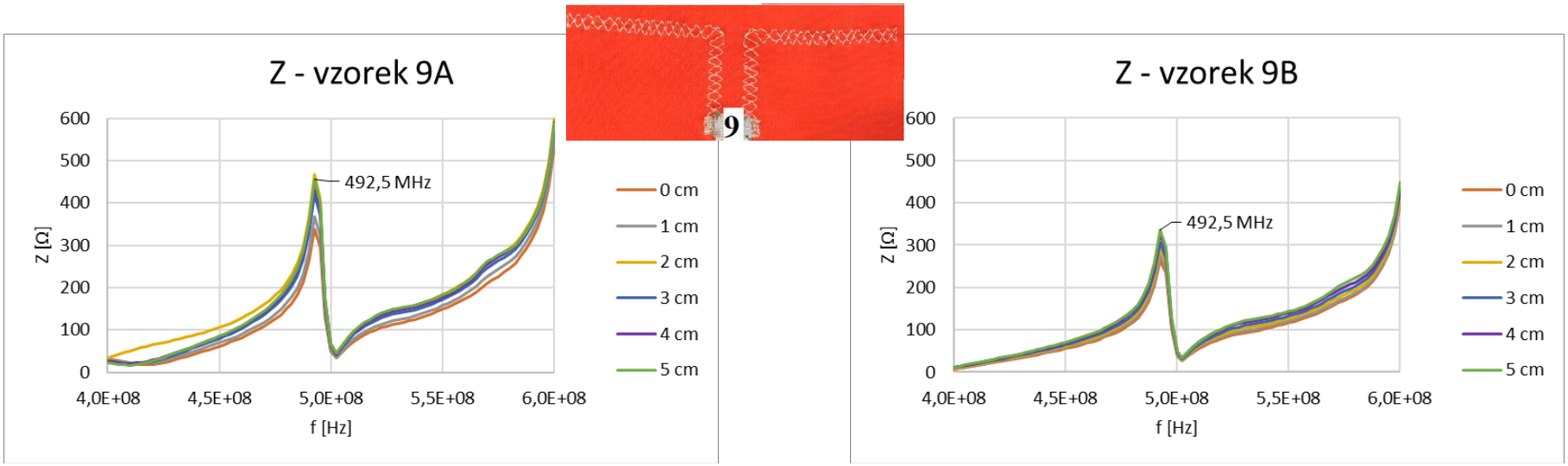
Obr. 126 Závislost s_{11} na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 1,2 GHz



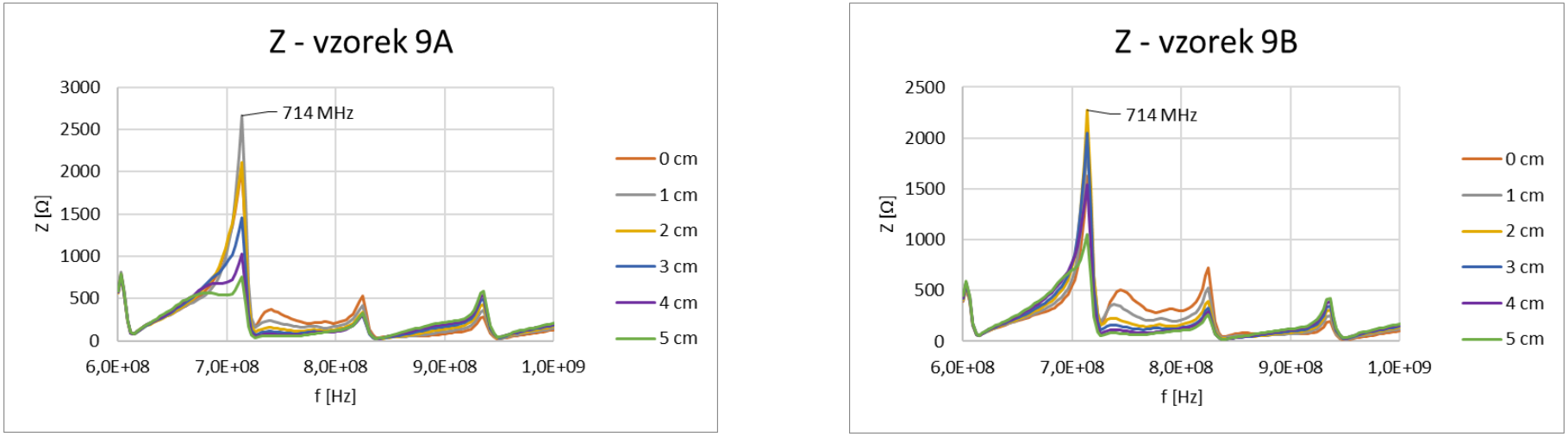
Obr. 127 Závislosti impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz



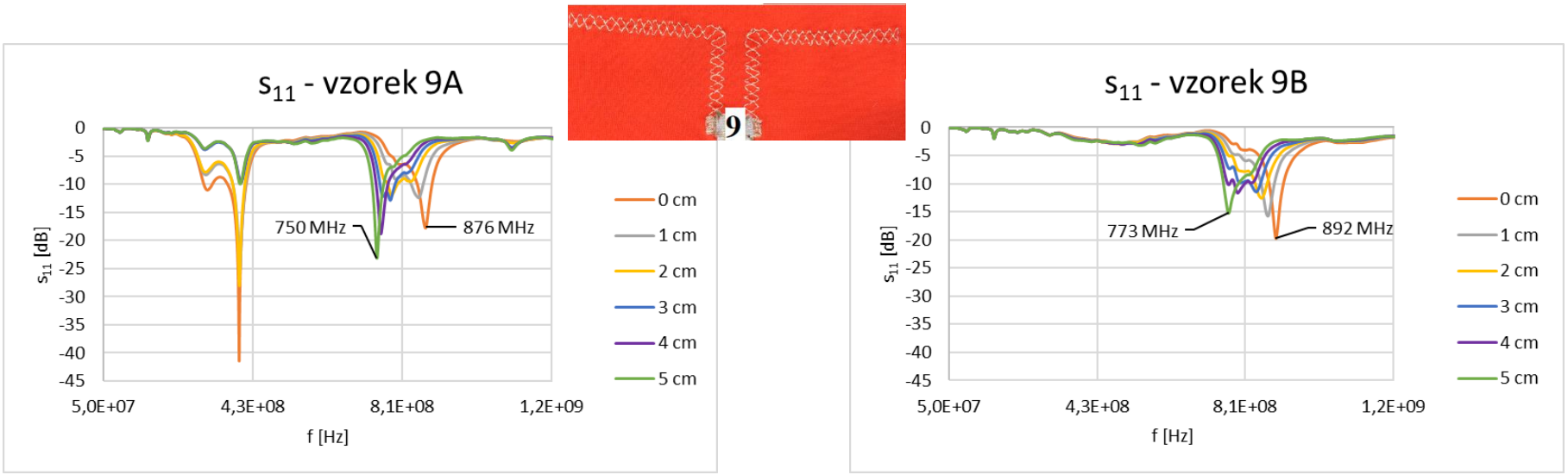
Obr. 128 Závislosti paralelní kapacity na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz



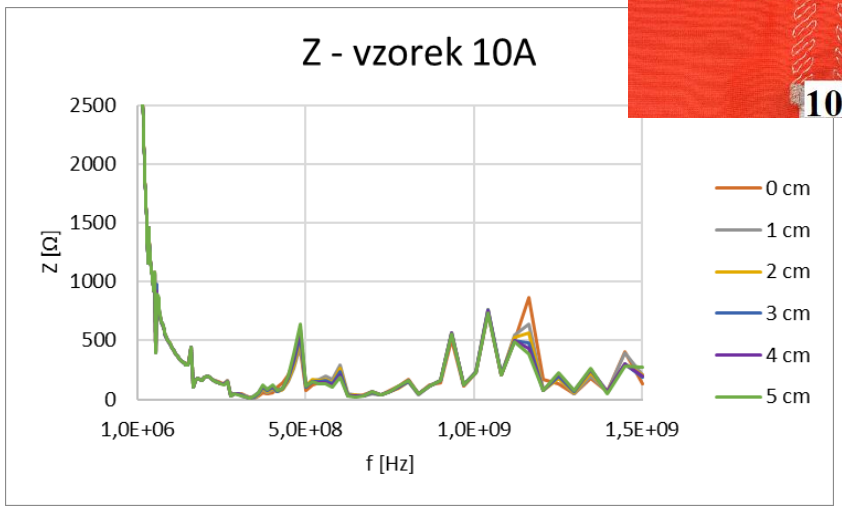
Obr. 129 Závislost impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 100 MHz – 600 MHz

