

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta elektrotechnická

DISERTAČNÍ PRÁCE

Technologie planárních antén na textilní bázi



**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI**

Disertační práce

**k získání akademického titulu doktor v oboru
Elektronika**

Martin Pavec, Ing.

Technologie planárních antén na textilní bázi

Školitel: prof. Ing. Aleš, Hamáček, Ph.D.

Školitel-specialista: Ing. Radek Soukup, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně a použil jsem prameny, které cituji a uvádím v seznamu literatury. V předložené vědecké práci jsou použity obvyklé vědecké postupy.

V Plzni, 29.3.2023

.....
podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval své rodině za podporu během studií, prof. Aleši Hamáčkovi, Ph.D. a Ing. Radku Soukupovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat kolegům z KET, Ing. Karlu Pavcovi a Theodoru N. Kapetanakisovi Ph.D. z Hellenic Mediterranean University za spolupráci v oblasti textilních antén.

Prohlášení řešitele projektu

Prohlašuji, že v rámci projektu TAČR NoMaTex FV30051, ve kterém jsem byl členem řešitelského týmu, byla řešena část této předkládané disertační práce, zejména v rámci deklarovaných výstupů: V3 “Antény na textilní bázi vytvořené kombinovanou technologií” (funkční vzorek) a V5 “Antény na textilní bázi vytvořené kombinovanou technologií” (užitný vzor). Na obou výstupech jsem spoluautorem.

V Plzni, 29.3.2023

.....
podpis

Abstrakt

Předkládaná práce je zaměřena na technologii planárních antén na textilní bázi. První část analyzuje současný stav poznání. V druhé části jsou představeny cíle disertační práce. Třetí část je zaměřena na popis vybraných technologií pro realizaci textilních antén a jejich kontaktování. Čtvrtá část je věnována diskusi dosaženým výsledkům.

Klíčová slova

Textilní antény, technologie realizace textilních antén, technologie kontaktování, mechanické namáhání

Abstract

The presented work is focused on the technology of planar antennas on a textile basis. The first part analyzes the current state of knowledge. The objectives of the dissertation are presented in the second part. The third part is focused on the description of selected technologies for the realization of textile antennas and their contacting. The fourth part is devoted to the discussion of the achieved results.

Keywords

Textile antennas, technology of realization of textile antennas, contacting technology, mechanical stress

Obsah

1	ÚVOD.....	7
2	ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	8
2.1	FLEXIBILNÍ ELEKTRONIKA A SMART TEXTILIE	9
2.2	ALTERNATIVNÍ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE TEXTILNÍCH ANTÉN	11
2.3	DRUHY ANTÉN VHODNÝCH PRO TEXTILNÍ SUBSTRÁTY	18
3	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	25
4	TECHNOLOGIE REALIZACE A KONTAKTOVÁNÍ TEXTILNÍCH ANTÉN	26
4.1	TECHNOLOGIE REALIZACE TEXTILNÍCH ANTÉN	26
4.1.1	<i>Substrát.....</i>	26
4.1.2	<i>Technologie vyšívání</i>	28
4.1.3	<i>Šicí nitě.....</i>	29
4.1.4	<i>Technologie sítotisku</i>	32
4.1.5	<i>Termokompresní laminace</i>	33
4.2	TECHNOLOGIE KONTAKTOVÁNÍ	34
4.2.1	<i>Přišívání</i>	35
4.2.2	<i>Pájení.....</i>	36
4.2.3	<i>Lepení vodivým lepidlem</i>	37
4.2.4	<i>Odporové svařování</i>	38
4.2.5	<i>Ultrazvukové svařování</i>	39
4.3	METODY VYUŽITÉ K OVĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ ANTÉN A ZPŮSOBU KONTAKTOVÁNÍ	41
4.3.1	<i>Elektrické parametry</i>	41
4.3.2	<i>Mechanické namáhání antény a kontaktů</i>	46
4.3.3	<i>Klimatické testy</i>	49
5	Hlavní dosažené výsledky	50
5.1	NÁVRH A OVĚŘENÍ TECHNOLOGIE KONTAKTOVÁNÍ VYUŽITELNÉ PRO TEXTILNÍ ANTÉNY S OHLEDEM NA SPOLEHLIVOST A BEZPROBLÉMOVOU ÚDRŽBU.....	50
5.1.1	<i>Pájení.....</i>	51
5.1.2	<i>Přišívání</i>	55
5.1.3	<i>Odporové svařování</i>	58
5.1.4	<i>Ultrazvukové svařování</i>	61
5.1.5	<i>Lepení</i>	62
5.1.6	<i>Trhací zkouška.....</i>	63
5.1.7	<i>Porovnání způsobů kontaktování.....</i>	65
5.2	REALIZACE ANTÉN S VYUŽITÍM TEXTILNÍCH TECHNOLOGIÍ	66
5.2.1	<i>Realizované textilní antény.....</i>	67
5.2.2	<i>Vyšívané antény.....</i>	71
5.2.3	<i>Tištěné antény.....</i>	74
5.2.4	<i>Laminované antény.....</i>	75
5.2.5	<i>Hybridně vytvořené textilní antény.....</i>	76
5.2.6	<i>Porovnání textilních antén.....</i>	77
5.3	MĚŘENÍ A SIMULACE ČINITELE ODRAZU NA VSTUPU ANTÉNY VE VOLNÉM PROSTORU	80

5.4	ANALÝZA VLIVŮ MECHANICKÉHO NAMÁHÁNÍ A VLIVU PROSTŘEDÍ, ÚDRŽBY NA ELEKTRICKÉ PARAMETRY ANTÉNY	84
5.4.1	<i>Vliv mechanického namáhání na elektrické parametry antény</i>	84
5.4.2	<i>Vliv lidského těla na elektrické parametry antény</i>	87
5.4.3	<i>Prací testy</i>	88
5.4.4	<i>Vliv potu na elektrické parametry antény</i>	90
5.5	MĚŘENÍ SMĚROVÝCH CHARAKTERISTIK	91
5.6	SPECIFICKÁ MÍRA ABSORPCE	93
6	ZÁVĚR	96
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	100
	SEZNAM PUBLIKACÍ A VÝSTUPŮ STUDENTA VZTAHUJÍCÍCH SE K DISERTAČNÍ PRÁCI	103
	OSTATNÍ PUBLIKACE A VÝSTUPY STUDENTA	104

1 Úvod

Tato disertační práce zabývající se technologií planárních antén na textilní bázi je rozdělena do čtyř následujících kapitol – analýza současného stavu poznání, představení cílů disertační práce, popisu technologií realizace a kontaktování textilních antén a diskuzí hlavních dosažených výsledků.

V první části této práce nazvané analýza současného stavu poznání jsou definovány pojmy flexibilní elektronika a smart textilie. Vedle definice pojmů flexibilní elektronika a smart textilie jsou v této kapitole uvedeny alternativní výrobní technologie, které jsou vhodné (a již využívané) k realizaci antény na textilní bázi. V poslední podkapitole této části jsou představeny druhy antén, které jsou vhodné (s ohledem na stávající technologie) k realizaci flexibilních textilních antén.

Po představení cílů disertační práce následuje část představující technologie, které byly využity k realizaci a kontaktování textilních antén v této disertační práci. Tato kapitola je dále rozdělena na tři podkapitoly. V první podkapitole jsou popsány použité materiály (textilní substrát a vodivé šicí nitě) a technologie (vyšívání, sítotisk a termokompresí laminací). Druhá podkapitola je zaměřena za různé způsoby kontaktování textilních antén (přišívání, pájení, lepení vodivým lepidlem, odporové svařování a svařování ultrazvukem). V poslední kapitole jsou uvedeny metody, které byly využity k ověření elektrických parametrů realizovaných antén a způsobů kontaktování.

Poslední část této disertační práce se věnuje hlavním dosaženým výsledkům a je rozdělena do šesti samostatných podkapitol. První podkapitola je zaměřena na návrh a ověření technologie kontaktování využitelné pro textilní antény s ohledem na spolehlivost a bezproblémovou údržbu. Druhá podkapitola je zaměřena na způsoby, kterými byly v této práci realizovány textilní antény (vyšívané, tištěné, laminované a hybridně vytvořené textilní antény). Třetí podkapitola je venována měření a simulaci činitele odrazu. Čtvrtá podkapitola se zaměřuje na analýzu vlivů mechanického namáhání, lidského těla, pracích testů a vlivu lidského potu na elektrické parametry textilní antény. Poslední podkapitoly jsou věnovány měření směrových charakteristik a specifické míře absorpce. V závěru práce jsou diskutovány dosažené výsledky.

2 Analýza současného stavu poznání

Flexibilní elektronika a Smart textilie jsou dvě poměrně mladé oblasti v elektrotechnice. Jejich význam nicméně stále roste a předpokládá se rapidní vývoj v blízké budoucnosti. Ekonomický význam těchto dvou oblastí pro člověka předpokládají analytici ve stovkách miliard dolarů v příštích několika letech. Expanze Smart textilií již zasáhla do oblastí, jako jsou bezpečnostní složky (armáda, policie, hasiči), zdravotnictví, astronautika a sportovní oblečení. Ve velké části případů tyto aplikace obsahují množství senzorů (od měření teploty pod měření tepové frekvence), které potřebují komunikovat s řídicí jednotkou, případně získaná data odeslat do vyhodnocovacího zařízení nebo přímo v případě IoT odeslat přímo do cloudových služeb.

Kvůli potřebě komunikace řídicích jednotek (a přidružených vyhodnocovacích jednotek) ve výše zmíněných odvětvích se je zapotřebí celý systém doplnit o rozhraní schopné komunikace. Tyto rozhraní jsou majoritně konstruována pro bezdrátovou komunikaci, jelikož nutnost připojovat jednotku z důvodu získání dat je v praxi uživatelsky méně komfortní a časově náročné. Tyto komunikační systémy mohou být určeny pouze k odesílání dat, přijímání dat, ale také současně pro příjem i odesílání. Důležitým prvkem v tomto komunikačním řetězci je anténa. Výběr vhodného anténního prvku je závislý na druhu aplikace, pro kterou má být tento prvek použit. V některých aplikacích je výhodné použít anténní prvek vytvořený za pomoci konvenčních technologií a postupů (s ohledem na žádanou flexibilitu), tj. anténní prvek vyrobený na desce plošného spoje. Použitý substrát by měl splňovat požadované nároky na flexibilitu. Vodivá část může být vytvořena například fotolitograficky nebo tiskovými technologiemi (sítotisk, šablonový tisk atd.). Nevýhodami výroby anténních prvků pro Smart textilie za pomoci těchto technologií jsou například omezená ohebnost substrátu, riziko poškození vodivého materiálu (zejména při využití tiskových technologií), složitá až nemožná integrace na textil nebo velmi omezená pratelnost celého systému. S ohledem na výše zmíněné nevýhody, které přináší použití anténních prvků vyrobených konvenčními metodami, jsou textilní antény velice slibnou alternativou, která v budoucnu zažije veliký rozvoj jak v materiálovém a technologickém inženýrství, tak i v rozsahu oblastí, ve kterých budou anténní prvky na textilní bázi využívány. Textilní antény lze chápat jako anténní prvky, kde je textil použit jako substrát. Vodivá část je v tohoto typu antén integrována na povrch textilu, anebo přímo do textilu. Pro integraci na povrch textilního substrátu lze využít tiskové technologie. Technologie pro integraci lze rozdělit na

dvě skupiny, v první skupině se vodivý motiv vytvoří již při výrobě textilu, k tomu se využívají například technologie pletení a tkaní. Vodivý motiv ve druhé skupině není vytvářen již při výrobě, ale až do hotového substrátu. Tento způsob je s ohledem na možnosti použitého materiálu, více variabilní. Typickým zástupcem v této skupině je technologie vyšívání, kdy pro vyšívání motivu je použit vodivý materiál (vodivé mikrodrátky, hybridní šicí nitě atd.). Oblast nositelných, prateľných textilních antén je v porovnání s komerčně dostupnými anténami význačně méně prozkoumána.

2.1 Flexibilní elektronika a Smart textilie

Název flexibilní elektronika označuje technologie, které umožňují flexibilitu ve výrobním procesu a flexibilitu jako charakteristiku konečného produktu. Snadnost a rychlost výroby spolu s využitím ohebných substrátů zajišťují důležité výhody pro flexibilní elektroniku oproti konvenční elektronice postavené na tuhých podkladech. V dnešní době je možné nalézt příklady flexibilních elektronických technologií v ohebných plochých panelech, lékařských obrazových snímačích, fotovoltaických panelech nebo elektronickém papíru.

Používané materiály v oblasti flexibilní elektroniky

- Sklo
- Skleněná vlákna
- Látky
- Křemík
- Aramidy
- Polyesterová pryskyřice
- Epoxid
- Polyamidy
- Flexibilní filmy
- Měděné fólie
- A další

Smart textilie

Smart textilie jsou takové textilie, které reagují na vnější podmínky a podněty mechanického, tepelného, chemického, zářivého, elektrického a magnetického působení.

Dle funkčního hlediska a jejich reakcí na podněty můžeme rozdělit smart textilie na tři základní druhy. Pasivní, aktivní a velmi vysoce inteligentní [1].

Největší expanzi Smart textilií lze spatřit v aplikacích pro bezpečnostní složky například armádní, hasičské nebo policejní, dále se objevují v astronautice, zdravotnictví, sportovním oblečení a také v oblečení pro běžné nošení.

Pasivní smart textilie

Jde o první generaci smart textilií. Do této generace patří senzory vnějších podmínek a podnětů a reakce na podnět je jednosměrná, zjednodušeně řečeno tyto materiály pouze dokáží detekovat (například změna odporu nebo capacity). Jejich prostá činnost je řadí mezi pasivní smart textilie. Využití těchto textilií je například v měření teploty, tlaku, tahu nebo koncentrace některých látek jako jsou jedovaté plyny [1].

Aktivní smart textilie

Druhá generace již dokáže podnět detekovat a zareagovat na něj. Reakci zajišťují aktuátory, které dokážou na senzorem zjištěný podnět zareagovat. Aktuátor (mechanický pohon nebo jiný akční člen) reaguje sám anebo pomocí centrálně řízené jednotky celého systému. Aktivní smart textilie mohou mít například schopnosti měnit barvu (jev chameleona), mohou být odolné vůči vodě, mít tvarovou paměť, propouštět páru, vydávat nebo ukládat teplo, být inteligentně termoregulovatelné nebo získávat údaje o hodnotách záření, postupné uvolňování během nošení například pachů nebo léků [1].

Velmi vysoce inteligentní smart textilie

Třetí generace smart textilií je schopná nejen podnět zachytit, reagovat na něj, ale také přizpůsobit svojí funkci v závislosti na vnější podněty a podmínky. Celý proces řídí centrální počítač, který zde supluje funkci lidského mozku. To vše je možné jen díky spolupráci mnoha oborů, jako jsou farmacie, elektronika, informatika, mechanika, umělá inteligence a další technické obory. Výsledkem vývoje těchto velmi vysoce inteligentních textilií jsou obleky pro kosmonauty, piloty, chemiky, lékaře, hasiče a další. Třetí generaci lze rozdělit na tři vývojové generace. V první generaci jsou použity konvenční materiály, kdy jsou do textilií integrovány elektronické funkční bloky tzv. nositelná elektronika (wearable electronics). V případě druhé generace jsou inteligentní funkce začleněny přímo do textilie například textilní display senzory na textilní bázi nebo textroda (textilní elektroda) pro snímání EKG. Třetí generace počítá s integrováním mikroelektroniky přímo na textilní vlákno [1].

Konvenční způsoby výroby anténních prvků se (s ohledem na jejich využití v oblasti flexibilní elektroniky a zejména smart textilií) mohou i přes jejich značné výhody, jako snadná a levná výroba, dobré vyzářovací parametry, zisk atd., jevit jako nevhodné nebo méně uživatelsky přívětivé řešení. Na příkladu antény (Obr. 1) je vidět, že konvenčně

vyrobenou anténu (v podstatě nulová flexibilita a prateľnost) by bylo velmi komplikované integrovat pro použití v oblasti smart textilií. Oproti tomu, integrace anténního prvku, který má jako substrát použit textil, je značně jednodušší. Dalšími výhodami jsou vysoká úroveň flexibility, prodyšnost, prateľnost a uživatelský komfort (textilní anténní prvek může být takřka nerozeznatelný od výšivky nebo potisku na textilu – v některých případech může být integrován přímo do výšivky/potisku).



Obr. 1 - Konvenčně vyrobená anténa

2.2 Alternativní výrobní technologie textilních antén

Smart textilie jsou rychle rostoucí segment trhu, a proto je důležité se také věnovat oblastem, ve kterých je zapotřebí komunikačních systémů. Proto se kapitola 2.2 věnuje představení alternativních technologií, které mohou být využity pro výrobu antén na textilní bázi. Mezi hlavní přínosy textilních antén patří jejich umístění na / v oblečení tak, aby bylo dosaženo dobrých komunikačních vlastností (zvýšení dosahu vhodným umístěním – nedochází ke zastínění antény) a využití technologií běžně využívaných v textilním průmyslu, které vede ke rychlému a levnější výrobě (není potřeba pořizovat nové specializované zařízení).

Perspektivní oblast využití textilních antén

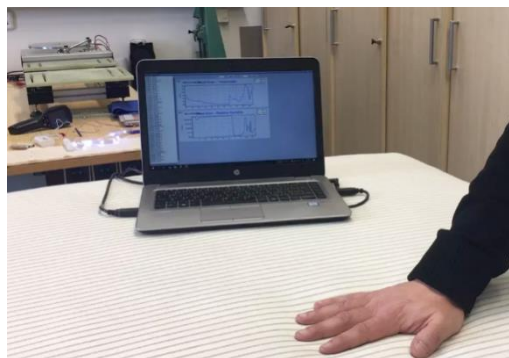
V této podkapitole jsou nastíněny oblasti, ve kterých je (nebo teprve bude) perspektivní využít textilní antény.

Oblečení zvyšující bezpečnost osob – do této kategorie lze zařadit oděvy určené pro záchranné bezpečnostní složky, tj. hasiče, policisty, záchranáře a příslušníky armády. Nejlepším příkladem může být chytrý hasičský záchranný oblek, který byl vyvinut na půdě elektrotechnické fakulty Západočeské univerzity ve spolupráci s průmyslovými partnery, viz Obr. 2. Tento oblek dokáže detekovat nebezpečné plyny, úroveň vlhkosti uvnitř obleku, teplotu uvnitř i z venku obleku, díky integrované GPS navigaci také polohu hasiče atd. Všechny tyto data jsou možná bezdrátově přenášet do externího zařízení.



Obr. 2 - Chytrý hasičský oblek při testování hasiči Plzeňského kraje

Zdravotnictví – využití textilních antén v oblasti zdravotnictví může být velmi různorodé. Od antén pro RFID čipy, pomocí kterých lze identifikovat pacienty, tak sledovat jejich pohyb, dále sledovat pohyb spotřebního textilního materiálu využívaného ve zdravotnictví jako například sledování pracích cyklů prostěradel a povlečení, až přenos dat chytrých prostěradel schopných detekovat přítomnost pacienta, teplotu nebo detekovat tekutiny přítomné na prostěradle. Na Obr. 3 je chytré prostěradlo vyvinuté FEL ZČU. Toto prostěradlo umožňuje dlouhodobě sledovat přítomnost pacienta a současně detekovat únik tekutin.



Obr. 3 - Chytré prostěradlo

Sportovní oblečení – je velmi rychle se rozvíjející segment smart textilií. Sportovní oblečení umožňuje sledovat řadu parametrů jako například teplotu, vlhkost, tepovou frekvenci, GPS lokaci atd. Sportovní tričko na Obr. 4 dokáže měřit tepovou frekvenci po připojení externí řídicí jednotky.



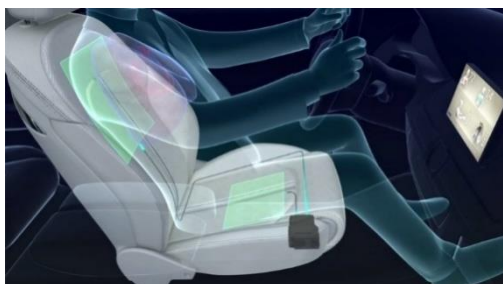
Obr. 4 - Triko měřící tepovou frekvenci [2]

Oblečení pro běžné nošení – spolu s rozvojem smart textilií a zvýšení jejich dostupnosti pro běžného člověka, se stávají smart textilie velmi populární a módní záležitostí. Pro příklad by mohl uživatel za pomoci svého mobilního telefonu ovládat vlastnosti svého oděvu přes bezdrátový komunikační kanál. Na Obr. 5 lze vidět dámské šaty schopné měnit svoji barvu (za pomoci LED čipů).



Obr. 5 - Šaty měnící barvu [2]

Automobilový průmysl – v automobilovém průmyslu mohou být textilní antény integrovány do sedadel nebo jiných textilních součástí automobilu. Autosedačka na Obr. 6 má schopnost detekovat zda je cestující unaven či ve stresu.



Obr. 6 - Autosedačka monitorující stres řidiče [2]

Logistika textilních výrobků – tato kategorie může zahrnovat jak sledování pohybu textilu při transportech, kontrolu pozice a množství textilu ve skladech, usnadnění procesu prodeje pomocí RFID tagů. Textilní RFID tag na Obr. 7 byl vyvinut společností Invergo pro sledování pracích cyklů v nemocničním prostředí.



Obr. 7 - Textilní RFID tag [2]

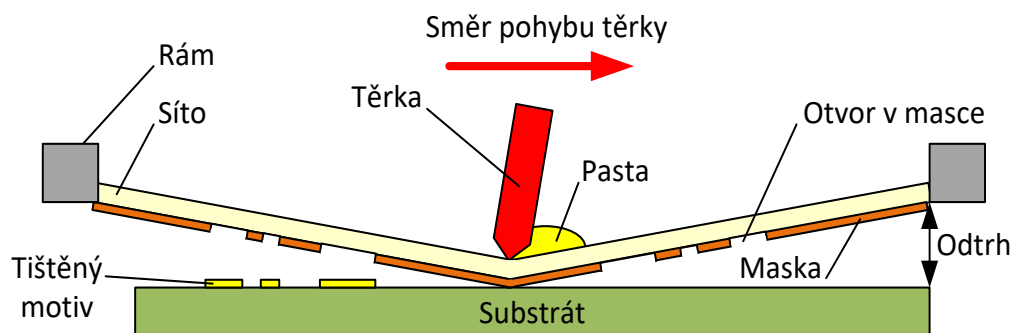
Následující podkapitoly jsou zaměřeny na představení alternativních technologií, za pomoci kterých je možné vytvořit flexibilní textilní anténní prvky.

Sítotisk/šablonový tisk

Sítotisk tvoří v elektronické výrobě velmi důležitou technologii využívanou k nanášení pájecích past, fotorezistů, potisků, vodivých inkoustů, lepidel atd. Zpočátku se sítotisková technologie používala pouze pro grafické aplikace (potisk reklamních předmětů, textilu atd.), později se začala používat i v elektronice a postupem času se stalo důležitou součástí elektrotechnické výroby. [3]

Princip technologie

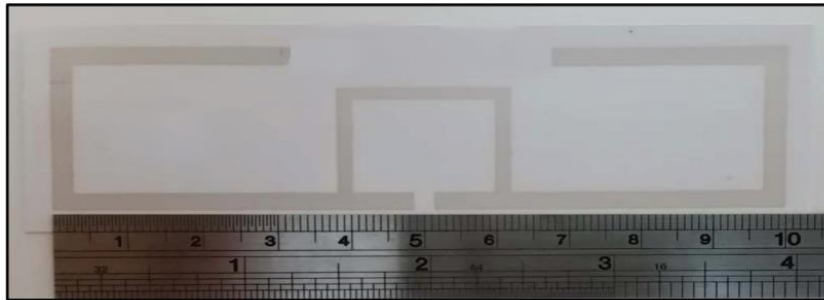
Princip sítotisku je znázorněn na Obr. 8. Pomocí třerky se skrze síto, na kterém je vytvořen motiv – maska, se protlačuje tisková pasta. Odlišnost šablonového tisku od sítotisku je ve využití kovové (či plastové) šablony s otvory místo síta s maskou.[3][4][5]



Obr. 8 - Princip sítotisku [6]

Antény vyrobené technologií sítotisku

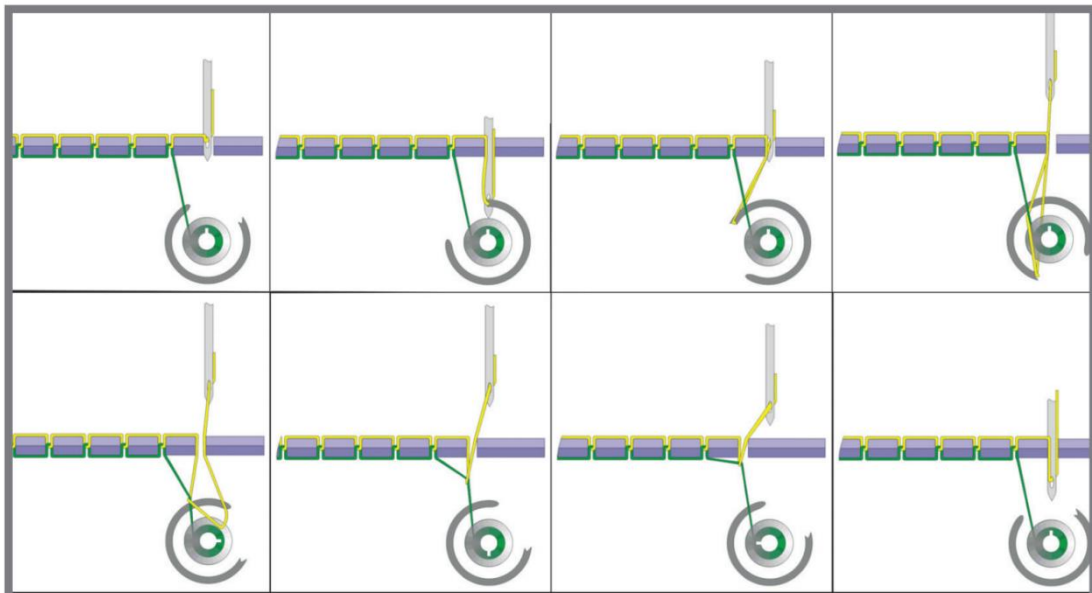
Na Obr. 9 je příklad antény pro RFID aplikace vyrobené technologií sítotisku. Tato anténa má rezonanci na frekvenci 915 MHz ($S_{11} = -32.279$ dB) a šířku pásma 28 MHz. [7]



Obr. 9 - Anténa vyrobená technologií sítotisku [7]

Princip technologie strojního šití/vyšívání

Na Obr. 10 je znázorněn princip šicího (vyšívacího) stroje. Lze zde vidět horní niť (znázorněna žlutě), dolní niť (znázorněna zeleně), jehlu, člunek a chapač. Jehla, kterou je provlečena horní niť, pronikne textilií. V nejnižší poloze jehly zachytí horní niť chapač a překříží ji se spodní nití. Po otočení chapače dojde k uvolnění nití a k utažení vytvářeného stehu.



Obr. 10 Princip funkce šicího stroje [8]

Antény vyrobené technologií šití nebo vyšívání

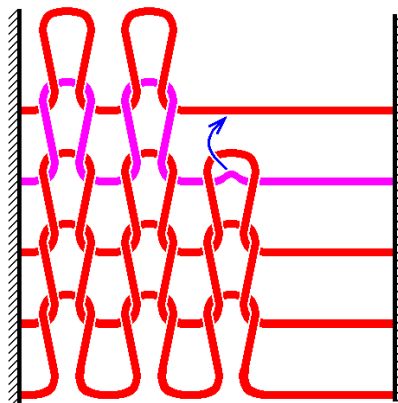
Anténa na Obr. 11 byla vyšita pomocí vlákna Amberstrand, které je vyrobeno z nejpevnější zylonových vláken. Vláknem Amberstrand má metalický povrch a polymerní jádro. Rezonanční frekvence byla naměřena na frekvenci 2025 MHz ($S_{11} = 16,15$ dB) a šířka pásma 413 MHz. [9]



Obr. 11 - Vyšitá anténa [9]

Princip technologie pletení

Princip technologie pletení (anglicky knitting), znázorněný na Obr. 12, je v utváření smyček z jedné nebo více nití. Základním prvkem pletení je očko, vazba vznikne propletením oček mezi sebou. Očka vytvořená nad sebou utvářejí sloupec a očka vytvořená vedle sebe řádek. Touto technologií lze vytvořit mnoho strukturálních a vizuálních designů.



Obr. 12 - Princip technologie pletení [10]

Antény vyrobené technologií pletení

První anténu vyrobenou pomocí technologie pletení představil Pekka Salonen v roce 2003 [11]. Jednalo se o pletenou anténu na bázi měděné příze, jako podklad byla v tomto případě použita vlna [12].

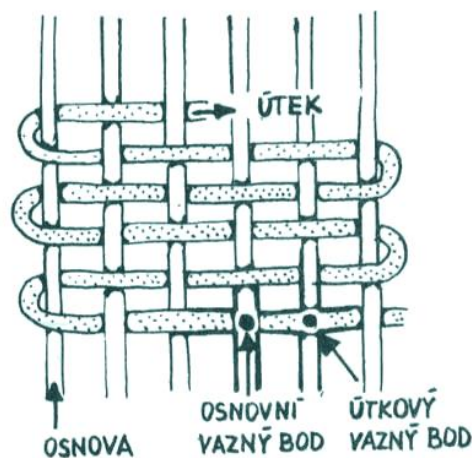


Obr. 13 - Pletená RFID anténa [12]

Obr. 13 znázorňuje pletenou anténu určenou pro RFID aplikace. Rezonanční frekvence f_c byla dosažena na 870 MHz se šířkou pásma 100 MHz a impedancí 50Ω , shodující se s požadavky RFID čipu [12].

Princip technologie tkaní

Základním principem tkaní je provazování dvou křížujících se kolmých soustav nití (viz Obr. 14). Podélné se nazývají osnova, příčné útek. Během tkaní se zvedají některé nitě osnovy, čímž vznikne prošlup, kterým se provléká útek. V dalším kroku se zvednou jiné nitě. Provazování se provádí podle daného systému, který se nazývá tkalcovská vazba. Existují její tři základní druhy – plátnová, keprová a atlasová [13].



Obr. 14 - Princip technologie tkaní [převzato a upraveno z 14]

Antény vyrobené s využitím technologie tkaní

První anténu vyrobenou s využitím technologie tkaní představil v roce 2003 Masariho Tanaka. Jednalo se o path (páskovou) anténu, jejíž zářič i zemní plocha byly vyrobeny ze tkané vodivé látky a poté všity do oblečení [11][12].

Na Obr. 15 je 3D tkaná anténa složená ze třech vrstev. Patchová anténa a zemní plocha je utkaná z vodivých vláken a substrát je utkán z nevodičých aramidových vláken. Všechny tyto tři vrstvy jsou spojeny pomocí aramidových vláken. Takto utkaná patchová anténa má šířku pásma 12,1 GHz a rezonanční frekvence byla dosažena při $S_{11} = -22$ dB na 8,5 GHz. [15]



Obr. 15 - Tkaná anténa [15]

2.3 Druhy antén vhodných pro textilní substráty

Anténa je zařízení, které je součástí rádiového komunikačního řetězce a má za úkol přenést informaci z místa A do místa B bezdrátově. Anténa může pracovat jako přijímací (transformuje energii elektromagnetických vln na vysokofrekvenční proud) nebo jako vysílací (transformuje vysokofrekvenční proud na elektromagnetické vlny). Dalšími částmi rádiového řetězce jsou přijímač a vysílač [16][17][18][19][20].

Energetická bilance elektromagnetického pole antény

Rovnice 1 představuje energetickou bilanci elektromagnetického pole antény. Pravá strana představuje vnucený výkon. Tento výkon má reálnou a imaginární část. Tento výkon se současně vyzáří směrem od antény do nekonečna v podobě vlny, a kvůli ztrátám v anténě se přemění na teplo.

$$|\operatorname{div} E \times H| + j\omega(\mu|H|^2 - \varepsilon|E|^2) + \sigma|E|^2 = -E \cdot J_{vn} \quad (1)$$

kde:

$|\operatorname{div} E \times H|$ – je Poyntingův vektor a představuje užitečnou práci, tj. tok výkonu plochou $[\text{W}/\text{m}^2]$,

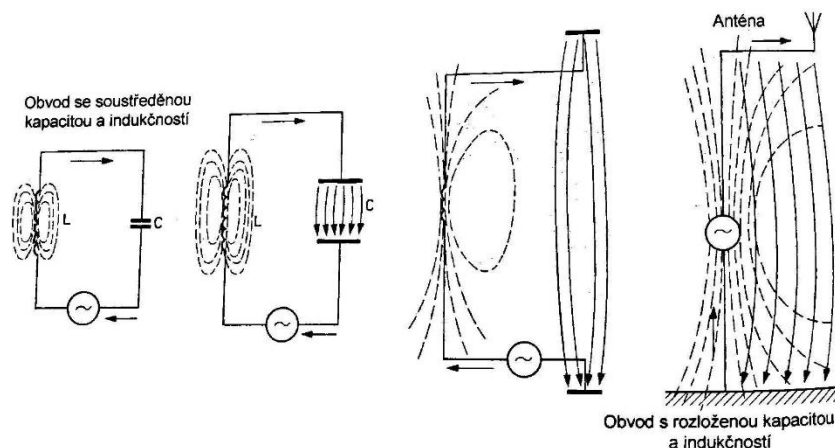
$j\omega(\mu|H|^2 - \varepsilon|E|^2)$ - je jalový výkon, ve stavu kdy je anténa v rezonanci, tato složka zmizí,

$\sigma|E|^2$ - jsou Jouleovy ztráty,

$-E \cdot J_{vn}$ - je vnucený výkon, tj. příkon [18]

Princip funkce antény

Jakýkoliv rezonanční obvod složený z induktoru a kapacitoru napájený vysokofrekvenční energií, může vytvořit elektromagnetické pole, viz Obr. 16. Takový obvod nicméně má malé vyzařovací schopnosti. V ohraničeném prostoru vzniká mezi deskami kapacitoru elektrické pole a v okolí induktoru vzniká magnetické pole. Pro zlepšení vyzařování je zapotřebí rozšířit pole kapacitoru zvětšením vzdálenosti mezi deskami kapacitoru. Tím dojde ke snížení kapacity, snížení lze kompenzovat zvětšením plochy desek kapacitoru. Velkoplošný kapacitor může mít podobu dvou vodičů, z nichž jeden je umístěn v dostatečné vzdálenosti od povrchu a druhý je na povrchu nebo s povrchem spojený. Tato konfigurace tvoří otevřený rezonanční obvod (dipól). Obvod se změní z uzavřeného na otevřený (stane se anténou), pokud je jeho délka násobkem vlnové délky, na kterou je obvod naladěn. Energetická bilance antény se zlepšuje, pokud se její délka blíží k $1/4\lambda$ nebo $1/2\lambda$ [16][17][18][19][20].



Obr. 16 Uzavřený a otevřený rezonanční obvod [21]

Lineární vs. planární (plošné) antény

Antény můžeme v závislosti na uspořádání elementárních zdrojů rozdělit na lineární a plošné antény.

- **Lineární antény** – jsou založeny na principu elektrického dipólu. Elementárními zdroji jsou zde tenké a krátké vodiče – elementární dipóly. Lineární antény jsou určeny pro nízké frekvence až po frekvence do GHz.
- **Planární antény** – jsou založeny na principu magnetického dipólu. Elementární zdroje jsou tvořeny elementárními ploškami. Mezi tyto antény

se řadí například reflektorové, trychtýřové nebo flíčkové antény. Planární antény se zpravidla používají pro frekvence od 3 GHz do 300 GHz.

Rádiové vlny

Rádiové vlny jsou část spektra elektromagnetických vln a využívají se k přenosu rádiového signálu. Z pohledu radiokomunikací se za rádiové vlny považují elektromagnetické vlny od 3 Hz do 300 GHz (jiné zdroje uvádějí frekvence od 10 Hz do 40 GHz). Rádiové vlny s frekvencemi od 3 GHz do 300 GHz se také nazývají mikrovlny. Rozdělení rádiových vln je znázorněno v Tabulka 1 [16][19].

Tabulka 1 - Rozdělení rádiových vln

Název	Zkratka	Název EN	Zkratka EN	Frekvence	Vlnová délka
Extrémně dlouhé vlny	EDV	Extremely low frequency waves	ELF	3 Hz - 3000 Hz	100000 km – 100 km
Velmi dlouhé vlny	VDV	Very low frequency waves	VLF	3 kHz - 30 kHz	100 km – 10 km
Dlouhé vlny	DV	Low frequency waves	LF	30 kHz - 300 kHz	10 km – 1 km
Střední vlny	SV	Medium Waves	MW	300 kHz - 3 MHz	1 km – 100 m
Krátké vlny	KV	Short Wave	SW	3 MHz - 30 MHz	100 m – 10 m
Velmi krátké vlny	VKV	Very High Frequency waves	VHF	30 MHz - 300 MHz	10 m – 1 m
Ultra krátké vlny	UKV	Ultra High Frequency waves	UHF	300 MHz - 3 GHz	1m – 1 dm
Super krátké vlny	SKV	Super high frequency waves	SHF	3 GHz - 30 GHz	10 cm – 1 cm
Extrémně krátké vlny	EKV	Extremely high frequency waves	EHF	30 GHz - 300 GHz	1 cm – 1 mm

ISM pásmo

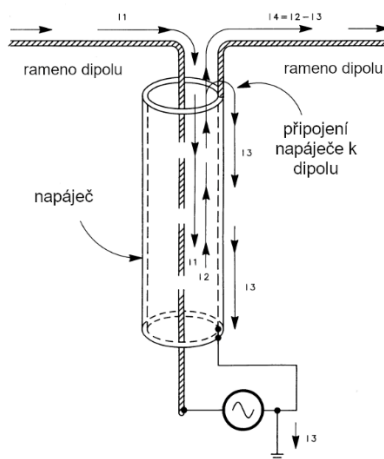
ISM je zkratka anglického spojení: „Industrial, scientific and medical radio bands“, což češtině znamená průmyslové, vědecké a lékařská rádiová pásma. Pro využívání těchto pásem, viz tabulka 2, označovaný jako volné pásma není při využívání certifikovaných zařízení nutné platit licenční poplatky. ISM pásma jsou tedy vhodná pro vědecké a další aplikace, jejich volné používání (při splnění daných podmínek) je vykoupeno rizikem vysoké úrovně rušení, jako příklad slouží pásmo využívané pro Wi-Fi 2,4 - 2,5 GHz [22].

Tabulka 2 - Rozdělení ISM pásma [22]

Frekvenční pásmo	Maximální dovolený výkon	Použití
6,765 - 6,795 MHz	42 dB μ A	pevné a mobilní služby
13,553 - 13,567 MHz	42 dB μ A	pevné a mobilní služby
26,957 - 27,283 MHz	42 dB μ A	občanské radiostanice
40,660 - 40,700 MHz	10mW	pevné a mobilní služby
138,200 - 138,450 MHz	10mW	radioamatérství
433,050 - 434,790 MHz	10mW	radioamatérství a radary
863 - 870 MHz / 902 - 928 MHz	25mW	radioamatérství a RFID
2,400 - 2,500 GHz	25mW	Wi-Fi, rádioamat. a mikrovlnné spoje
5,725 - 5,875 GHz	25mW	Wi-Fi, rádioamat. a mikrovlnné spoje
24,000 - 24,250 GHz	100mW	radioamatérství a radary
61,000 - 61,500 GHz	100mW	mikrovlnné spoje a radary
122,000 - 123,000 GHz	100mW	radioamatérství a mikrovlnné spoje
244,000 - 246,000 GHz	100mW	radioamatérství a radioastronomie

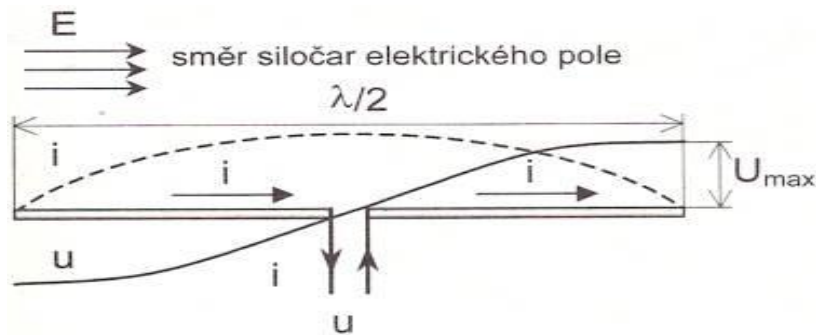
Anténa dipólová

Dipól je tvořen dvěma vodiči stejné délky ležící na stejné přímce a o celkové délce $\lambda/2$ (případně $\lambda/4$). Dipól jakožto symetrickou anténu je nutné napájet symetricky nebo asymetricky přes symetrizační člen balun. Pokud by se zanedbala symetrizace, dojde ke zkreslení vyzářovacího diagramu a vzniku proudů tekoucích stíněním koaxiálního kabelu viz Obr. 17. Nesymetrie může mít za následek (dle některých zdrojů) rušení příjmu rádiového a televizního signálu.



Obr. 17 - nesymetrické napájení dipólu – převzato a upraveno z [23]

V případě ideální symetrie byly proudy I_1 (tekoucí po vnějším povrchu středního vodiče) a I_4 (tekoucí stíněním) symetrické. Působením skinefektu, vzniknou proudy I_2 (tekoucí po vnitřním povrchu stínění) a I_3 (tekoucí po vnějším povrchu stínění). Proud I_4 je tedy vždy menší než proud I_2 a I_1 . Existence proudu I_3 znamená, že část přenášeného výkonu nebude vyzářena anténou, ale koaxiálním kabelem. Účelem symetrizace tedy je zamezení vzniku proudu I_3 , tak aby veškerý přenášený výkon byl vyzářen anténou.



Obr. 18 - Dipólová anténa [24]

Fraktální antény

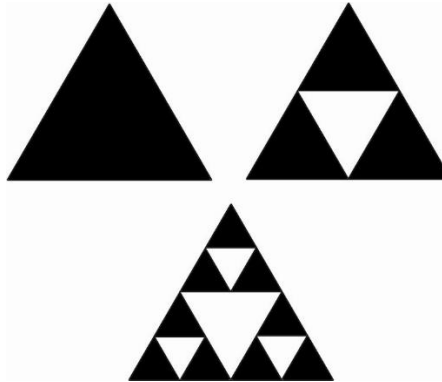
Dle Cambridžského slovníku je fraktál definován v matematice jako komplikovaný vzor vytvořený z jednoduchých opakovaných tvarů, které se zmenšují při každém opakování. V teorii lze provést n opakování, v praxi jsme limitováni technologiemi a materiály. V případě textilních antén je nejvíce omezující technologií vyšívání, za pomoci které lze provést pouze dvě opakování.

V oblasti antén se využívají dva základní druhy fraktálních prvků – Sierpiského trojúhelník a Van Kochova křivka.

Sierpiského trojúhelník – bowtie

Bowtie anténa má podobnou vyřazovací charakteristiku jako má dipólová anténa. Za účelem vytvoření vícepásmové antény byla využita teorie fraktálních obrazců, přesněji Sierpiského trojúhelník. Hlavní rozdíl mezi anténou vytvořenou s využitím teorie fraktálních obrazců a konvenční anténou je, že konvenční anténa je navržena tak aby pracovala v úzkém pásmu, typicky 10-40% okolo maxima hlavní frekvence a fraktální antény mohou fungovat jako vícepásmové se skoro stejnými rozměry ve srovnání s komerčně dostupnými anténami [2]. Sierpiského trojúhelník je pojmenován po polském matematikovi Wacławu Sierpińskemu, který tuto problematiku popsal v roce 1915. Sierpiského trojúhelník se jako fraktální anténa

používá hlavně pro své vícepásmové vlastnosti. Je složen z několika prvků, které se liší pouze v měřítku, přičemž každý prvek rezonuje na jiné frekvenci.



Obr. 19 - Sierpinského trojúhelník

Obr. 19 znázorňuje metodu pomocí, které je možné vytvořit bowtie fraktální anténu s využitím principu Sierpinského trojúhelníku. Níže jsou popsány tři základní kroky potřebné k vytvoření Sierpinského trojúhelníku.

1. V prvním kroku se vytvoří rovnoramenný trojúhelník.
2. V kroku číslo dvě se rozdělí původní trojúhelník na čtyři stejně velké trojúhelníky a dojde k odstranění prostředního trojúhelníku.
3. Ve třetím kroku se zopakuje krok číslo 2, tj. každý ze třech vytvořených trojúhelníků je rozdělen na čtyři stejně trojúhelníky a trojúhelník umístěný uprostřed je odstraněn.