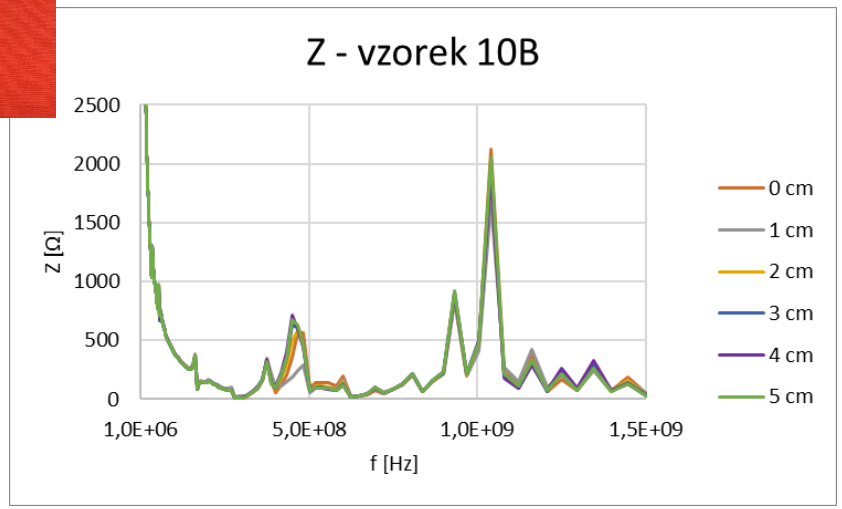


Obr. 130 Závislost impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 600 MHz – 1,2 GHz

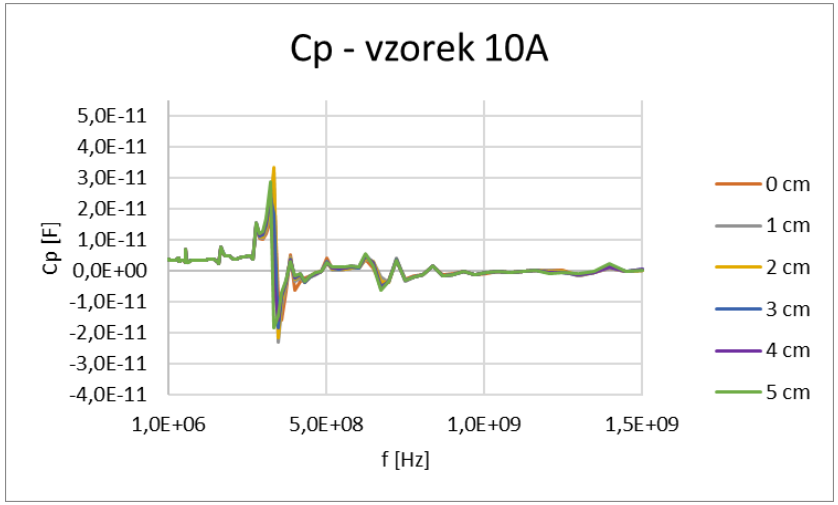


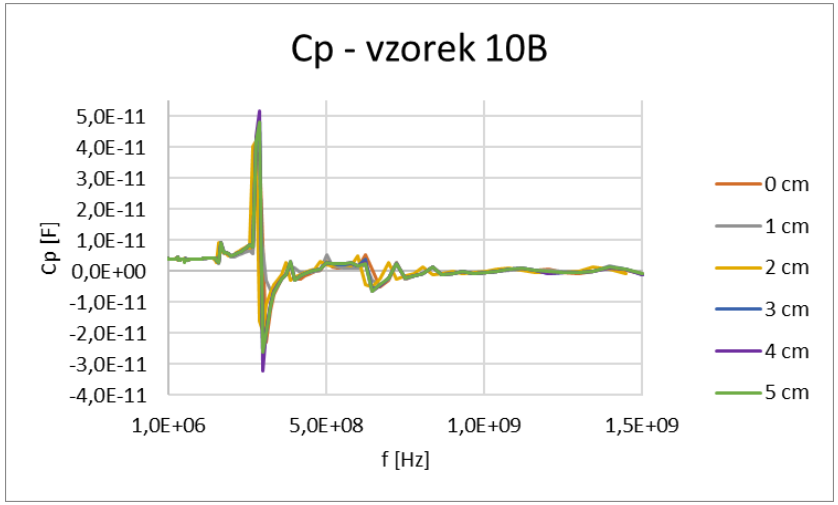
Obr. 131 Závislost s_{11} na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 1,2 GHz