Poslední krok je možné zopakovat více krát, nicméně při integraci na textil není opakování možné a to z důvodu technologického omezení procesu.

Matematicky lze tvorbu Sierpinského trojúhelníku popsat následující rovnicí:

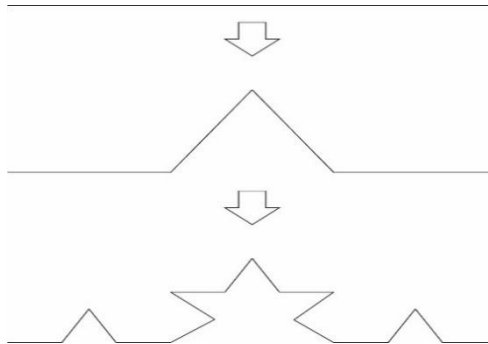
$$A_N = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^N (3/4)^i \quad (2)$$

kde N značí počet iterací a A_N je počet odstraněných trojúhelníků.

Van Kochova křivka – dipól

Obr. 20 ukazuje, jak vytvořit fraktální anténu z konvenční antény s využitím Van Kochovy křivky. Prvním krokem je rozdělit původní přímku (rameno) na tři stejné části a v prostřední části vytvořit trojúhelník (délka ramen je jedna třetina původní délky ramene). V dalších

krocích dochází k opakování prvního kroku, tj. rozřezání ramena na tři stejné části a v prostřední části vytvoření trojúhelníku. V našem případě, jsme skončili na druhém kroku a to z důvodu omezení, která přináší proces vyšívání.



Obr. 20 - Příklad tvorby fraktálu s využitím Van Kochovy křivky

Délka Van Kochovy křivky se s každým opakováním zvyšuje, přičemž délka jednotlivých segmentů se dělí 3 a počet jednotlivých segmentů se násobí 4.

Tabulka 3 - Rozložení Van Kochovy křivky

Počet opakování	Délka segmentů	Počet segmentů	Délka křivky
1	1	1	1,00
2	1/3	4	1,33
3	1/9	16	1,77
4	1/27	64	2,37
5	1/81	256	3,16

3 Cíle disertační práce

Cíle disertační práce jsou shrnuty v následujících bodech.

- 1. Realizace antén s využitím textilních technologií**
Realizace nositelných antén s využitím existujících technologií využívaných v textilním průmyslu, jako jsou sítotisk, vyšívání, laminace a jejich kombinací.
- 2. Návrh a ověření technologie kontaktování využitelné pro textilní antény s ohledem na spolehlivost a bezproblémovou údržbu**
Návrh a realizace technologie kontaktování s ohledem na údržbu textilních antén při zachování stabilních elektrických parametrů a využití jednoduchých principů kontaktování za použití stávajících technologií.
- 3. Analýza vlivu technologie výroby antény na finální elektrické parametry**
Rozbor vlivu rozdílných technologií využitých pro výrobu nositelné antény (např. komerčně dostupná anténa, sítotiskem vytvořená antény, vyšívaná anténa).
- 4. Analýza vlivů mechanického namáhání a vlivu prostředí, údržby na elektrické parametry antény**
Rozbor vlivu mechanické deformace, účinků lidského potu, pracích cyklů a vlivu lidského těla na elektrické parametry textilní antény.

4 Technologie realizace a kontaktování textilních antén

4.1 Technologie realizace textilních antén

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2, k výrobě antén na textilní bázi lze využít několik rozdílných technologií. V rámci této práce byly zvoleny takové technologie, které byly v danou chvíli dostupné a používané v textilním průmyslu a to s ohledem na následné využití poznatků této práce v daném odvětví. První zvolenou technologií bylo vyšívání, které je dobře známé a často používané v textilním průmyslu. Další použitou a také dobře známou technologií byl sítotisk. Poslední technologií, která je rovněž využívána v textilním průmyslu, byla termokompresní laminace.

4.1.1 Substrát

Zjištění základních parametrů textilních substrátů je důležitým pro simulaci a návrh anténního prvku na textilní bázi. Nejdůležitějším ze zkoumaných parametrů je relativní permitivita ϵ_r zvoleného materiálu, který má být použit jako textilní substrát. Dielektrické vlastnosti textilního materiálu jsou závislé na frekvenci, teplotě prostředí, drsnosti povrchu textilního materiálu, vlhkosti, čistotě a homogenitě textilního materiálu.

Relativní permitivita materiálu

Permitivita je komplexní veličinou definovanou jako:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon_r' - j \epsilon_r'') \quad (3)$$

kde:

ϵ_0 je permitivita vakua (8.854×10^{-12} F/m),

ϵ_r je relativní permitivita.

Reálná část permitivity ϵ_r' udává, kolik energie dodané z externího zdroje se uloží v materiálu. Imaginární část permitivity ϵ_r'' , se nazývá ztrátový činitel a udává, jak ztrátový daný materiál je.

Z komplexní permitivity můžeme vyjádřit tangentu ztrátového úhlu:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (4)$$

Povrchový odpor a rezistivita vodivých textilií

Textilní látky jsou planárními materiály a jejich elektrické vlastnosti mohou být charakterizovány pomocí povrchové rezistivity. Povrchový odpor je poměr stejnosměrného napětí a proudu protékajícímu mezi elektrodami, které jsou v kontaktu s testovaným materiálem, jednotkou povrchového odporu je Ω . Povrchová rezistivita je poměr intenzity stejnosměrného elektrického pole a proudové hustoty v povrchové vrstvě materiálu, jednotkou povrchové rezistivity je Ω/sq (Ω/\square). Pro textilní antény je důležité, aby hodnota povrchového odporu byla co nejmenší a konstantní po celé ploše antény. Nekonstantní rozložení povrchového odporu vede k narušení kontinuity protékání proudu. Ke změně rozložení povrchového odporu v případě textilní antény dojde při ohybu či jiné mechanické deformaci [25][26][27].

Úroveň vlhkosti v textilním substrátu

Jelikož textilní substráty absorbují vlhkost (pokud nemají speciální povrchovou úpravu) je důležité se zabývat úrovní vlhkosti v textilním substrátu, jelikož absorbováním vody textilní substrát změní své elektrické parametry, což vede k rapidním změnám chování textilní antény. Molekuly vody může textilní substrát přijmout jak ze vzduchu, tak z dalších zdrojů (děšť, pot atd.). Dielektrická konstanta vody $\epsilon_r = 78$, při teplotě 25 °C a frekvenci 2,45 GHz. Dielektrická konstanta vody je více stabilní než dielektrická konstanta textilních substrátů, kde (jak literatura udává) se ϵ_r pohybuje mezi hodnotou 1 a 2 a to díky rozdílné porositě materiálu. Absorbování vody do struktury substrátu tedy vede k rapidní změně elektromagnetických vlastností látky, nárůst dielektrické konstanty ϵ_r a ztát. Pro zajištění stabilních parametrů textilní antény je důležité snížit schopnosti textilního substrátu absorbovat molekuly vody [25][26][27].

Jako substrát pro výrobu textilních antén v této práci byla použita meta-aramidová textilie Dupont Nomex, která je složena z 93 % z Nomexu, 5 % Kevlaru a 2 % uhlíku. Relativní dielektrická permitivita ϵ_r pro tuto textilií je roven 3,5. Povrchová rezistivita byla $10^{12} \Omega/\square$. $\text{Tan}\delta = 0,006$. Nomex je nehořlavá textilie běžně používaná v petrochemickém průmyslu.

4.1.2 Technologie vyšívání

Technologii vyšívání (šití, obšívání) lze rozdělit na ruční a strojové. Ruční, historicky více využívané, je nahrazované vyšíváním strojním. Výhodou strojního vyšívání je rychlost, přesnost, možnost počítačového návrhu a opakovatelnost oproti vyšívání ručnímu. Dříve se vyšívání používalo pouze k vytvoření dekorativních vzorů na textilu. V dnešní době je díky technologickému rozvoji možné využít vyšívání i pro účely elektroniky.

K realizaci vyšívání antén byl použit šicí stroj Bernina QE750 od švýcarského výrobce, ke kterému byl připojen vyšívací modul (dále vyšívací stroj), který je podobným CNC strojům. Celá sestava je zobrazena na Obr. 21. Tento vyšívací stroj umí vytvořit 837 různých typů stehů a vyšít znaky z 6-ti abeced. Vyšívací stroj Bernina je počítačově řízený vyšívací stroj a pro řízení procesu využívá vlastní program Bernina Designer Plus. Motiv vyšívané antény lze navrhnout přímo v tomto programu, nebo motiv navrhnout například v licencovaném programu CorelDraw, nebo volně šiřitelném Inkscape a následně nahrát do programu Bernina Designer Plus.



Obr. 21 - a) šicí stroj Bernina QE750, b) vyšívací modul

Nejdůležitějším prvkem ve vyšívacím procesu jsou šicí / vyšívací nitě. Z hlediska použití nitě v běžném šicím procesu můžeme rozdělit nitě na spodní (podkladovou) a horní niť, která je protažena jehlou. S ohledem na využití technologie šití a vyšívání v elektrotechnice, lze dále rozdělit nitě na nevodivé a vodivé.

Princip funkce vyšívacího stroje je popsán v kapitole 2.20. Celý tento proces probíhá velice rychle (špička jehly se během šití/vyšívání může ohřát na přibližně 200 °C), s ohledem na využití vodivých šicích nití se jedná o velmi mechanicky náročný proces, kdy může snadno dojít k přetržení šicí nitě.

Mezi výhody vyšívání patří, že vodivé příze nebo nitě mohou být vyšívány v jedné nebo více vrstvách látky, nebo mohou být vyšívány na různé typy látek v jednom kroku. Dále je ve srovnání s dalšími technologiemi flexibilnější, po deformaci vyšitého motive (například ohnutí) a navrácení do původního stavu se elektrické parametry vrátí na původní hodnoty. Vyšité vzory jsou také mnohem mechanicky odolnější, například oproti sítotisku. Velkou výhodou vyšívání (za předpokladu využití hybridních šicích nití) je možnost pájet přímo na nitě, což zjednodušuje a zrychluje proces kontaktování. V obecné rovině je výhodou také přímá integrace vyšívaných prvků do textilních substrátů, nehrozí tedy jejich odpadnutí.

Nevýhody vyšívání spočívají v délce trvání vyšívacího procesu, který může být řádově v desítkách minut v závislosti na velikosti a složitosti výšivky. Další nevýhodou vyšívání je velká spotřeba vyšívacího materiálu, kde jsou potřeba samostatné nitě jak pro spodní, tak vrchní vrstvu a jejich spotřeba může být v desítkách metrů pro každou vrstvu (opět v závislosti na velikosti a hustotě výšivky). Při vyšívání také nelze dosáhnout tak vysoké přesnosti v porovnání například se sítotiskem. Výsledkem vyšívacího procesu je nehomogenní vrstva motivu, což komplikuje například simulace. Při zvolení příliš vysoké rychlosti vyšívacího procesu dochází k trhání šicí nitě. Kritickým místem vyšívacího stroje je jehla, kde dochází například ke zmíněnému trhání nití. Jehla je vyrobena z kovu a při šití dochází často k jejímu zlomení. V závislosti na materiálu, který se má prošívát je zapotřebí zvolit vhodný typ jehly.

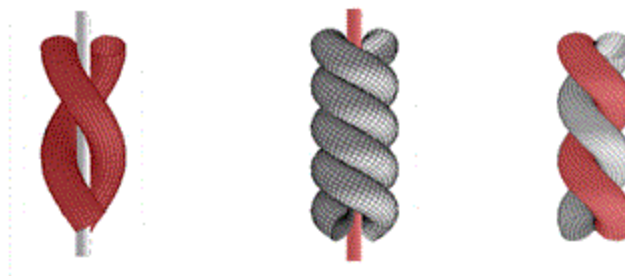
4.1.3 Šicí nitě

Nevodivé šicí nitě

Nevodivé šicí nitě se používají například pro oddělení vodivých motivů, jako spodní (nebo horní) nit v šicím procesu, některá speciální vlákna mají vysokou tepelnou vodivost a jsou tedy vhodná k elektrickému a tepelnému oddělení vodivých cest.

Vodivé šicí nitě

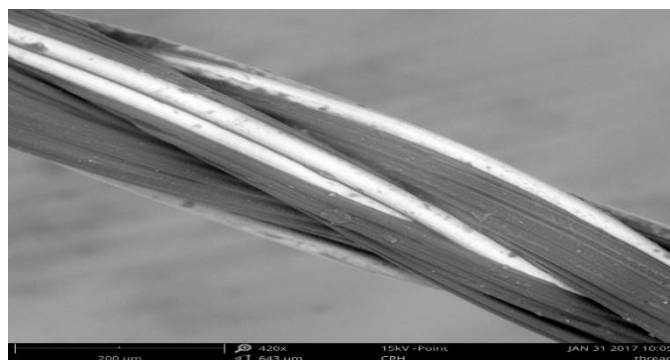
Vodivé šicí nitě mohou být vyrobeny několika způsoby. Jedním z těchto způsobů je nanesení vodivého polymeru na nevodivé vlákno. Vodivý polymer obsahuje velké množství vodivých částic (např. stříbro, mosaz nebo uhlík). Další způsob je použití k výrobě šicí nití pouze přirozeně vodivých materiálů, jako je například stříbro. Použití kombinace vodivých a nevodivých vláken a jejich následného zapletení do sebe, tím vznikne hybridní šicí nitě.



Obr. 22 - Struktura hybridní šicí nitě [28]

V této práci byly použity různé typy hybridních šicí nití, tyto nitě se liší svými vlastnostmi a dle použitého elektricky vodivého materiálu je lze rozdělit na nitě, kde byla použita mosaz a postříbřená měď. Použité hybridní šicí nitě byly vyvinuty na FEL ZČU ve spolupráci s VÚB a.s. Ústí nad Orlicí.

Mosaz – v této práci byla použita hybridní mosazná šití nitě vzor 25A. Tato nitě obsahuje 31 % polyesterových vláken a 69 % vodivého materiálu, který je složen z 8 mosazných mikrodrátků o průměru 30 μm . Elektrický odpor této hybridní šicí nitě dosahuje 8,9 Ω/m . Na Obr. 23 je detailně zobrazena tato hybridní šicí nitě. Tmavě jsou zobrazena polyesterová vlákna a světle mosazné mikrodrátky. Pružnost celé nitě zajišťují polyesterová vlákna, tuhost naopak mosazné mikrodrátky. Parametry hybridních šicích nití jsou zobrazeny v Tabulka 4.



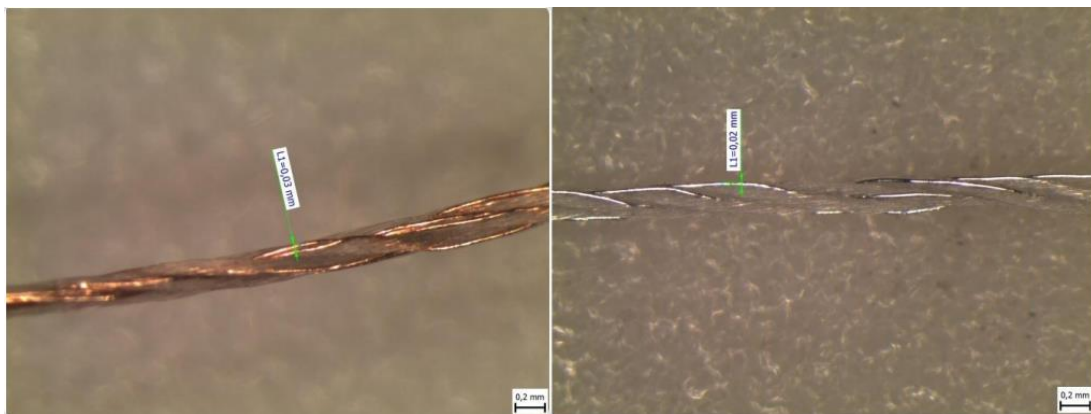
Obr. 23 - Detail mosazné hybridní šicí nitě

Postříbřená měď - jak již název napovídá, elektricky vodivé mikrodrátky jsou vyrobeny z postříbřené mědi. V této práci byly použity dva typy hybridních šicích nití s obsahem mikrodrátků z postříbřené mědi.

První použitou nití s obsahem postříbřené mědi byla nit' vzor číslo 53. Tato nit' je složena z 47 % polyesterových vláken a 53 % vodivého materiálu. Vodivý materiál tvoří 4 mikrodrátky z postříbřené mědi o průměru 30 μm . Elektrický odpor této nitě je 6,5 Ω/m a je tedy nižší než u nitě 25A s mosaznými mikrodrátky.

Hybridní šicí nit' vzor 74 byla použita jako další nit' s obsahem postříbřené mědi. Tato nit' má nejmenší obsah polyesterových vláken – 23,5 %. Zbýlých 76,5 % tvoří 8 mikrodrátků z postříbřené mědi o průměru 30 μm . Elektrický odpor této nitě je nejnižší z vybraných a dosahuje hodnoty 2,85 Ω/m .

Na Obr. 24 je vidět porovnání hybridních šicích nití obsahující mosaz (vzor 25A) a postříbřenou měď (vzor 53).



Obr. 24 – Hybridní šicí nit' – mosaz a postříbřená měď

Tabulka 4 - Parametry hybridní mosazné šicí nitě

Vodivý materiál	Vzor	Lineární odpor (nominalní hodnota @ 20°C) [$\Omega \cdot m^{-1}$]	Průměr mosazných mikrodrátků [μm]	Pevnost (Pevnost textilu) cN·tex-1	Natažitelnost %	Optický průměr [mm]
Mosaz	25A	8,9	30	21,82	10,16	0,22
Postříbřená měď	53	6,5	30	31,59	14,08	0,23
Postříbřená měď	74	2,85	30	21,85	13,27	0,24

4.1.4 Technologie sítotisku

Technologie sítotisku je dobře známou (velmi rozšířená pro tisk motivů na textil nebo papír) a také dobře dostupnou technologií, která se používá i v oblasti elektrotechniky a to zejména pro tisk na plošné spoje. Princip technologie sítotisku je popsán v kapitole 0.

Mezi hlavní výhody použití technologie sítotisku pro výrobu textilních antén patří například možnost tisku motivu o velmi malých rozměrech nebo rychlosti tisku. Další výhodou je množství vodivých i nevodivých inkoustů / past, vyvinutých přímo pro sítotiskovou technologii. Výhodou využití technologie sítotisku pro výrobu textilní antény je homogenní natištěná vrstva se stabilními a opakovatelnými parametry, díky které lze tištěnou anténu snáze simulovat. Taková anténa se přibližuje anténě vyrobené na flexibilním plošném spoji.

Mezi hlavní nevýhody použití technologie sítotisku pro výrobu antén patří nasákavost substrátu, kdy dochází k prosáknutí tištěného inkoustu / pasty do struktury textilie, případně až na druhou stranu textilu. Tento jev zvyšuje spotřebu tištěného materiálu a zhoršení podmínek pro simulace. Další nevýhodou je, že pro vytvoření homogenní vrstvy je zapotřebí motiv vytisknout ve více než jedné vrstvě. S ohledem na životní cyklus textilní antény se jeví největší nevýhodou omezené možnosti mechanického namáhání, kdy při větším namáhání dojde k přerušení tištěného motivu.



Obr. 25 - Poloautomatický sítotiskový stroj EKRA E2 [30]

Pro výrobu tištěných textilních antén byl použit poloautomatický sítotiskový stroj EKRA E2. EKRA E2 byla navržena pro tisk široké škály flexibilních a tuhých materiálů pro malé až střední objemy výroby nebo pro účely výzkumu a vývoje. Maximální rozměry tištěného motivu jsou 370 x 450 mm. Materiály, na které je možné tisknout pomocí EKRA E2, mohou mít tloušťku od 0,8 do 6 mm. Přesnost vyrovnání tisku je $\pm 10 \mu\text{m}$. Díky motoru pohánějícímu tiskový stůl lze tisk rychle opakovat. [30]

4.1.5 Termokompresní laminace

Technologie termokompresní laminace se dříve v elektronice používaly spíše pro laminaci dielektrických materiálů na plošné spoje. S rozvojem materiálů a technologií lze v dnešní době využít technologie termokompresní laminace i k nalaminování vodivých cest. K přenesení se využívá termokompresní lisy běžně využívané v textilním odvětví. Na Obr. 26 je zobrazen použitý lis, který byl použit v rámci této práce. Tento lis o výkonu 1000 W dokáže vyvinout tlak maximálně 2,5 bar, rozmezí nastavitelných teplot je od 0 do 299 °C.



Obr. 26 – termokompresní lis

Vodivý motiv vhodný k přenesení pomocí termokompresního lisu, lze vyrobit několika způsoby. Jeden ze způsobů využívá tiskové technologie jako je sítotisk, dispenzing, InkJet a nebo AerosolJet. Na přenosový materiál se natiskne požadovaný motiv, poté se natisknutý motiv umístí na textilní substrát a takto se vloží do lisu. Při definované teplotě, tlaku a času dojde k nanesení materiálu na textilní substrát. Tento postup je díky využití technologií jako je sítotisk méně časově náročný a zároveň poskytuje ochranu proti mechanickému poškození, neboť tištěný motiv se aplikuje na textil vodivou stranou na textilní substrát a přenosový materiál tvoří krycí vrstvu.

Další způsob přenesení vodivého materiálu nevyužívá tiskové technologie, neboť vodivý motiv je pomocí řezacího plotru vyříznut z vodivé fólie či textilie [A10]. Mezi vodivý materiál a textilní substrát se vloží přenosová vrstva, zpravidla tvořená polyamidovými částmi, a opět za definované teploty, tlaku a času dojde k přenesení. Tento postup zanechává vodivou část přístupnou kontaktování, pokud by byla nezbytná ochrana proti mechanickému poškození, lze přes tento motiv nanést nevodivou flexibilní fólii, například Strechflex. Tato fólie má tloušťku 90 μm , je vyrobena PU (Polyuretan), splňuje Oeko-Tex standard (udává, že při výrobě textilie nebyla použita zdraví nebezpečná chemie) a je možné ji prát v pračce na 60 °C.

Mezi výhody použití této technologie patří zvýšená mechanická odolnost a pratelnost. Při použití flexibilních materiálů i zvýšená flexibilita. Nevýhodami termokompresní laminace je komplikovanější kontaktování nebo nutnost zahřátí velké plochy substrátu na vysoké teploty, které mohou poškodit některé druhy textilních substrátů nebo okolí přenášeného motivu.

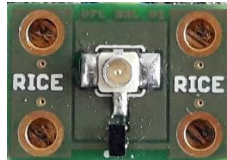
4.2 Technologie kontaktování

Aby bylo možné změřit elektrické parametry antén na textilní bázi je nutné zajistit spojení s měřicím zařízením. V případě pouhého změření elektrických parametrů je situace jednodušší jelikož lze využít speciální měřicí sondy. Komplikovanější situace nastává v případě, kdy má být textilní anténa provozovaná jako součást komunikačního zařízení, zde již připojení pomocí měřicích sond nelze realizovat. V zásadě existují dvě možnosti, připojit anténu přímo na k tomu určené vývody komunikačního zařízení, nebo použít ke spojení

koaxiální kabel. V zásadě tedy jde o spojení desky plošných spojů, pohyblivého přívodu či jejich kombinaci s textilní anténou.

Mezičlánek – interposer

Mezičlánek tzv. interposer je plošný spoj malých rozměrů (tak aby neomezoval výhodné vlastnosti textilních antén), který obsahuje koaxiální konektor (případně další součástky) a otvory za pomoci kterých se provádí vodivé spojení s textilní anténou.



Obr. 27 - Interposer s UFL konektorem

4.2.1 Přišívání

Prvním způsobem, který se zdá být vhodným pro kontaktování vyšívacích antén je přišívání. Přišití koaxiálního kabelu (Obr. 28) k textilní anténě je sice technicky proveditelné, nicméně takto vytvořený kontakt nemá dobrou mechanickou odolnost, spojení není stabilně vodivé a je velmi těžko opakovatelný.



Obr. 28 - přišitý koaxiální kabel

Kvalitnějšího kontaktu lze dosáhnout použitím mezičlátku, na který se osadí například UFL konektor a k tomu se následně připojí koaxiální kabel. Na Obr. 29 je vidět mezičlánek ručně přišitý mosaznou hybridní vodivou šicí nití (viz 4.1.3) k vyšívací anténě. Tento kontakt je odolný vůči mechanickému odtržení, nicméně nevýhodou je opět problematická opakovatelnost kdy je prakticky nemožné ručně přišít dva kontakty stejným způsobem (místo spojení, síla utahení stehu atd), strojní přišívání by vyžadovalo vysokou přesnost sesazení, větší rozměry plošného spoje a bylo by časově náročnější než metoda ručního přišívání. Výhodou strojního přišívání by bylo zajištění stabilnějších parametrů.



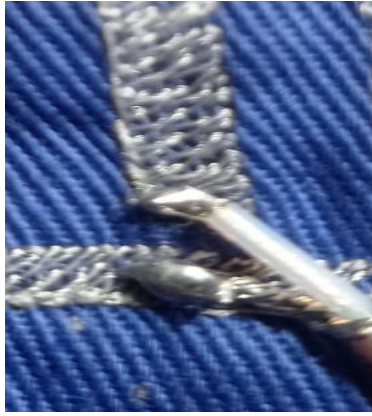
Obr. 29 - plošný spoj s UFL konektorem přišitý k anténě

Využit přišívání lze i pro antény, které byly vyrobeny s využitím tiskařských technologií, nicméně v místě průchodu jehly dojde k poškození struktury vodivé vrstvy a následně zhoršení elektrických parametrů textilní antény. Proto nelze doporučit přišívání ve spojení s těmito technologiemi.

4.2.2 Pájení

Další možností jak vytvořit vodivý kontakt s textilní anténou je využití technologie pájení. Celý proces pájení je možný díky hybridní šicí niti, která obsahuje metalické mikrodrátky, na které je možné pájet běžnými metodami. Použité hybridní šicí nitě jsou detailněji popsány v kapitole 4.1.2.

Mezi vhodné způsoby pájení využitelné k vytvoření vodivého kontaktu s textilní anténou patří ruční pájení, přetavení horkým vzduchem nebo pomocí infrazářením. Například přetavení v horkých parách není v tomto případě vhodné a to z důvodu nasákavosti textilního substrátu. Využit je možné například bezolovnatou pájku Sn96Ag3Cu0,5 , která má bod tání $219\text{ }^{\circ}\text{C}$. S ohledem na tuto teplotu musí pájecí proces proběhnout rychle (v nižších jednotkách sekund), tak aby nedošlo k poškození struktury výšivky. Další možností je využití olovnaté pájky Sn63Pb37 , která má bod tání nižší a to $183\text{ }^{\circ}\text{C}$. Použití a prodej olovnatých pájek je, ale omezen v rámci evropské unie. Nejšetrnější pájkou využitelnou pro pájení na textilní antény, s ohledem na potřebnou teplotu přetavení, je bezolovnatá pájecí pasta s obsahem bismutu Sn42Bi58 , která má bod tání $141\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 30 - ukázka pájeného spoje

4.2.3 Lepení vodivým lepidlem

Vytvořit stabilní kontakt mezi koaxiálním kabelem či konektorem na textilní materiál není jednoduchá záležitost. Jednou z možností jak tento kontakt vytvořit je využití vodivého lepidla, kdy se koaxiální kabel aplikuje do vodivého lepidla a poté se vytvořený kontakt tepelně vytvrdí.

K vytvoření vodivého kontaktu v tomto případě bylo využito stříbrné vodivé epoxidové lepidlo 8331S od společnosti MG CHEMICALS. Jedná se o dvousložkové lepidlo epoxidové lepidlo se stříbrnými částicemi s dlouhou životností. Obě složky se vzájemně míchají ve váhovém poměru 1:1. Rezistivita lepidla 8331S je $0,006 \Omega \cdot \text{cm}$ a tepelnou vodivost $1,3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Doba použitelnosti po smíchání obou částí je 4 hodiny. Po nanesení na spojované materiály je nutné lepidlo vytvrdit při teplotě $65 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 2 hodin nebo při teplotě $80 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 1 hodiny. Mezi výhody tohoto vodivého epoxidového lepidla patří například vysoká pevnost v tahu, vynikající pevnost v tlaku, a dobře přilne k většině materiálů.



Obr. 31 - kontakt vodivým lepidlem

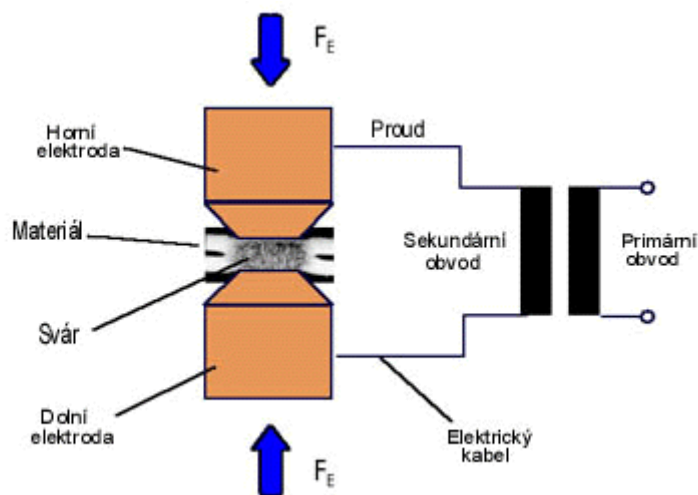
4.2.4 Odporové svařování

Další možností jak vytvořit vodivý kontakt mezi napájecím bodem a textilní anténou je odporové svařování. Odporové svařování je proces (princip na Obr. 32), při kterém dochází za pomoci tlaku a tepla ke vzájemnému spojení svařovaných částí. Teplo vzniká přeměnou dodávané elektrické energie (svařovací proud), která svařované dílce s vysokým elektrickým odporem natolik ohřeje, že se dotykové plochy roztaví a vytvoří čočkový svár, který po ztuhnutí vytvoří pevné spojení. Základem tohoto procesu je následující rovnice:

$$E = I^2 * R * t \text{ [J; A, } \Omega, \text{ s]} \quad (5)$$

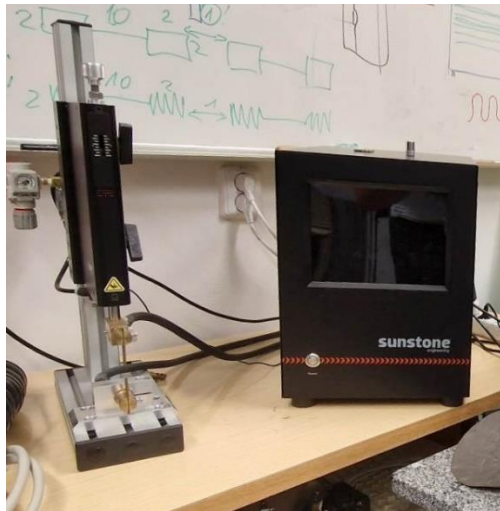
kde:

E = energie tepla, I = svařovací proud, R = celkový odpor, t = čas svařování [31].



Obr. 32 - Princip odporového svařování [31]

Pro vytvoření vodivého kontaktu mezi napájecím bodem a textilní anténou pomocí odporového svařování, byla v rámci této práce použita odporová svářečka Sunstone Linear DC 1500 spolu se svařovací hlavou 1125A. Svařovací proud této odporové svářečky lze nastavit od 10 do 4000 A při kroku 10 A. Výkon svařování je regulovatelný od 0,01 do 20 kW při 10 W kroku. Hodnota výstupního napětí je od 1 do 10 V s přesností $\pm 0,005$ V. Doba svařování je nastavitelná od 0 do 100ms s rozlišením 0,1 ms.



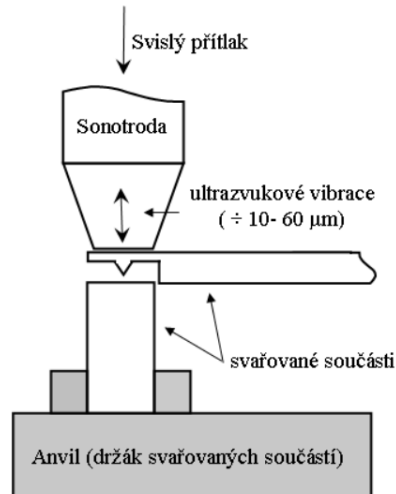
Obr. 33 – sestava odporové svářečky Sunstone

4.2.5 Ultrazvukové svařování

Svařování ultrazvukem, využívané k vodivému spojení dvou materiálů, je v oblasti elektrotechniky poměrně novou technologií a to s ohledem na svařované textilní materiály.

Při ultrazvukovém svařování jsou dva materiály k sobě přitlačeny, přičemž jeden z nich je pevně fixován. Druhý je rozkmitán frekvencí ultrazvukového budiče. Vlastní zdroj kmitů se skládá z magnetostrikčního měniče (slitina Fe + Ni, Fe + Co + V), nebo piezoelektrického měniče (BaTiO_3 , PbZrTiO_3), na který je připojen trychtýřovitý vlnovod zesilující amplitudu kmitání. Magnetostrikční měniče převádějí elektrické kmity vysoké frekvence na mechanické kmity vysoké frekvence. Mechanické kmity jsou u kovu v horizontální rovině. Zároveň je ale při vysokých kmitech malá amplituda. Vlnovod je ukončen tzv. sonotrodou, která přenáší kmitání na svařovaný materiál. Sonotrody jsou přitlačovány silou, která zajišťuje přenos ultrazvukových kmitů do místa spoje. Kmitání je přenášeno na rozhraní dvou spojovaných materiálů, kde dochází k plastické deformaci kovů a relativně malému zvýšení teploty. Plastická deformace je většinou (3 ÷ 5) % z celkové tloušťky spoje, pak vznikne kvalitní svarový spoj. Princip ultrazvukového svařování je znázorněn na Obr. 34.

[32]



Obr. 34 - Princip ultrazvukového svařování [32]

Na Obr. 35 je zobrazena ultrazvuková svářečka HiQ G1 Dialog 35/1200, která byla použita pro vytvoření vodivých kontaktů v rámci této práce. Jedná se o 35 kHz systém o výkonu 1200 W. Síla svařování při 8 barech je nastavitelná od 10 do 650 N.



Obr. 35 - ultrazvuková svářečka HiQ G1 Dialog 35/1200

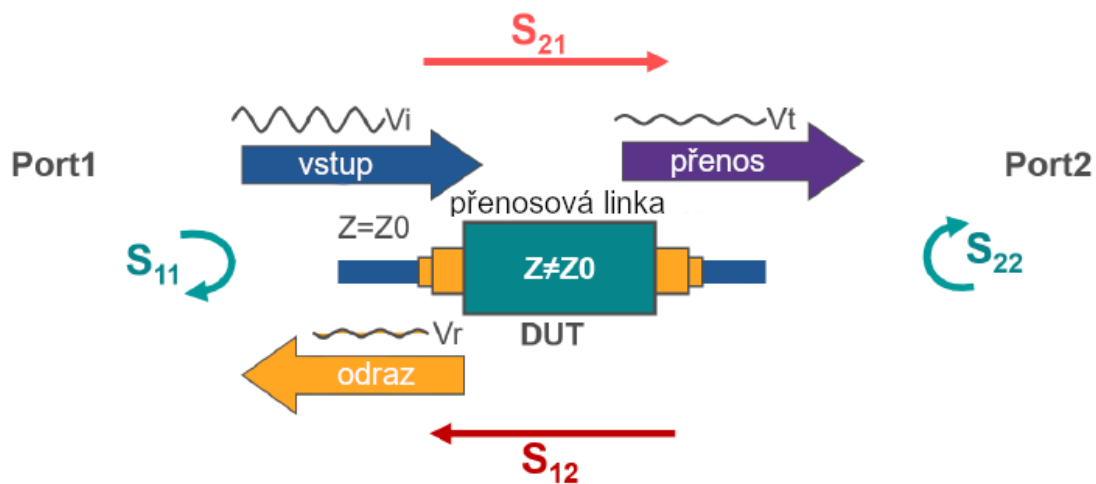
4.3 Metody využité k ověření elektrických parametrů antén a způsobu kontaktování

Tato kapitola popisuje technologie a metody, které byly použité k analýze elektrických parametrů antén a způsobů kontaktů. V první části jsou diskutovány elektrické parametry antén, jako jsou S-parametry, činitel stojatých vln nebo vyzařovací diagram. Druhá část se zabývá analýzou mechanického namáhání antén a způsobů testování vytvořených kontaktů s ohledem na jejich kvalitu a stabilitu.

4.3.1 Elektrické parametry

S-parametry

S-parametry popisují lineární charakteristiky RF elektronických obvodů či součástek. S-parametry spojují dohromady tři vlny – zdrojovou, odraženou a přenesenou. K měření je zapotřebí zdroj vstupního signálu a zátěž, které jsou spojeny za pomoci nízko ztrátových přenosových vedení.



Obr. 36 - schématické znázornění S – parametrů na přenosové lince – převzato a upraveno z [33]

S_{11} – odraz na vstupním portu

S_{12} – zpětný zisk

S_{21} – lineární zisk

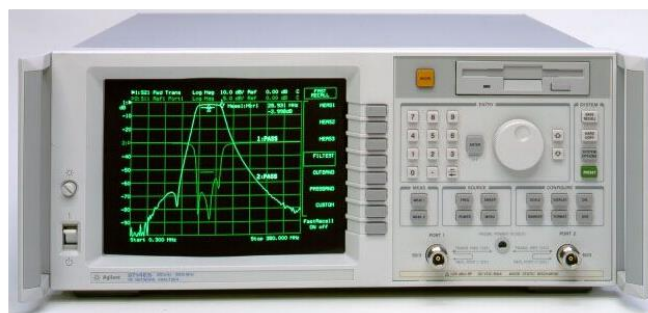
S_{22} – odraz na výstupním portu

Vstupní činitel odrazu S_{11} vyjadřuje vstupní činitel odrazu antény ρ ve formě zisku odraženého signálu v dB a udává, jak dobře je daná anténa impedančně přizpůsobena. V případě, kdy by S_{11} bylo rovno nule, tak by se všechna energie odrazila zpět a žádná energie by nebyla vyzářena ven z antény. Vztah mezi S_{11} v dB a bezrozměrným činitelem odrazu ρ je dán vztahem:

$$\rho = 10^{\frac{S_{11}}{20}} \quad (6)$$

S_{21} udává velikost výkonu bude na portu 2, vzhledem k velikosti příkonu přivedeného na port 1. Například $S_{21} = 0$ dB znamená, že veškerý výkon dodávaný na port 1 bude přenesen na svorky portu 2.

K měření s-parametrů byl využit vektorový analyzátor ve zkratce VNA (z anglického Vector Network Analyzer) HP 8714ET od společnosti Agilent/HP. Toto VNA je dvouportové zařízení umožňující měřit charakter přenosu a odrazu signálu. Na dvou nezávislých kanálech lze měřit a zobrazit výsledky dvou různých zařízení a to při rozsah měření 300 kHz až 3 GHz. Před měření je nutné provést kalibraci za použití kalibračního setu. Výstupem měření mohou být S-parametry, komplexní impedance, činitel stojatých vln či Smithův diagram.



Obr. 37 - VNA HP 8714ET

K ověření výsledků byl použit analyzátor integrity signálu SPARQ-3002E od společnosti Lecroy je 2portový analyzátor schopný měřit od DC do 30 GHz. Signálový analyzátor SPARQ poskytuje kalibrované měření se snadným připojením k DUT (testované zařízení) a nabízí jednoduché možnosti nastavení. Kalibrace je prováděna automaticky uvnitř zařízení.



Obr. 38 - SPARQ-3002E

Činitel stojatých vln

Činitel stojatých vln určuje jak dobře je anténa impedančně přizpůsobena vzhledem k napájecí a vysílači. Činitel stojatých vln také bývá překládán z anglického Standing Wave Ratio (SWR) jako poměr stojatých vln (PSV). Dále je možné se setkat s VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) je poměr napětí stojacích vln. Rozsah hodnot, kterých může ČSV dosáhnout je od 1 do ∞ . Pokud je ČSV rovno 1, tak se celý výkon vysílače přeneše na anténu a vyzáží se. Pokud by je $\text{ČSV} > 1$, tak dojde ke vzniku tzv. odražené vlny B, která se odrazí zpět do vysílače. Takovýto stav (impedanční nepřizpůsobení přenosového řetězce) může vést ke vzniku poruch, případně i ke zničení koncový stupňů vysílače. Výpočet hodnoty ČSV lze provést dle následujícího vzorce:

$$\text{ČSV} = \frac{1 + \sqrt{B/F}}{1 - \sqrt{B/F}} = \frac{Z_1}{Z_a} \text{ nebo } \frac{Z_a}{Z_1} \quad (7)$$

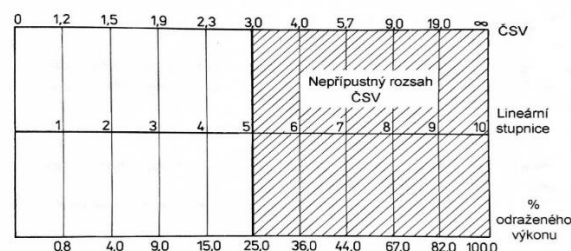
kde:

F – výkon přenášené vlny

B – výkon odražené vlny

Z_a – impedance napáječe

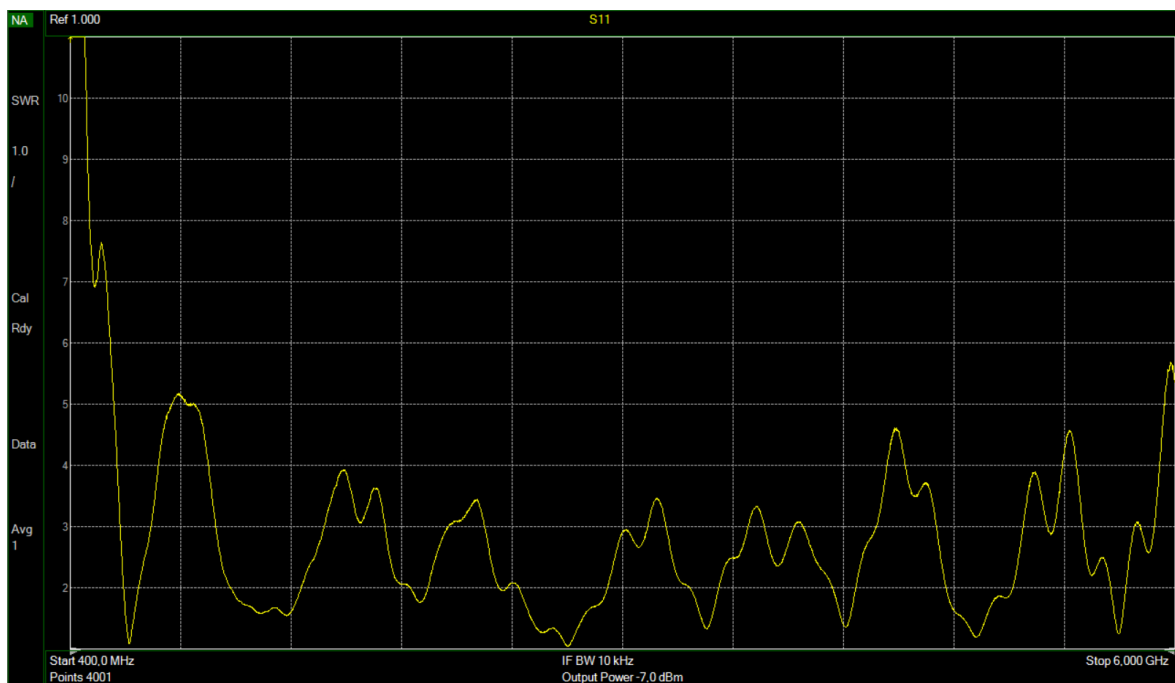
Z_1 – impedance antény [17]



Obr. 39 - Diagram závislosti ČSV na poměru přeneseného a odraženého výkonu [17]

Některá literatura uvádí hodnotu $\text{ČSV} = 3$, za stále vyhovující mez, nicméně hodnota $\text{ČSV} = 3$ znamená 25 % odraženého výkonu, za vhodnou mez tedy lze považovat hodnotu $\text{ČSV} = 2$, což znamená přibližně 10 % odraženého výkonu. Dle hodnoty ČSV lze také posoudit, zda je zapotřebí provést impedanční přizpůsobení měřené antény. Dle literatury nemá smysl se zabývat impedančním přizpůsobením, pokud je hodnota $\text{ČSV} \leq 2$. V takovém případě snaha o impedanční přizpůsobení nevede k velkému zlepšení parametrů antény.