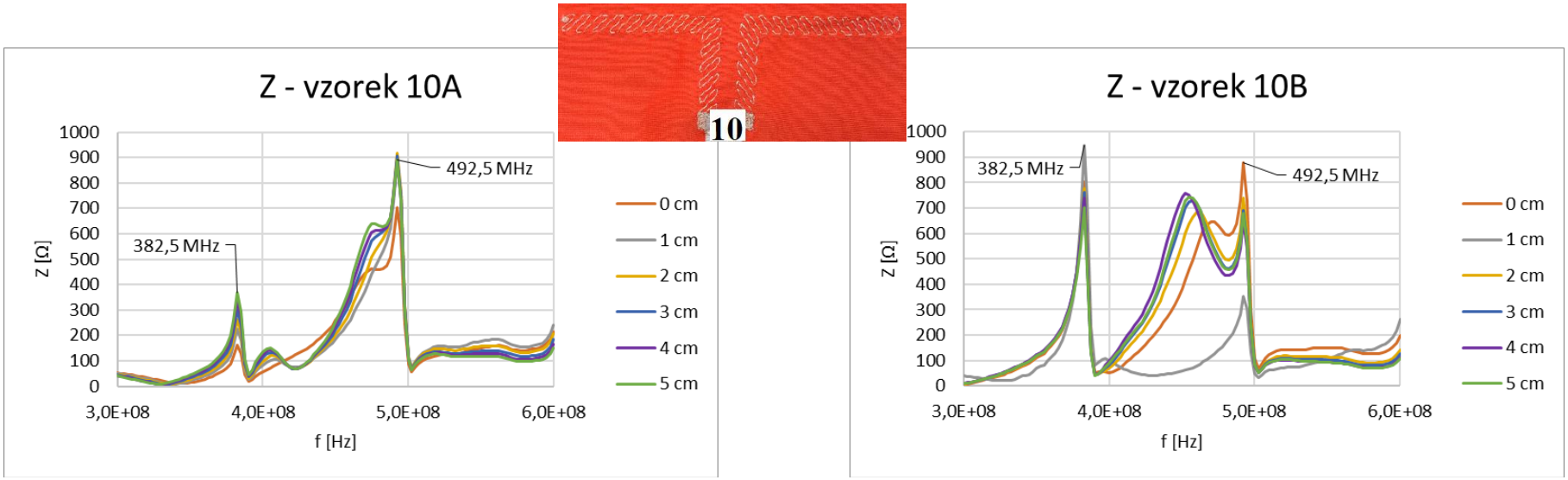


Obr. 132 Závislosti impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz

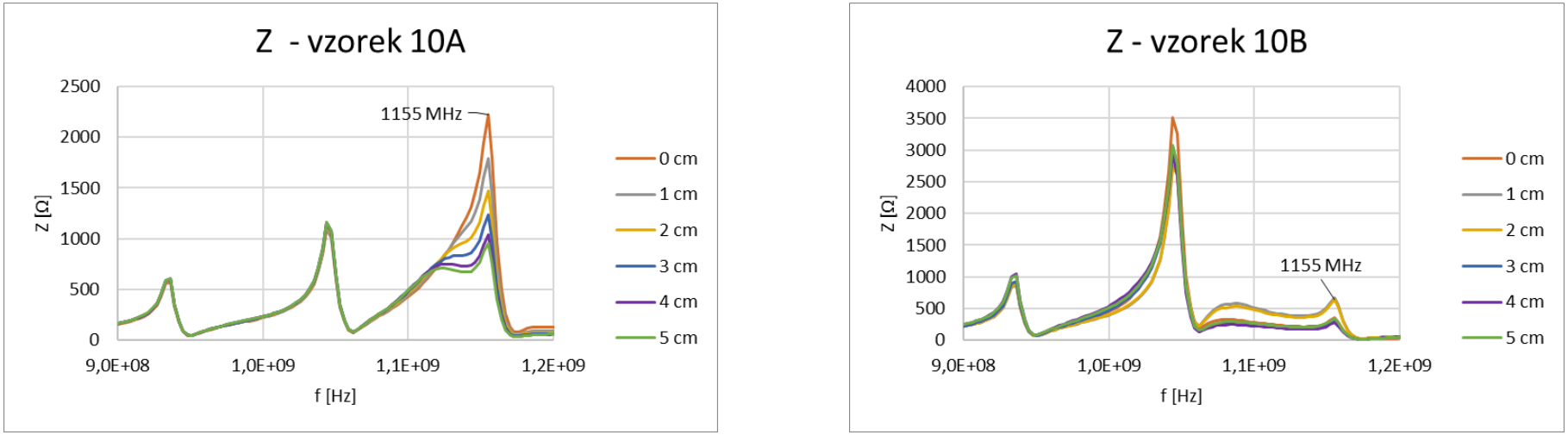




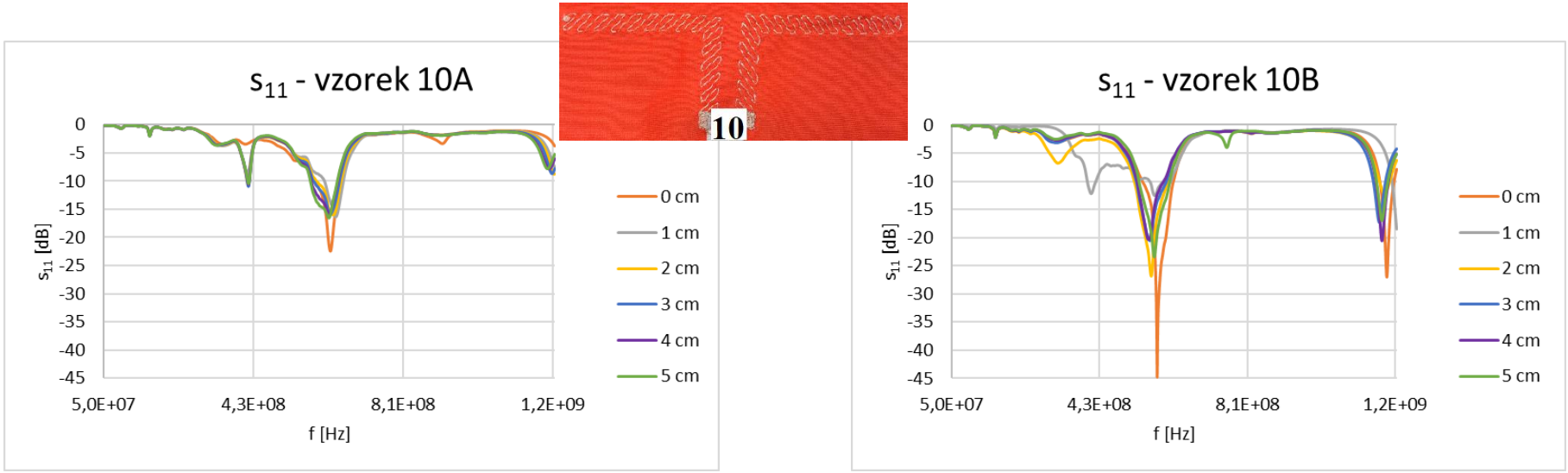
Obr. 133 Závislosti paralelní kapacity na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 1 MHz – 1,5 GHz



Obr. 134 Závislost impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 100 MHz – 600 MHz



Obr. 135 Závislost impedance na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 600 MHz – 1,2 GHz



Obr. 136 Závislost s_{11} na frekvenci pro různá natažení měřená v rozsahu 50 MHz – 1,2 GHz