Nejjednodušším způsobem jak změřit činitel stojatých vln je pomocí VNA, které je využíváno i pro další měření sloužících k charakterizaci antén. Hodnotu ČSV lze změřit pouze pro žádanou rezonanční frekvenci, nebo pro celý rozsah měřených frekvencí. Druhý způsob lze vidět na Obr. 40.

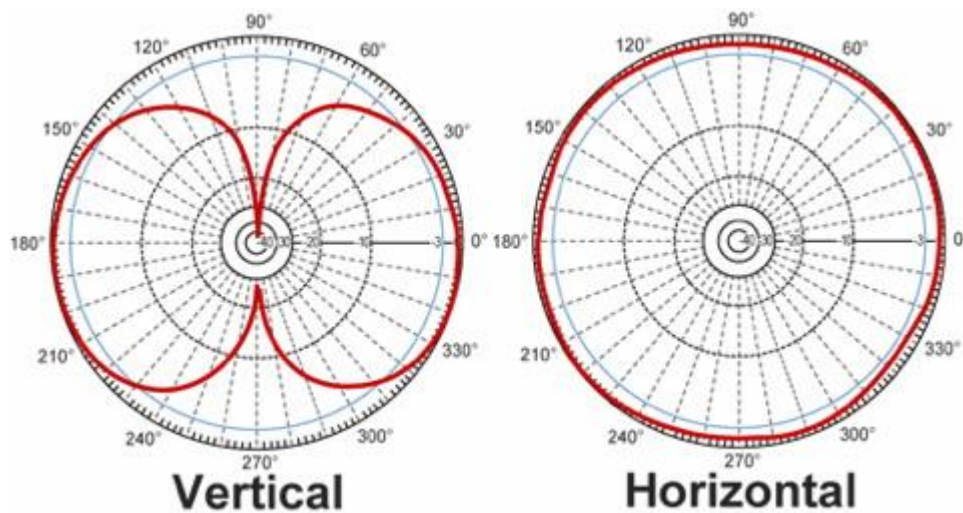


Obr. 40 - Závislost činitele stojatých vln na frekvenci vyřivané dipólové antény

Vyzařovací diagram

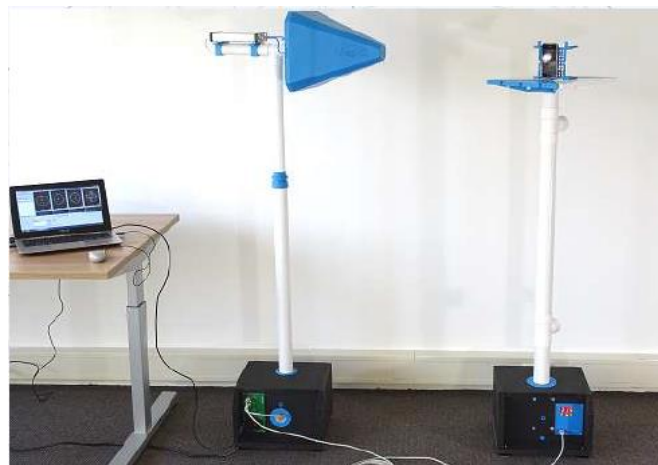
Vyzařovací diagram graficky znázorňuje směrové vlastnosti antén do prostorových souřadnic. Vyzařovaná vlna má dvě vektorové složky. První je vektor elektrické složky kolmý na složku magnetického pole, tedy druhou složku vlny. Tyto dvě vektorové složky jsou na sebe v každém okamžiku kolmé, mohou se ale otáčet kolem vektoru šíření. Vyzařovacím diagramem lze popsat vlastnosti antény v horizontální a vertikální rovině ve 2D (zpravidla pro každou rovinu zvlášť) případně ve 3D zobrazení (obě roviny zobrazeny společně). Získaný diagram lze považovat za platný pouze při použití antény v bezodrazové komoře, tedy ideálním prostředí. Objekty v blízkosti antény způsobí degradaci vyzařovacího

diagramu z důvodu vzniku odrazů vyzařovaného signálu. Příklad vyzařovacího diagramu pro vertikální a horizontální rovinu lze vidět na Obr. 41. [34][35]



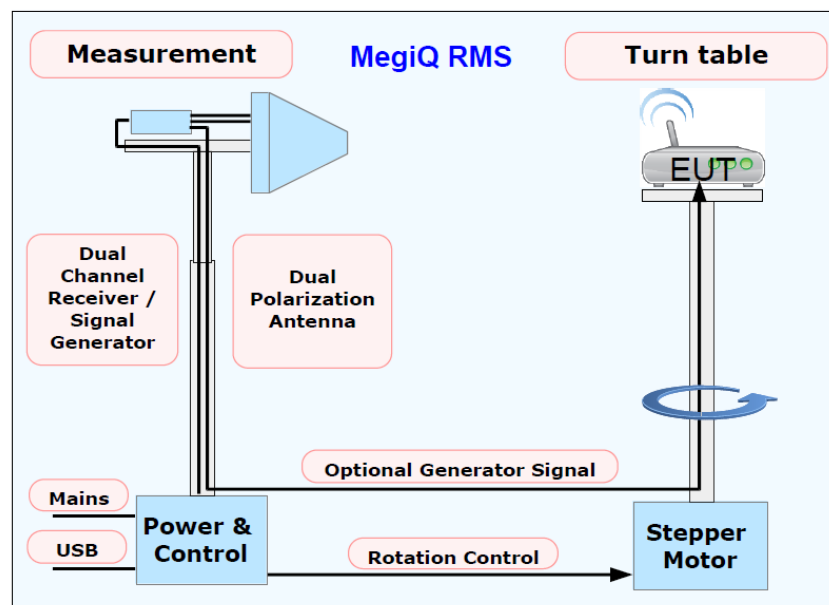
Obr. 41 - Vyzařovací digram [34]

V současné době je možné využít pro měření vyzařovacího diagramu dva různé systémy. V prvním případě není zapotřebí mít k dispozici bezodrazovou komoru (Obr. 42). Aby bylo možné změřit vyzařovací diagram i bez využití bezodrazové komory, je zapotřebí zajistit volný prostor o rozměrech 4x4x3 m (pro měření nad 800 MHz, pro menší prostory nebo nižší frekvence by bylo zapotřebí využít absorbéry). Příkladem takového systému je MegiQ RMS0660. Měřicí systém MegiQ RMS0660 je tří osový systém měřící směrové charakteristiky s rozsahem měřených frekvencí od 370 / 600 MHz do 4 / 6 GHz s přesností měření ± 1 dB, při opakovaném měření $\pm 0,5$ dB. Vzdálenost mezi měřicí a měřenou anténou může být od 0,8 m do 3 m. MegiQ RMS0660 dokáže měřit vyzařovaný výkon (dBm), zisk antény (dBi), směrovost (dB) a sílu pole (dBuV/m) ve třech osách a simultánně pro horizontální i vertikální polarizaci.



Obr. 42 - MegiQ RMS0660

Měřicí systém MegiQ se skládá z vysílací stacionární antény, které má vertikální i horizontální polarizaci, a měřicího rotačního stolu, který je poháněn krokovým motorem. Minimální krok, který lze měřit jsou dva stupně. Na měřicí otočný stůl se umístí měřená anténa a vyrovnají se hladiny tak aby bylo měření efektivní. Měřicí systém otáčí měřenou anténou na otočném stole a měří záření, které vychází z měřené antény v osách X, Y a Z a systém vykresluje směrové charakteristiky. Jelikož měřená anténa může operovat na více frekvencích, tak lze nastavit zdrojový signálový generátor, aby během jednoho kroku proběhlo měření na více frekvencích. Software dále vypočítá hodnoty jak minimální / maximální úroveň, průměr, celkový vyzářený výkon, zisk antény a směrovost.



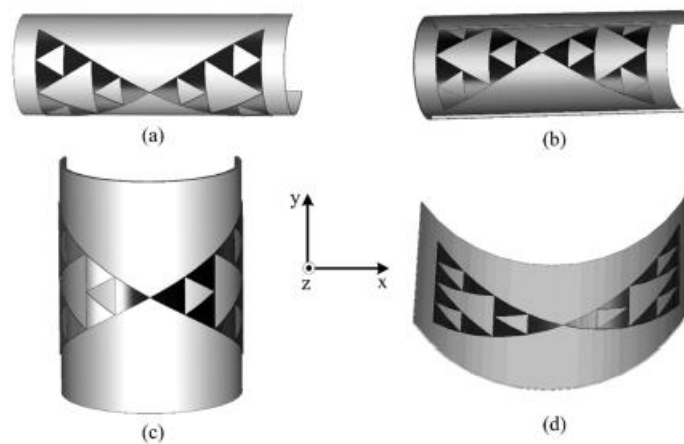
Obr. 43 - Schématické zobrazení měření směrových charakteristik [A11]

Druhý systém disponuje vyšší přesností měření oproti prvnímu, ale je zapotřebí mít k dispozici bezodrazovou komoru.

4.3.2 Mechanické namáhání antény a kontaktů

S ohledem na budoucí uvažované využití textilních antén jakožto nositelných (tedy umístěných na oblečení) kdy dochází k různým deformacím a působení řady vnějších vlivů, byla provedena analýza mechanického namáhání antény a provedených kontaktů.

První částí této analýzy bylo mechanické namáhání antény – vlivu různých ohybů na elektrické parametry antény. V rámci této analýzy byly antény ohýbány přes PVC válce o různých průměrech ohybu. Odolností proti opakovanému ohybu textilií se zabývá norma ČSN 64 7029, ta například udává teplotu, při které jsou textilie testovány na $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ a relativní vlhkost $50\% \pm 5\%$. Na Obr. 44 jsou znázorněny různé způsoby ohýbání. Ohyb se prováděl vždy pro osu X i pro osu Y. Prvním druhem ohybu (a)(c) byl konkávní, tedy anténa se přiložila na PVC válec nevodivou stranou a ohnula se. Druhým ohybem (b)(d) byl konvexní, tedy vodivá strana antény se přiložila na PVC válec a ohnula.



Obr. 44 - Směry ohybu (a) konkávní-x, (b) konvexní-x, (c) konkávní-y, (d) konvexní-y

Dalším důležitým aspektem uvažovaným pro nositelné antény je jejich životní cyklus a životní cyklus oblečení, do kterého bude anténa integrována. Jelikož není ekonomické ani ekologické vyrábět oblečení pouze na jedno použití, je nutné dané oblečení po zašpinění vyčistit. Druhá část této analýzy se tedy zabývala vlivem pracích cyklů na elektrické parametry antény. Odolností vůči praní se zabývá norma ČSN EN ISO 6330. K provedení pracích testů byla k dispozici profesionální pračka Whirlpool AWG 812/PRO. Různé vzorky byly prány odděleně v textilních sáčcích a s ohledem na normu bylo váhové množství vzorků doplněno textiliemi na hodnotu 2 kg. Následné sušení probíhalo v sušičce prádla Whirlpool po dobu 90 minut v oddělených sáčcích s doplněnými textiliemi.



Obr. 45 – pračka Whirlpool AWG 812/PRO

Ve třetí části byla provedena analýza vlivu mechanického namáhání kontaktů s ohledem na jejich stabilitu a živostnost. K otestování byla vybrána trhací zkouška, ke které bylo využito univerzální trhací zařízení Labortech 3.030. Pomocí tohoto trhacího zařízení lze provádět programovatelně zkoušky v tlaku i tahu až do síly 1000 N. Díky možnosti nastavit rychlost posuvu v mm/min dochází k postupnému namáhání ve stříhu či tlaku. Po celou dobu testu je měřena síla, která působí na měřený vzorek a to až do momentu kdy dojde k přetržení, kdy se zaznamená maximální síla, která na vzorek působila a poté je zkouška ukončena.



Obr. 46 - univerzální trhací zařízení Labortech 3.030

4.3.3 Klimatické testy

V rámci provádění klimatických testů byly provedeny tři odlišné druhy analýzy. V první analýze byly vzorky vystaveny působení suchého tepla a to při teplotě 85 °C po dobu 70 hodin. Pro provedení druhé analýzy byly vzorky vystaveny šokové změně teplot v klimatické komoře. Teploty byly nastaveny na -20 °C a +85 °C. Jeden měřicí cyklus probíhal tak, že byl vzorek vystaven teplotě +85°C po dobu 15 minut, poté během 10 vteřin byla teplota změněna na -20 °C, této teplotě byl vzorek vystaven opět po dobu 15 minut. Celkově bylo provedeno 100 měřících cyklů. Během třetí analýzy byly vzorky po dobu 70 hodin umístěny do vytvořeného prostředí o relativní vlhkosti 93 % a teplotě 40 °C. Měření proběhlo vždy před provedením klimatických testů a po dokončení klimatických testů.

Pro provedení uvedených testů byla použita klimatická komora VT₃ 7012 S2 od firmy Vötsch industrietechnik.



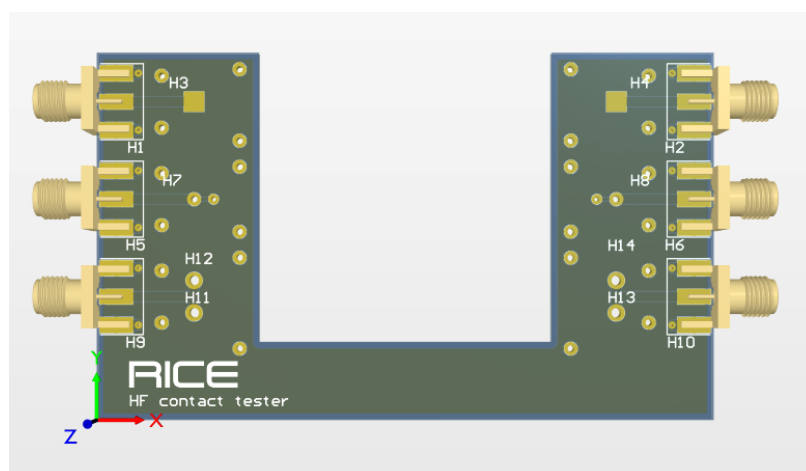
Obr. 47 - klimakomora VT₃ 7012 S2

5 Hlavní dosažené výsledky

V této kapitole je diskutována realizace textilních antény různými technologiemi a jejich vlivem na elektrické parametry antény. Textilní antény byly realizovány vyšíváním, tiskem a kombinací těchto technologií. Dále byla provedena analýza vlivů mechanického namáhání, vlivu lidského těla, vlivu potu a údržby na elektrické parametry antény. Další část této práce se zaměřuje na návrh a ověření technologie kontaktování využitelné pro textilní antény s ohledem na spolehlivost a bezproblémovou údržbu. Mezi zkoumané technologie patřilo pájení, přišívání, odporové svařování, ultrazvukové svařování a lepení. Pro každou zvolenou technologii byla provedena analýza vlivu působení suchého tepla, šokové změny teploty a účinků klimakomory na elektrické parametry vytvořeného kontaktu. Dále byla provedena zkouška mechanické odolnosti vytvořených kontaktů – trhací zkouška, kde se zkoumala síla potřebná k odtržení vytvořeného kontaktu.

5.1 Návrh a ověření technologie kontaktování využitelné pro textilní antény s ohledem na spolehlivost a bezproblémovou údržbu

Jak už bylo zmíněno v kapitole 344.2, kontakt mezi textilní anténou a dalším zařízením, měřícím či vysílacím / přijímacím, je jeden z nejzásadnějších a také nejkomplikovanějších prvků. Z tohoto důvodu je část této práce zaměřena na vytvoření a otestování kontaktu s textilní anténou s ohledem na použití stávajících technologií jako je pájení, lepení, přišívání, odporové svařování nebo ultrazvukové svařování. Pro účely této analýzy byl navrhnout testovací plošný spoj (Obr. 48).



Obr. 48 - Model prototypu využitého pro testování způsobu kontaktování

Tento testovací plošný spoj byl navrhnout jako univerzální, tak aby nebylo nutné pro každou metodu kontaktování vytvářet nový a unikátní plošný spoj. Parametry testovacího plošného spoje jsou následující - $\epsilon_r = 4,37$, šířka vodivé dráhy $W = 1,21$ mm, výška $H = 1,5$ mm, mezera mezi vodivými drahami $G = 0,2$ mm impedance $Z_0 = 49,9956 \Omega$. Mezi kontaktní plochy na obou stranách byla vložena vyšitá přenosová linka vyšitá stříbrnou hybridní šicí nití vzor 74 o délce 70 mm a spojena s testovacím plošným spojem jednou z vybraných metod. Pro hodnocení kvality vytvořeného spoje byl zvolen parametr S_{21} . Z toho důvodu byl plošný spoj osazen SMA konektory vhodnými pro měření. Nejdříve byly vzorky otestovány ihned po vytvoření kontaktů, poté byly provedeny klimatické testy – působení suchého tepla, šokové změny teplot a klimatické testy, které jsou popsány v kapitole 4.3.3. Aby bylo možné objektivně zhodnotit vliv jednotlivých klimatických testů, byla pro každou klimatickou zkoušku vyrobená nová sada vzorků.

Testované vzorky byly očíslované následovně:

1-3 - pájení

4-6 – přiřívání

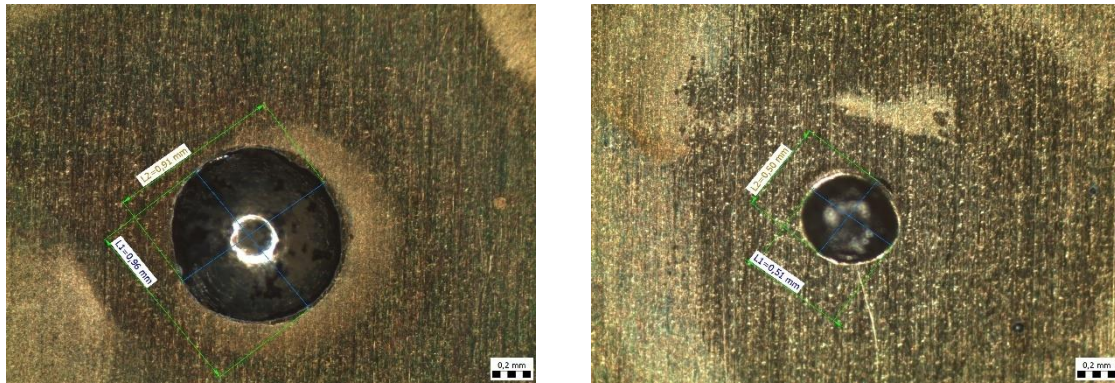
7-9 - odporové svařování

10- 12 – ultrazvukové svařování

13-15 – lepení

5.1.1 Pájení

První otázkou řešenou v této kapitole bylo, jakou pájku použít. S ohledem na použití hybridních šicích nití s obsahem mosazných mikrodrátků byl proveden test pájitelnosti na mosazné destičce. Na destičku bylo nanášeno tavidlo a do něj umístěna kulička pájky o průměru 500 μm . Zvoleny byly olovnatá pájka SnPb a bezolvnatá pájka SAC 305. Poté se pájka přetavila pomocí horkých par při teplotě 230°C a následně byla hodnocena smáčivost testovaných pájek (Obr. 49) a vypočítán smáčecí úhel. Průměrná hodnota pro SAC byla 72° a pro SnPb 37°, kdy do 55° se jedná o dobře přetavenou pájku. S ohledem na tyto výsledky byly pro testování kontaktů pomocí pájení zvolena olovnatá pájka.



Obr. 49 - vlevo SnPb, vpravo SAC 305

Na Obr. 50 je zobrazen spoj vytvořený ručním pájením, pro vytvoření vodivého kontaktu byly využity olovněná trubičková pájka s obsahem tavidla. Pájením bylo dosaženo nejstabilnějších kontaktů s hodnotami odporů přenosové linky 0,2 – 0,3 Ω , což je prakticky hodnota odporu samotné přenosové linky.

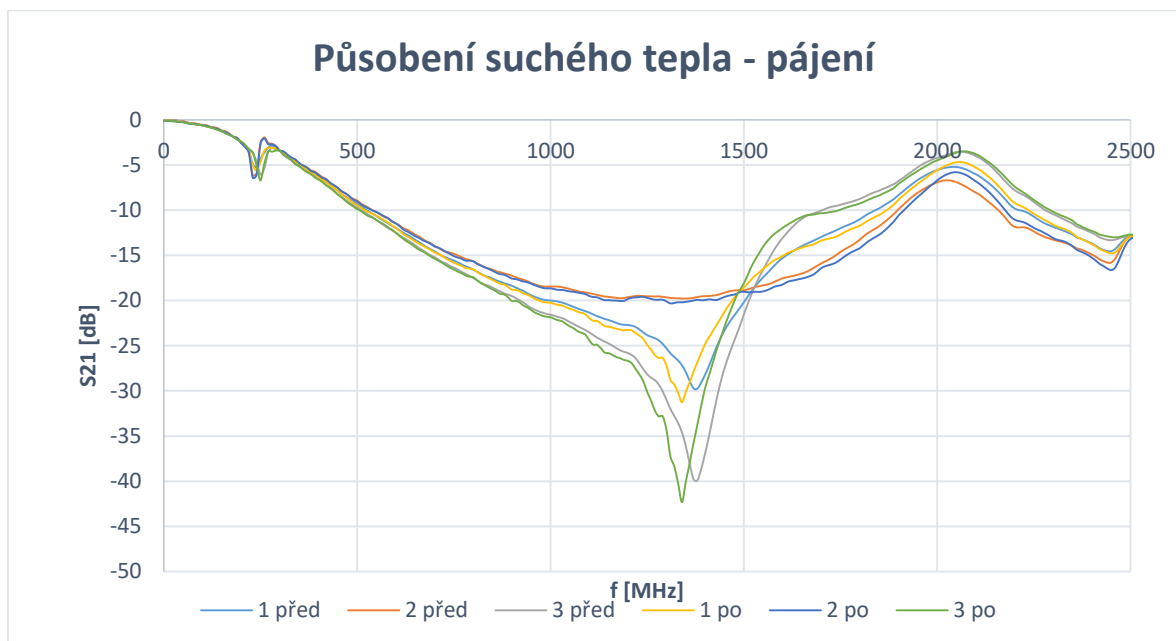


Obr. 50 - spoj vytvořený pájením

První provedená zkouška testovala vliv působení suchého tepla na přenosové vlastnosti vytvořeného kontaktu s vyšitou přenosovou linkou. Průběhy označené „před“ byly naměřeny před zkouškou a průběhy „po“ byly naměřeny po zkoušce působení suchého tepla. Vzorky byly označeny čísly 1 – 3. Výsledky měření této zkoušky jsou zobrazeny na Obr. 51. Zde jsou patrné odlišnosti průběhů u jednotlivých kontaktů, což svědčí o tom, že ne všechny kontakty jsou provedeny zcela stejně.

Dle předpokladů, bylo u všech testovaných způsobů kontaktování přenosových linek dosaženo vysokých hodnot útlumu. Hodnoty útlumu přenosové linky vytvořené na plošném spoji může dosahovat při při frekvenci 1 GHz 0,4 dB / 10 cm délky. [46] Jelikož hodnota lineárního odporu hybridních šicích nití je násobně větší než v případě mikropáskového vedení nebo měděného vodiče, bude v této práci hodnota útlumu 10 dB považována za stále vhodnou. Dle těchto parametrů lze považovat za vhodné používat pájený vzorek 1 od

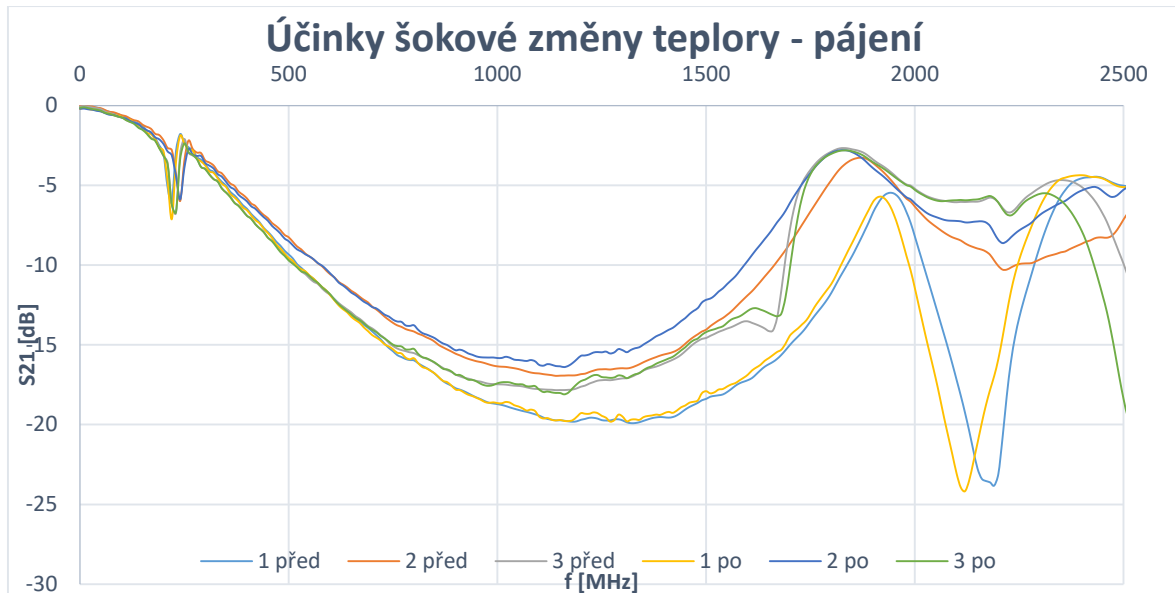
frekvence 1850 do 2230 MHz (nejlepší hodnota $S_{21} = -4,7$ dB, byla dosažena při frekvenci 2040 MHz). Vzorek 2 má hodnotu útlumu pod 10 dB mezi frekvencemi 1910 – 2190 MHz, nejmenšího útlumu bylo dosaženo při frekvenci 2010 MHz, kdy byla hodnota $S_{21} = -6,3$ dB. Pro vzorek 3 (1760 – 2320 MHz) bylo dosaženo nejmenšího útlumu při frekvenci 2080 MHz, kde hodnota $S_{21} = -3,5$ dB. Působením suchého tepla došlo u všech vzorků k mírnému snížení hodnoty útlumu. Tato změna byla pravděpodobně způsobena dodatečným tepelným působením na pájku. Výkyv hodnot pro vzorky 1 a 3 v okolí frekvence 1400 MHz může být způsobeno horším provedením pájeného spoje nebo méně kvalitně vyšitou přenosovou linkou.



Obr. 51 - Působení suchého tepla – pájení

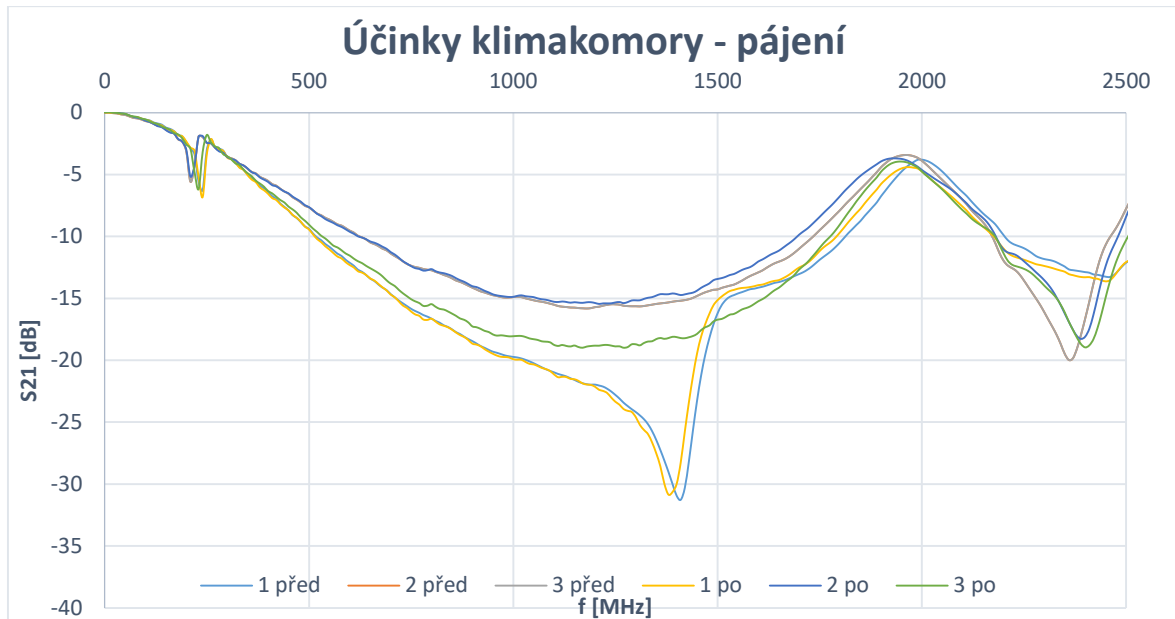
Druhou zkouškou bylo ověření účinků šokové změny teploty testovaného vzorku (Obr. 52). Pro tuto zkoušku (stejně tak i pro další zkoušky) byla vyrobena zcela nova sada vzorků, proto jsou patrné rozdíly mezi průběhy zkoušek. Parametry zkoušky jsou popsány v kapitole 4.3.3. Frekvenční rozsah, při kterém vzorky dosahovaly hodnot útlumu pod 10 dB, byl pro vzorek 1 (1830 – 1990 MHz), vzorek 2 (1650 – 2500 MHz) a vzorek 3 (1710 – 2430 MHz). Vzorek 1 dosáhl nejnižšího hodnoty útlumu při frekvenci 1930 MHz ($S_{21} = -5,5$ dB), po provedení zkoušky šokové změny teploty došlo ke zhoršení přenosu ($S_{21} = -5,7$ dB). U vzorku 2 byla nejmenší hodnota útlumu změřena při frekvenci 1860 MHz ($S_{21} = -3,29$ dB), po provedení zkoušky zde došlo ke zmenšení útlumu na $S_{21} = -2,81$ dB. Vzorek 3 dosahuje nejlepších hodnot přenosu při frekvenci 1820 MHz ($S_{21} = -2,68$ dB), po provedení zkoušky šokové

změny teploty došlo k mírnému zhoršení ($S_{21} = -2,86$ dB). Výkyv pro vzorek 1 v okolí frekvence 2100 MHz může být způsobena opět horším provedení kontaktu nebo vyšité přenosové linky.



Obr. 52 - účinky šokové změny teploty - pájení

Třetí zkouška zkoumala vliv účinku prostředí o relativní vlhkosti 93% a teplotě 40°C. Vzorky byly v tomto prostředí ponechány po dobu 70-ti hodin. Hodnoty frekvencí, při kterých je útlum menší než 10 dB, byli pro vzorek 1 (1780 – 2180 MHz), vzorek 2 (1770 – 2180 MHz) a vzorek 3 (1700 – 2190 MHz). U vzorku 1 byla změřena nejmenší hodnota útlumu při frekvenci 2000 MHz ($S_{21} = -3,8$ dB), u vzorku 2 při frekvenci 1960 MHz ($S_{21} = -3,5$ dB) a u vzorku 3 při frekvenci 1970 MHz ($S_{21} = -3,4$ dB). Pro provedení zkošky došlo u všech vzorků ke zhoršení hodnoty útlumu (vzorek 1 – $S_{21} = -4,3$ dB, vzorek 2 – $S_{21} = -3,8$ db a vzorek 3 – $S_{21} = -3,98$ dB). Zhoršení bylo pravděpodobně způsobeno vysokou úrovní relativní vlhkosti, která na vzorky působila. Tímto působením mohlo dojít k degradaci především přenosové linky.



Obr. 53 - účinky klimakomory - pájení

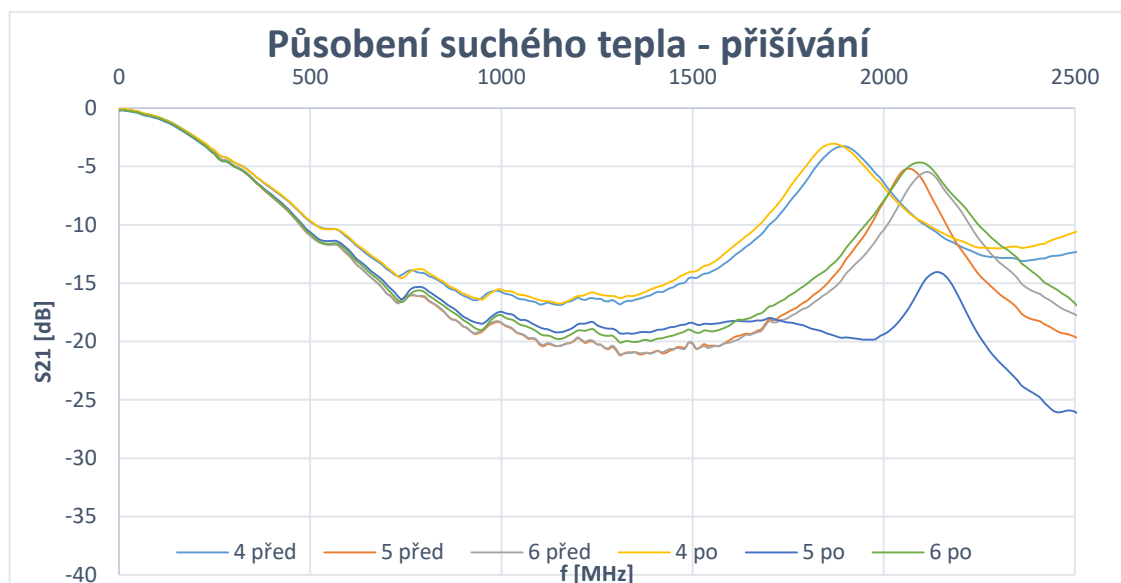
5.1.2 Přišívání

Druhým zkoumaným způsobem kontaktování bylo přišívání. K přišití byla použita stejná stříbrná hybridní šicí niť jako na realizaci přenosové linky. Na Obr. 54 je zobrazena ukázka přišíváního kontaktu, v místě kontaktu je patrné větší množství použité hybridní šicí nitě. Přenosová linka byla přišita vždy ručně, a proto jsou v některých případech rozdílné naměřené průběhy. Kvalita kontaktu závisí na množství použité nitě a na síle, kterou bylo přišívání provedeno. Během ručního přišívání je velmi komplikované zajistit stejnou sílu utažení, kterou je kontakt vytvořen. Hodnoty naměřeného kontaktního odporu byly v rozmezí $0,6 - 0,8 \Omega$, což je z pohledu velikosti odporu nejhorší výsledek ze všech způsobů kontaktování. Na přenosovou linku, ale nemá vyšší hodnota odporu v porovnání s ostatními způsoby kontaktování tak velký vliv.



Obr. 54 - vytvořený spoj pomocí přišívání

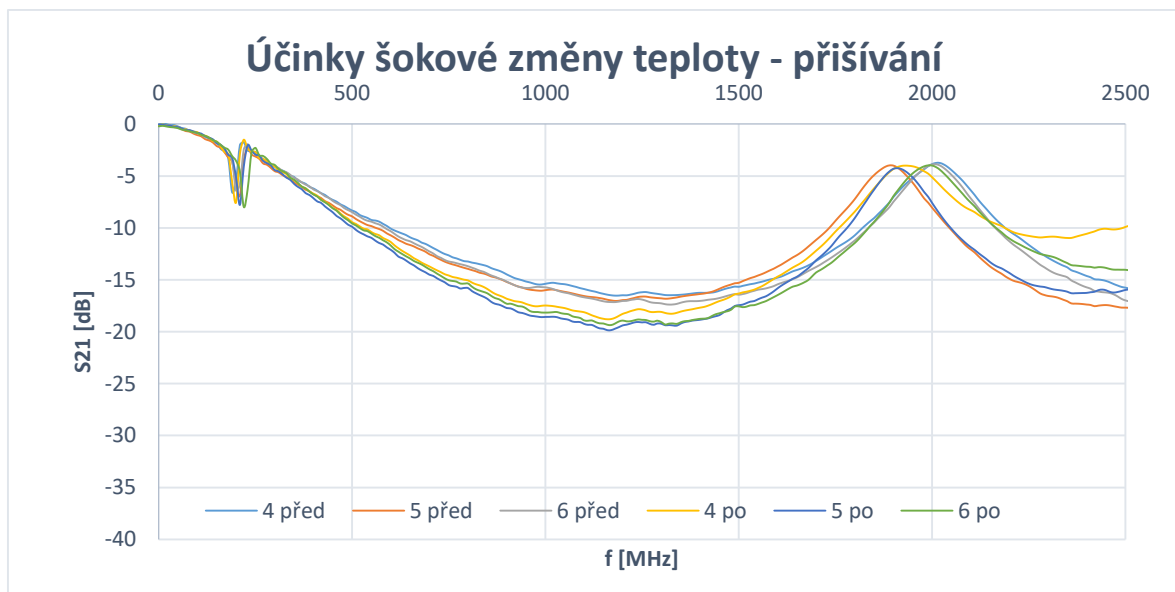
Ověření vlivu působení suchého tepla na kontakt vytvořený pomocí přišívání bylo provedeno jako první. Vzorky byly očíslovány 4 – 6 a v grafu na Obr. 55 jsou vyneseny charakteristiky před a po provedení zkoušky. Z grafu jsou patrné rozdíly mezi jednotlivými vzorky, což svědčí o tom, že provedené kontakty nebyly zcela stejné, kdy se odlišuje vzorek číslo 4. Hodnoty frekvencí, při kterých je útlum menší než 10 dB, byli pro vzorek 4 (1680 – 2110 MHz), vzorek 5 (1960 – 2160 MHz) a vzorek 6 (1960 – 2260 MHz). Vzorek 4 měl před zkouškou při frekvenci 1890 MHz hodnotu $S_{21} = -3,29$ dB, po zkoušce došlo k mírnému zlepšení hodnoty S_{21} na $-3,05$ dB. U vzorku 5 bylo dosaženo nejmenšího útlumu při frekvenci 2070 MHz ($S_{21} = -5,16$ dB), po provedení zkoušky ale došlo k výraznému zhoršení na hodnotu $S_{21} = -14,13$ dB. Toto zhoršení bylo způsobeno hůře provedeným spojem, který po se po zkoušce a nutném transportu na měřící místo, mírně uvolnil. Vzorek 6 dosáhl nejlepších výsledků při frekvenci 2120 MHz ($S_{21} = -5,5$ dB), po provedení zkoušky došlo k mírnému zlepšení ($S_{21} = -4,66$ dB). Toto zlepšení mohlo být způsobeno snížením vlhkosti substrátu.



Obr. 55 - působení suchého tepla - přišívání

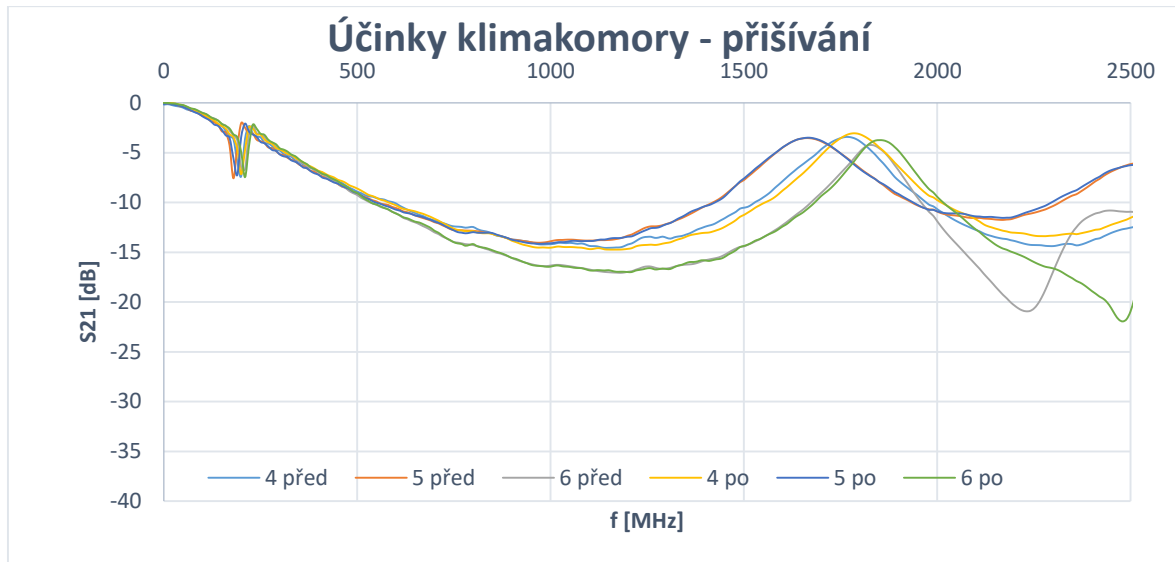
V rámci druhé zkoušky byly testovány účinky šokové změny teploty na přišívání kontakt. Z výsledků zobrazených na Obr. 56 je patrné, že pro tuto zkoušku, byly vytvořeny stabilnější kontakty v porovnání s předchozí zkouškou. Odlišnosti jsou zde pouze mezi jednotlivými vzorky ve frekvenci, hodnoty S_{21} jsou takřka totožné. Hodnoty frekvencí, při kterých je útlum menší než 10 dB, byli pro vzorek 4 (1770 – 2180 MHz), vzorek 5 (1760 – 2060 MHz)

a vzorek 6 (1830 – 2180 MHz). U vzorku 4 bylo nejlepších výsledků dosaženo při frekvenci 2040 MHz ($S_{21} = -4,11$ dB), po provedení zkoušky došlo ke zlepšení $S_{21} = -4,00$ dB. Změna hodnoty po provedení zkoušky byla nejmenší u vzorku 5, kdy z hodnoty $S_{21} = -4,45$ dB (1920 MHz) došlo k mírnému zhoršení na $S_{21} = -4,5$ dB. Vzorek 6 dosáhl nejmenšího útlumu při frekvenci 2030 MHz ($S_{21} = -4,21$ dB), po provedení zkoušky došlo k mírnému zhoršení na hodnotu $S_{21} = -4,37$ dB. Z výsledků je tedy patrné, že šoková změna teploty nemá velký vliv na kontakt vytvořený přišíváním (v případě, že je kontakt vytvořen kvalitně).



Obr. 56 - účinky šokové změny teploty - přišívání

U poslední zkoušky byly kontakty (jak vyplývá z grafu na Obr. 57) provedeny kvalitněji se stabilnějšími výsledky. Jsou zde patrné rozdíly mezi jednotlivými vzorky, ale v porovnání před a po zkoušce jsou výsledky takřka totožné a tedy ani účinky klimakomory nemají na přišívaný kontakt velký vliv. Hodnoty frekvencí, při kterých je útlum menší než 10 dB, byli pro vzorek 4 (1550 – 2010 MHz), vzorek 5 (1430 – 1930 MHz) a vzorek 6 (1680 – 2010 MHz). Pro vzorek 4 byla dosažena nejmenší hodnota útlumu při frekvenci 1790 MHz ($S_{21} = -3,63$ dB), po zkoušce došlo k mírnému zlepšení na $S_{21} = -3,32$ dB. U vzorku 5 byly změny způsobené působením klimakomory zanedbatelné, neboť z původní hodnoty $S_{21} = -3,55$ dB (1670 MHz) se změnila hodnota $S_{21} = -3,54$ dB. U vzorku 6 došlo v porovnání s ostatními vzorky k nejvýraznější změně, z $S_{21} = -4,33$ dB (1890 MHz) na $S_{21} = -3,88$ dB. Rozdíly mezi vzorky mohou být způsobeny například různým počtem stehů, kterými byl kontakt vytvořen.



Obr. 57 - účinky klimakomory - přiřívání

5.1.3 Odporové svařování

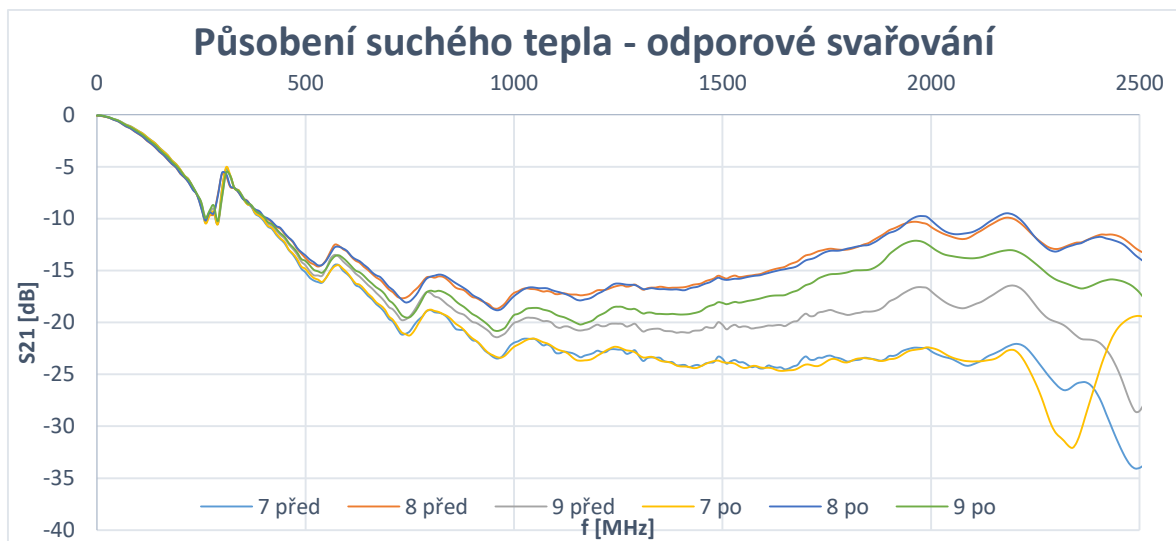
Na Obr. 58 je zobrazen kontakt, který byl vytvořen pomocí odporového svařování. Je vidět, že odporové svařování není nejšetrnější technologií použitelnou k vytvoření vodivého kontaktu mezi plošným spojem a vyšívanou přenosovou linkou, v některých případech docházelo k spálení substrátu. Toto spálení je vidět na obrázku vpravo, kdy došlo téměř k úplnému propálení substrátu a znehodnocení kontaktu. Hodnoty naměřeného kontaktního odporu byly v rozmezí 0,4 – 0,5 Ω . Vzorky, které byly vytvořeny pomocí odporového svařování, byly označeny jako vzorky 7-9.



Obr. 58 - odporové svařování

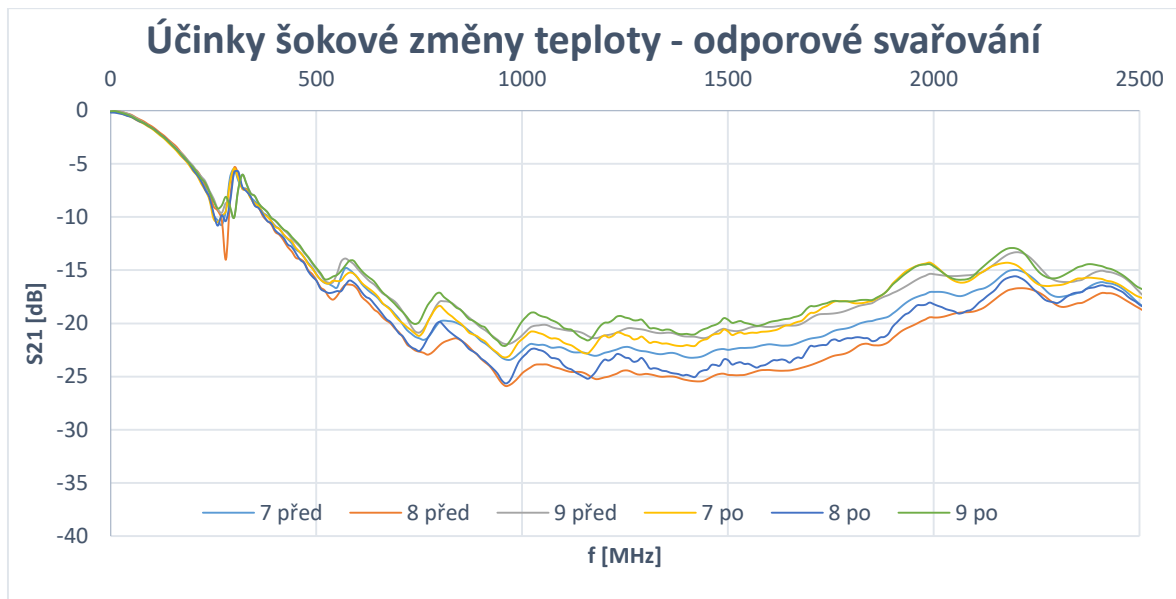
Pro zkoušku vlivu působení suchého tepla na odporově přivařený kontakt, byly vytvořeny vzorky stejným technologickým postupem. Z výsledků je patrné, že ne u všech vzorků se podařilo vytvořit kontakt se stejnými parametry. Hodnoty útlum menších 10 dB v tomto testu prakticky nebylo dosaženo. Přenos signálu tedy bude v tomto případě minimální a nelze

tedy doporučit využití odporového svařování k vytvoření kontaktu pro textilní antény. Nejhorších výsledků dosáhl vzorek 7, od frekvence 1100 MHz se hodnota S_{21} pohybuje v rozmezí -21 až -24 dB. U vzorku 8 mělo působení suchého tepla nejmenší vliv na přenosové vlastnosti, nejlepšího výsledku bylo dosaženo při frekvenci 2190 MHz ($S_{21} = -9,9$ dB), po provedení zkoušky došlo k mírnému zlepšení $S_{21} = -9,49$ dB. U vzorku 9 došlo pro provedení zkoušky ke zlepšení přenosových vlastností z $S_{21} = -16,6$ dB (1970 MHz) na $S_{21} = -12,14$ dB po provedení zkoušky.



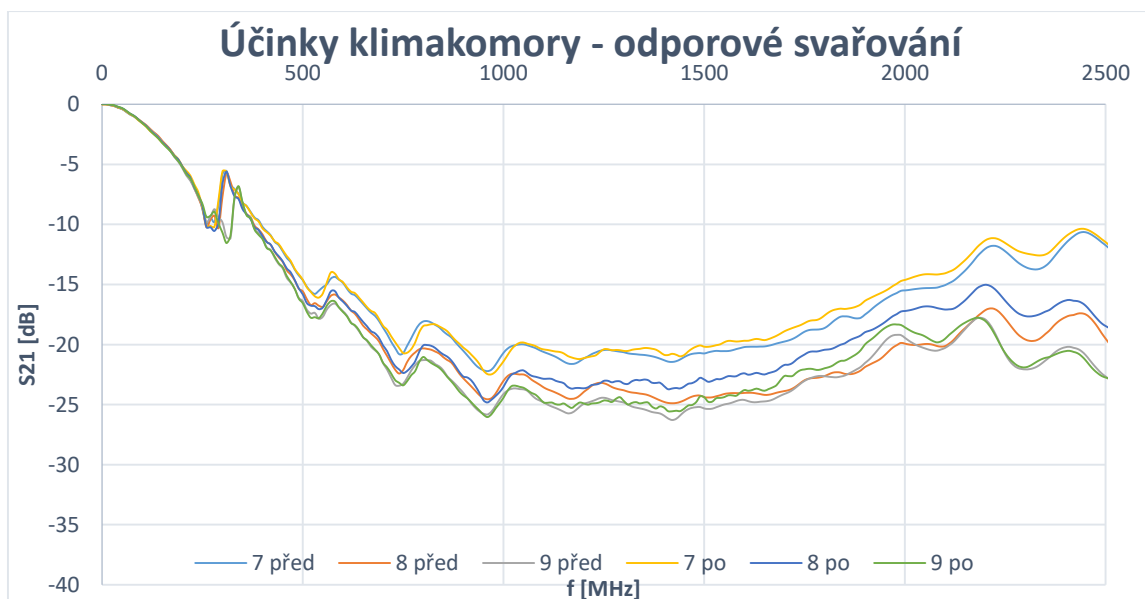
Obr. 59 - působení suchého tepla - odporové svařování

Druhá zkouška, působení šokové změny teploty, ukázala podobné průběhy všech vzorků s rozdílností ve velikosti S_{21} . Ani v této zkoušce nebylo dosaženo hodnot útlumu pod 10 dB. Hodnoty útlumů se pohybovali mezi -13,47 až -16,75 dB. Takové výsledky ukazují, že kontakty vytvořené v této sadě pomocí odporového svařování, nelze považovat za vhodné pro použití k přenosu vysokofrekvenčního signálu. Vzorek 7 dosáhl nejlepších výsledků při frekvenci 2200 MHz ($S_{21} = -14,98$ dB), po zkoušce $S_{21} = -14,79$ dB. U vzorku 8 došlo ke zlepšení S_{21} z hodnot $S_{21} = -16,75$ dB (2230MHz) na hodnotu $S_{21} = -15,94$ dB. U posledního vzorku 9 došlo k mírnému zlepšení z $S_{21} = -13,47$ dB (2220 MHz) na $S_{21} = -13,14$ dB. Z výsledků je také patrné, že šoková změna teploty nemá velký vliv na přenosové vlastnosti kontaktu vytvořeného odporovým svařováním.



Obr. 60 - účinky šokové změny teploty - odporové svařování

Poslední zkouška přinesla podobné průběhy pro všechny vzorky. Tato zkouška take nepřinesla výsledky dosahující hodnot útlumu pod 10 dB. U vzorku 7 bylo dosaženo nejmenší hodnoty útlumu při frekvenci 2450 MHz ($S_{21} = -10,57$ dB), po zkoušce došlo k mírnému zlepšení na $S_{21} = -10,38$ dB. Pro vzorek 8 bylo nejlepších výsledků dosaženo při frekvenci 2210 MHz ($S_{21} = -17,46$ dB), po provedení zkoušky účinků klimakomory došlo ke zlepšení na $S_{21} = -15$ dB. U vzorku 9 bylo dosaženo hodnoty $S_{21} = -18,26$ dB (2210 MHz), po zkoušce došlo k mírnému zlepšení na $S_{21} = -17,85$ dB. Z uvedených výsledků plyne, že ani účinky klimakomory nemají na přenosové vlastnosti kontaktu vytvořeného odporovým svařováním velký vliv. Nicméně vzhledem k hodnotám S_{21} od -10,57 do 18,26 dB pro tuto sadu vzorků, není vhodné tuto technologii použít k přenášení vf signálu.



Obr. 61 - účinky klimakomory - odporové svařování

Z výsledků získaných zkoumáním vlivů účinků klimatických zkoušek na vytvořené kontakty, nelze tuto technologii doporučit k využívání pro kontakty přenášející vysokofrekvenční signály.

5.1.4 Ultrazvukové svařování

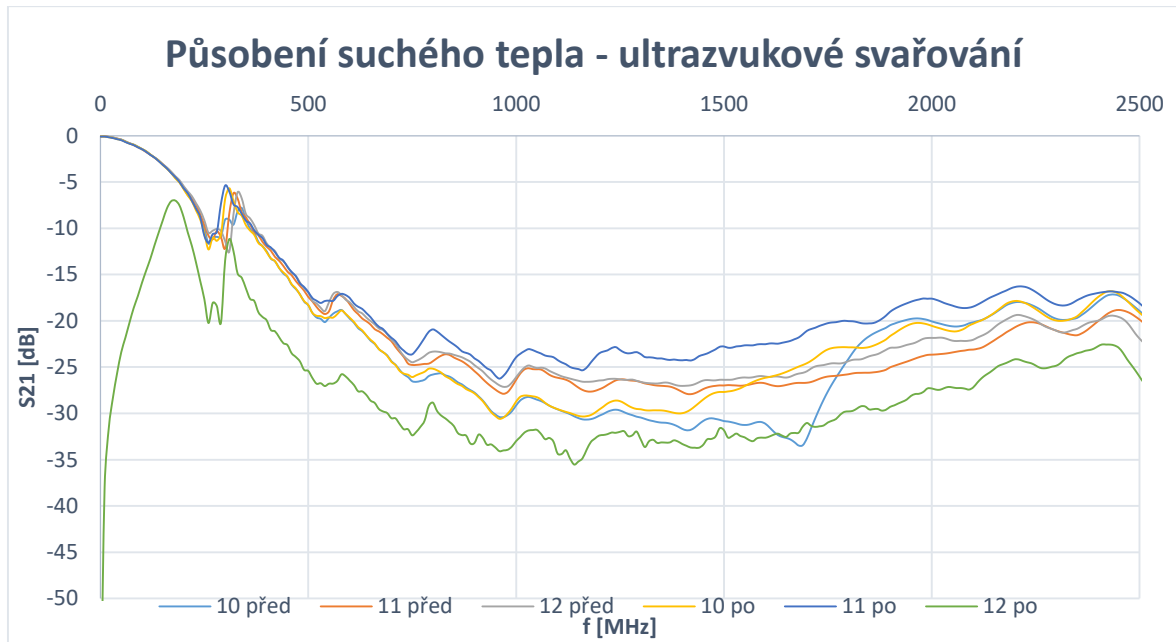
První testovanou metodou vytvoření kontaktu bylo ultrazvukové svařování. Na Obr. 62 je zobrazen kontakt mezi vyšitou přenosovou linkou a testovacím plošným spojem pomocí ultrazvukového svařování. Z obrázku je patrné roztečení polyesterové složky hybridních šicích nití. Dále je zde vidět, že i při stejném technologickém postupu, vytvořené kontakty nejsou zcela totožné. Pro přenos stejnosměrného proudu to nepředstavuje velký problém, neboť naměřené hodnoty kontaktního odporu byly v rozmezí 0,4 – 0,6 Ω . Komplikace nastávají při přenosu vysokofrekvenčního signálu.



Obr. 62 - spoj vytvořený ultrazvukovým svařováním

Byly vytvořeny tři sady vzorků (číslovány 10-12). První provedená zkouška zkoumající účinky suchého tepla na přenosové vlastnosti je zobrazena na Obr. 63. Při zkoušce působení suchého tepla na kontakt vytvořený ultrazvukovým svařováním nebylo dosaženo hodnot útlumu pod 10 dB. Hodnoty útlumů se pohybovali mezi -16,5 až -35,4 dB.

Z výsledků je tedy patrné, že působení suchého tepla na vytvořený kontakt přináší mírné zlepšení přenosových vlastností, nicméně jsou výsledky v rozmezí, které není vhodné pro použití přenosu vf signálu.

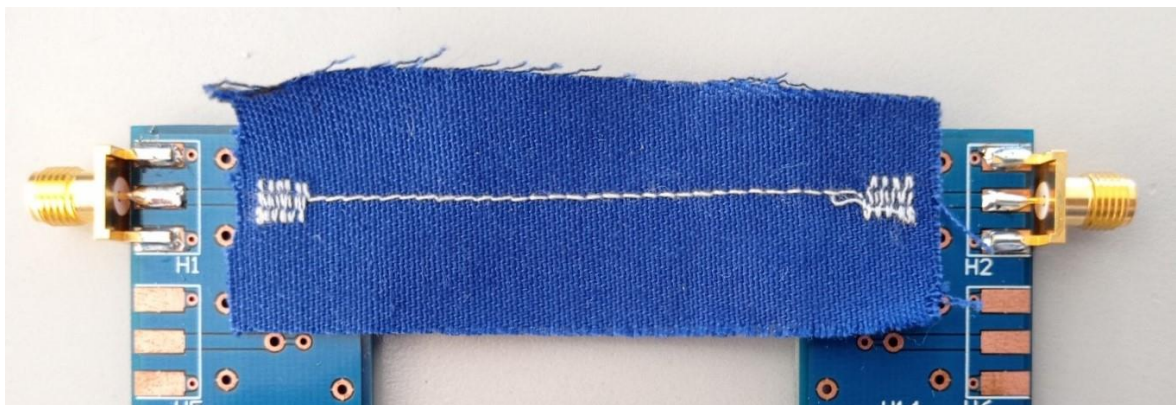


Obr. 63 - působení suchého tepla - ultrazvukové svařování

S ohledem na vysoké hodnoty naměřených útlumů nebyl již další klimatické zkoušky prováděny.

5.1.5 Lepení

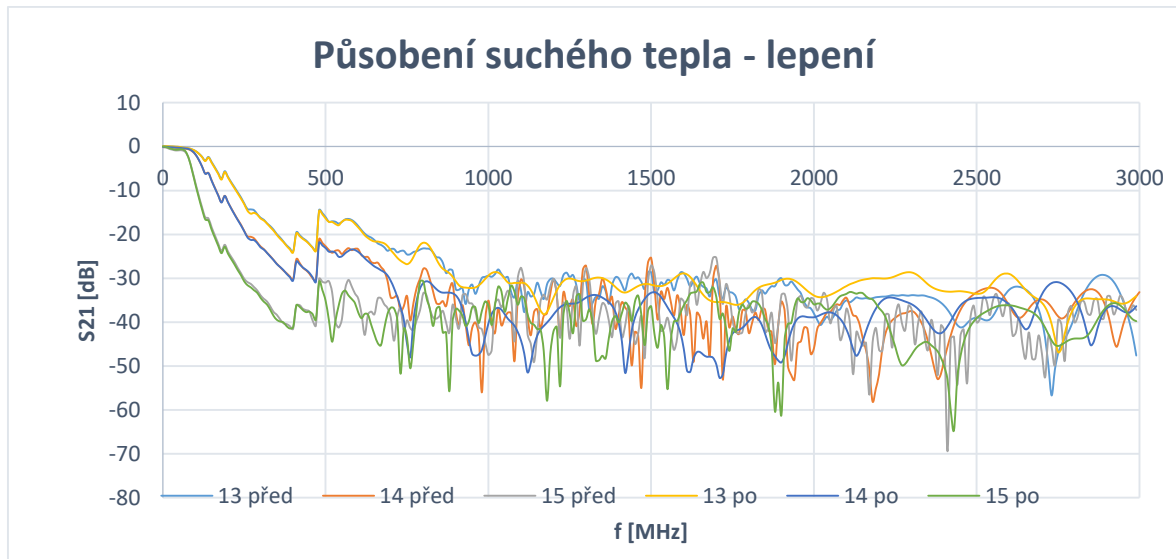
K vytvoření kontaktu bylo použito stříbrné vodivé epoxidové lepidlo 8331S a vytvrzeno při 80 °C po dobu 1 hodiny. Na Obr. 64 je zobrazen přilepený kontakt vodivou stranou vytvořenou stříbrnou hybridní šicí nití k testovacímu plošnému spoji. Hodnoty naměřeného odporu byly v rozmezí 0,4 – 0,5 Ω . Vzorky, které byly vytvořeny pomocí lepení, byly označeny jako vzorky 13-15.



Obr. 64 - spoj vytvoření pomocí vodivého lepidla

Z výsledků získaných při zkoušce vlivu působení suchého tepla na kontakt vytvořený stříbrným vodivým epoxidovým lepidlem je patrné, že výsledky parametru S_{21} v závislosti

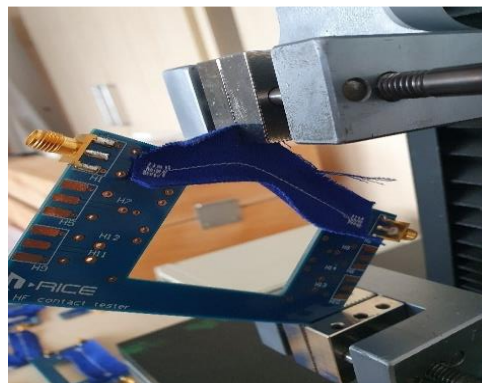
na frekvenci se pohybují mezi hodnotami -26,47 dB a -69,41 dB. Tyto hodnoty dokazují, že vytvořené kontakty vodivým lepidlem u těchto vzorků nejsou pro účely přenosu vysokofrekvenčního signálu vhodné. S ohledem na velmi špatné naměřené výsledky, kdy dochází k velkému útlumu přenášeného signálu, nebyly provedeny další klimatické zkoušky.



Obr. 65 - působení suchého tepla – lepení

5.1.6 Trhací zkouška

K otestování kvality provedení kontaktu byla provedena trhací zkouška. K provedení tohoto testu bylo využito univerzální trhací zařízení Labortech 3.030 popsané v kapitole 4.3.2. Pro komplexnější otestování kvality provedených kontaktů, byly vzorky v trhacím zařízení umístěny tak, aby se zjistila síla nutná k odtržení kontaktu od plošného spoje pro tři různé situace. V první situaci trhací síla působila na oba dva kontakty rovnoměrně (S) – čelisti trhacího zařízení byly uchyceny uprostřed vzorku. Další dvě situace testovali sílu nutnou k odtržení jednotlivých kontaktů – uchycení u pravého (P) nebo levého (L) kontaktu.



Obr. 66 - trhací zkouška

Tabulka 5 zobrazuje výsledky provedených trhacích zkoušek. Pro účely této analýzy byly zvoleny vzorky, které předtím podstoupily klimatické testy. Některé vzorky byly po klimatických testech, následnému skladování a přesunu poškozeny a některé kontakty se uvolnily ještě před provedením trhací zkoušky. Proto je u některých vzorků provedena pouze jedna trhací zkouška.

Tabulka 5 - výsledky trhací zkoušky

Číslo vzorku	Místo tahání	Síla[N]
1a	S(povolil P)	10
1b	L	4
2	L	5
3	S	2,5
4a	S(povolil v P)	77
4b	L	68
5	S	79
6a	S(povolil L)	88
6b	P	67
7a	S(povolil L)	9
7b	P	3
8	P	8
9a	S(povolil P)	4
9b	L	3
10	P	7
11a	S(povolil v L)	14
11b	P	9,3
12	S(L volné)	2
13a	S(povolil P)	15
13b	L	21
14a	S(povolil P)	71
14b	L	18
15	L	10

U pájených spojů (1-3) byl po předchozích testech poškozen vzorek 2 a u vzorku 3 došlo k odtržení obou kontaktů po první trhací zkoušce.

Přišité vzorky (4-6) dosáhly nejlepších výsledků. K odtržení vytvořených spojů bylo zapotřebí vyvinou sílu od 67 do 88 N. U vzorku 5 se při první zkoušce povedlo odtrhnout

oba dva kontakty. Nižší hodnoty nutné síly k odtržení pro vzork 4b a 6b bylo způsobeno předchozím namáhání ve směru S.

U kontaktů vytvořených pomocí odporového svařování (7-9) došlo u vzorků 8 a 9 k neporušení vytvořeného spoje, ale utrhlo se okolí těchto spojů a tím došlo k přerušení vodivého kontaktu.

Kontakty vytvořené pomocí technologie ultrazvuku (10-12) byly otestovány jako další. Jak je z výsledků patrné u vzorku 11a bylo zapotřebí síly 14 N k odtržení jednoho kontaktu (odtrhl se kontakt L) při trhání ze středu vzorku. Pro následné odtržení (11b) kontaktu P bylo zapotřebí jen 9,3 N. Vzorek číslo 12, byl po provedení klimatických zkoušek, následnému skladování a přesunu poškozen, kdy se kontakt L uvolnil.

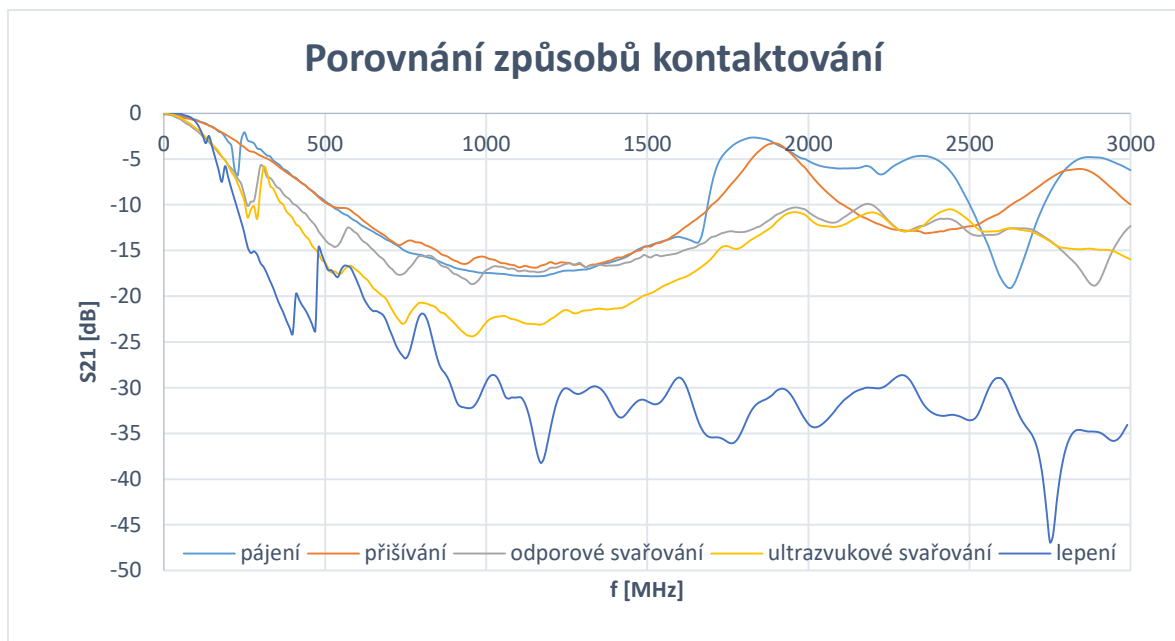
Spoje vytvořené s využitím vodivého epoxidového lepidla (13-15) vykazovali velmi rozdílné výsledky, pro odtržení vzorku 13a bylo zapotřebí 15N, ale u vzorku 14a byla nutná síla 71N. Vzorek 15 byl opět po předchozím testování poškozen.

5.1.7 Porovnání způsobů kontaktování

Zkoušky, které byly provedeny k otestování přenosových vlastností, ukázaly zajímavé výsledky. Tyto výsledky (zobrazeny na Obr. 67) lze rozdělit do třech kategorií. Do první kategorie patří technologie pájení a přišívání, které dosáhly nejlepších výsledků a lze je tedy doporučit pro kontaktování antén na textilní bázi. Hodnoty parametru S_{21} pohybující se okolo -3 dB jsou v porovnání s konvenčně vytvořenými přenosovými linkami vysoké, ale takto vytvořené přenosové linky jsou velmi těžko použitelné v oblasti smart textilií. Druhou kategorií tvoří technologie odporového a ultrazvukového svařování, které dosáhly obdobných výsledků, Nicméně výsledky, kdy se parametr S_{21} pohybuje okolo -10 dB, jsou již velmi těžko použitelné pro vytvoření kontaktu přenášející vysokofrekvenčního signálu. Ve třetí kategorii je lepení, které se daleko odlišuje od ostatních technologií a je v porovnání s ostatními technologiemi nepoužitelné pro přenos vysokofrekvenčního signálu.

Klimatické zkoušky ukázaly, že mají vliv na změny přenosových vlastností prakticky pouze při použití vodivého epoxidového lepidla, u ostatních technologií byl vliv minimální.

Při zkoumání mechanické odolnosti kontaktu, tedy trhací zkoušky bylo dle očekávání dosaženo nejlepších výsledků u vzorků, které byly přišívané. Výsledky byly v porovnání s ostatními metodami nejstabilnější. Nejmenší potřebná síla k odtržení byla 67 N a nejvyšší 88 N. Druhý nejpevnější kontakt byl vytvořen pomocí vodivého epoxidového lepidla, zde je ale znatelný velký rozptyl hodnot (10 – 71 N). Ostatní metody nepřinesly pevné ani stabilní kontakty.



Obr. 67 - porovnání způsobů kontaktování

5.2 Realizace antén s využitím textilních technologií

Hlavní částí této dizertační práce byla realizace antén s využitím textilních technologií. Mezi tyto technologie (popsané v kapitole 4.1) patří vyšívání, tiskové technologie nebo termokompresní laminace. Další možností jak vyrobit anténu na textilní bázi je kombinace více textilních technologií, taková antén je v této práci nazvána jako hybridně vytvořená textilní anténa. Jako substrát pro výrobu textilních antén v této práci byla použita meta-aramidová textilie Dupont Nomex.

Druhy antén vybraných k realizaci pomocí textilních technologií jsou stručně popsány v kapitole 2.3.

5.2.1 Realizované textilní antény

V této podkapitole jsou diskutovány návrhy realizovaných antén vhodných pro využití textilních technologií. Pro návrhy bylo zapotřebí nejdříve zvolit frekvenci, na které by měly realizované antény pracovat. Uvažované byly nelicencované frekvence z ISM pásem (**Tabulka 2**). Zde přicházeli v úvahu frekvence 433,92 MHz, 868 MHz a 2,45 GHz. S ohledem na použití textilních antén jako nostilných bylo nutné při výběru zohlednit teoretické rozměry navrhovaných antén. Pro frekvenci 433,92 MHz byla vypočítána celková délka antény na 33 cm (počítáno pro dipólovou anténu), pro frekvenci 868 MHz vychází celková délka antény 16 cm a pro frekvenci 2,45 GHz je délka antény 6 cm. Pro realizaci s využitím textilních technologií byla vybrána jako vhodná frekvence 868 MHz. Na této frekvenci je teoreticky možná komunikace na vzdálenost 500 m.

Anténa funguje jako otevřený rezonanční obvod, kde indukčnost a kapacitu nahrazuje vodič (přesněji jeho délka a průměr). Délka vodiče musí být ekvivalentem obvodu RLC, který je v rezonanci, neboli délka vodiče musí být násobkem vlnové délky. Níže uvedený vzorec vyjadřuje vzájemnou závislost mezi kmitočtem v rezonančním obvodu, indukčností a kapacitou.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

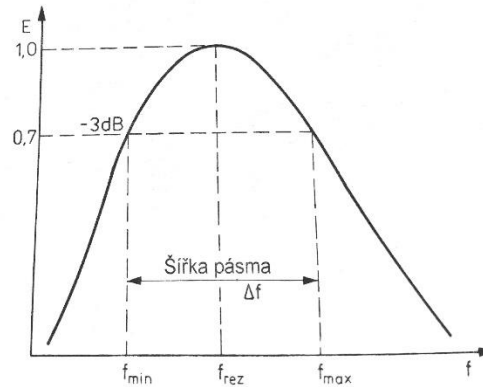
kde:

f – kmitočet [Hz]

L – indukčnost [H]

C – kapacita [F]

I přes vlastní rezonanční kmitočet anténa pracuje efektivně pouze v určitém pásmu. Na Obr. 68 je znázorněna závislost normované hodnoty intenzity elektromagnetického pole E na kmitočtu f. Na úrovni -3 dB na průběhu lze označit body f_{\min} a f_{\max} . Hodnota -3 dB zde má srovnávací funkci, násobek 0,7 vyplývá z logaritmického výpočtu napětí v decibelech. Šířku pásma kmitočtů antén ovlivňují jejich fyzické rozměry (délka, tloušťka a výška) [17].



Obr. 68 - Šířka pásma antény [17]

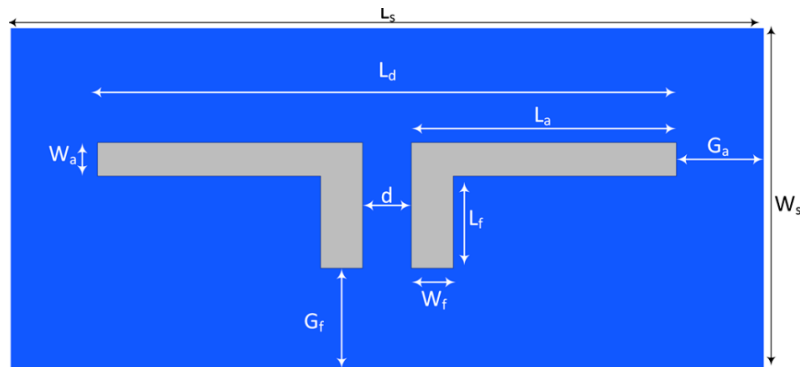
Dipól

Pro experimentální realizaci vyšívané dipólové antény bylo nutné navrhnout rozměry antény. Cílovou frekvencí jak již bylo uvedeno výše, na které měla dipólová anténa pracovat, bylo ISM pásmo 868 MHz. Celková elektrická délka dipólu byla vypočítána dle rovnice 8.

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2 \cdot f} = \frac{299\,792\,458}{2 \cdot 868 \cdot 10^6} = 0.1736 \text{ m} \Rightarrow 17.36 \text{ cm} \quad (8)$$

Elektrická délka jednoho ramene by odpovídala 8,68 cm. Pro zjištění mechanické délky je zapotřebí vynásobit elektrickou délku činitelem zkrácení. Pro běžně používané materiály pro výrobu antén nabývá činitel zkrácení hodnot od 0,9 do 0,98. Pro materiály využití v této práci není činitel zkrácení znám a proto byl pro počáteční testy zanedbán.

Vypočtená velikost antény je tedy pouze teoretická a pro účely využití technologií využitelných pro realizaci textilních antén bylo zapotřebí upravit velikost antény. Experimentálně bylo dosaženo délky jednoho ramena 5 cm. Jednoduchých výpočtem vychází hodnota činitele zkrácení 0,57. V Tabulka 6 jsou uvedeny kompletní rozměry testovaných dipólových antén dle geometrie zobrazené na Obr. 69.



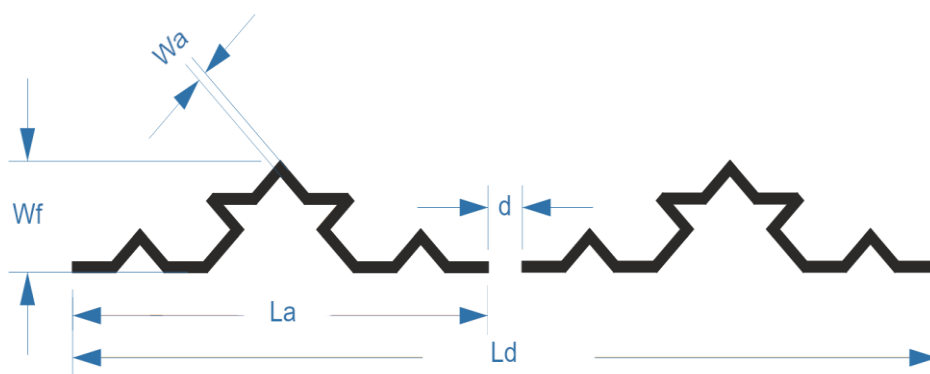
Obr. 69 - geometrie dipólu

Tabulka 6 - rozměry dipólu

Prototyp antény	Dipól
La (mm)	53
Ld (mm)	110
Lf (mm)	25
Wf (mm)	5
Wa (mm)	5
d (mm)	4,5
Ga (mm)	21
Gf (mm)	8
Ls (mm)	152
Ws (mm)	53

Fraktální dipól - Van Kochova křivka

Na Obr. 70 je zobrazena geometrie fraktálního dipólu vycházejícího z Van Kochovi křivky. S ohledem na absenci návrhových pravidel pro textilní antény, v tomto případě fraktální dipól byly rozměry zvoleny experimentálně. Pro určení rozměrů byly využity podobné rozměry jako u klasického dipólu. Porovnání rozměrů mezi klasickým a fraktální dipólem je provedeno v Tabulka 7.



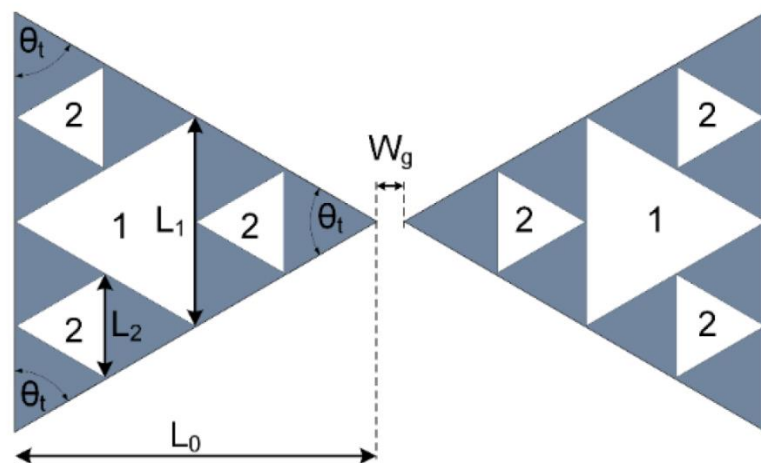
Obr. 70 - geometrie fraktálního dipólu

Tabulka 7 - parametry klasický x fraktální dipól

Dipól	klasický	fraktální
Ld (mm)	171	167
La (mm)	83	81
Wa (mm)	5	5
d (mm)	5	5
Wf (mm)	20	35

Bow tie

Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.3, bow tie nebo také motýlková anténa je fraktálovým typem antény a vychází z antény dipólové. Počet iterací N je v tomto případě, zejména kvůli technologickým omezením roven 2. Předpokládáme, že celková plocha původního trojúhelníku je rovna 1, potom plocha $A_2 = 1/4 + 3/16$ je odstraněna po druhé iteraci. Na Obr. 71 pro prvotní porovnání elektrických vlastností bow tie antény, byly experimentálně navrženy rozměry dle Tabulka 8. Optimalizování rozměrů a analýza vlivu technologie realizace na elektrické parametry bow tie antény je provedeno v kapitole 5.3.

**Obr. 71 - Geometrické uspořádání bowtie antény**

Tabulka 8 - parametry bow tie antény

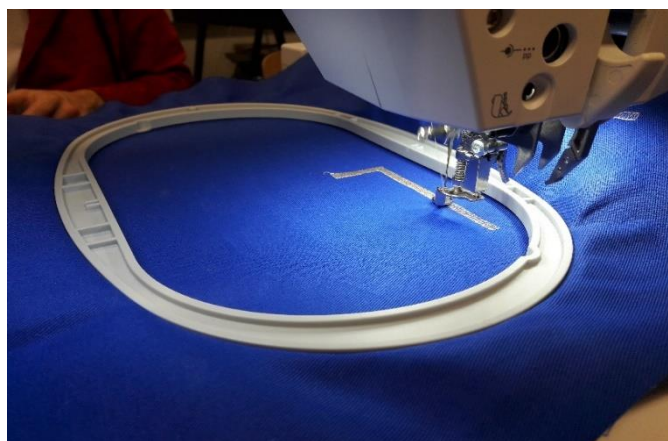
Prototyp antény	Bow tie
L_0 (mm)	50
L_1 (mm)	24
L_2 (mm)	10
w_g (mm)	3
Θ_t (deg)	60

5.2.2 Vyšívání antény

V rámci této práce bylo navrženo a vyrobeno několik druhů antén vhodných pro využití technologie vyšívání. Vyšívání je mechanicky náročný postup, se kterým nejde dosáhnout příliš malých rozměrů výšivky (v porovnání například s tištěnou anténou nebo anténou vyrobenou na plošném spoji fotocestou), z důvodů technologických omezení jako je velikost šicí jehly, minimální délka stehu či vzdálenost mezi dvěma stehy.

Prvním typem antény, který byl vyšit, byl dobře známý dipól, a to s ohledem na jeho jednoduchou konstrukci. Dalším typem byla fraktální bow-tie anténa a fraktální anténa, jejíž konstrukce byla založena fraktální Van Kochově křivce.

Pro vyšití všech typů antén byl použit šicí stroj Bernina QE750 (viz kapitola 4.1.2) a hybridních šicí nitě, popsané v kapitole 4.1.2, první byla stříbrná (S) šicí niť Clevertex, druhou byla mosazná (B) šicí niť. Na Obr. 72 je zobrazen vyšívací proces, konkrétně vyšívání dipólové antény. Substrát, tedy textilie musí být pro účely vyšívání upevněna a vyrovnána v rámu vyšívacího stroje, poté může začít počítačem řízené vyšívání antény. Celý proces vyšívání je detailněji popsán v kapitole 4.1.2.



Obr. 72 - ukázka vyšívacího procesu

Dipól

První zkoumanou vyšívanou anténou byl dipól dle návrhu v předchozí kapitole. Vyšitá dipólová anténa je zobrazena na Obr. 73. Jako substrát byl použit Dupont Nomex a pro vyšití byla zvolena mosazná hybridní šicí nit' vzor 25A. Z důvodu porovnávání vyšívaného dipólu s dipólem realizovaným ostatními textilními technologiemi byla zvolena vysoká hustota výšivky, tak aby bylo dosaženo co nejvíce homogenního povrchu výšivky. S ohledem na omezení vyšivacího procesu byly nastaveny parametry vysoké hustoty výšivky na délku stehu 2 mm při vzdálenosti mezi stehy 0,1 mm.



Obr. 73 - vyšitá dipólová anténa

Díky obsahu mosazných mikrodrátků v hybridní šicí niti lze na výšivku snadno pájet. Pro účely měření byl k vyšité anténě ručně připájen olovnatou pájkou koaxiální kabel RG316 opatřený konektorem typu SMA, který lze připojit k měřicím přístrojům. Naměřené výsledky, jejich grafické znázornění a porovnání s ostatními technologiemi je zobrazeno v kapitole 5.2.6

Fraktální dipól - Van Kochova křivka

Další zkoumanou anténou byl fraktální dipól, vycházející z Van Kochovi křivky (popsána v kapitole 2.3). V porovnání s klasickým dipólem má tento fraktální dipól při stejné absolutní šířce delší vodivou část jednotlivých ramen. Použití fraktálního dipólu tedy vede ke zmenšování absolutní potřebné šířky antény. Pro analyzování vlastností fraktálního dipólu byly vyšity vzorky mosaznou hybridní šicí nití vzor 25A. Pro srovnání byl vyšit i klasický dipól. Rozměry analyzovaných dipólů (zobrazeny v Tabulka 7) se blížily teoretickým výpočtům bez zohlednění vlivu vyšívání.



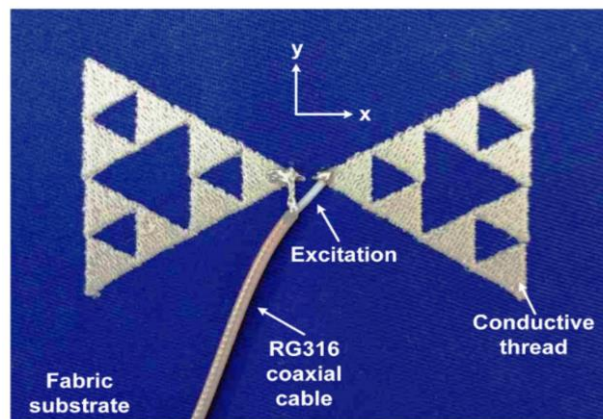
Obr. 74 - vyšitý fraktální dipól

Stejně jako i dipólu byl pro účely měření ručním pájením připojen koaxiální kabel RG316. Naměřené výsledky a grafické srovnání navrhovaných antén je zobrazeno v kapitole 5.2.6.

Bow-tie

Pro srovnání elektrických parametrů vyšívané bow tie antény s bow tie anténami realizovaných pomocí ostatních textilních technologií byla anténa vyšita podle rozměrů uvedených v Tabulka 8. Pro vyšití této srovnávací antény byla zvolena hybridní stříbrná šicí niť vzor 53.

Dále bylo za účelem prozkoumání vlivu vyšívací techniky na elektrické parametry antény vyšito sedm podobných, odlišných v rozměrech a hustotě výšivky (podle vzoru na Obr. 71) s parametry uvedených v Tabulka 13. Tyto testované prototypové antény byly vyrobeny s využitím různých šicích nití, druhem výšivky, hustotou výšivky a rozměrů. Parametry vyšitých antén jsou uvedeny v Tabulka 13. L_0 uvádí délku strany původního trojúhelníku, L_1 a L_2 uvádějí délku strany trojúhelníku po první a druhé iteraci. Pro vyšití bow-tie antén byly použity dva typy hybridních šicích nití, popsaných v kapitole 4.1.2, první byla stříbrná (S) šicí niť Clevertex, druhou byla mosazná (B) šicí niť.



Obr. 75 - ukázka způsobu připojení vyšívané bow-tie antény

Na Obr. 75 je zobrazeno připojení vyšité bow-tie antény ke koaxiálnímu kabelu pro účely měření. V tomto případě byl koaxiální kabel ručně připájen olovnatou pájkou. Tento způsob je možný díky obsahu kovových drátků v hybridní šicí niti.

5.2.3 Tištěné antény

Jelikož pro oblast smart textilií, kam patří i textilní antény, je nezbytná flexibilita byla pro výrobu tištěných antén využita flexibilní stříbrná pasta PE-AG530 od společnosti Applied Ink Solutions s povrchovou rezistivitou menší než $0,0025 \Omega/\square$. Jako substrát byla opět použita meta-aramidová textilie Dupont Nomex.

Aby se vyřešil problém s prosáknutím tištěného motivu do struktury textilního substrátu a nerovností natištěného motivu, byla nejdříve natištěna podkladová vrstva flexibilním nevodivým nátěrem EXP 2649-39. Tento podklad byl natisknut ve třech tenkých vrstvách a poté vytvrzen pomocí UV záření. Natištění tohoto podkladu také sníží spotřebu vodivého materiálu potřebného k výrobě tištěné antény. Následně byly natištěny tři vrstvy vodivou stříbrnou pastou a následně byla vytvořena vodivá pasta při $130 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 10 minut. Pro zvýšení odolnosti vůči vnějším vlivům může být následně natisknuta další vrstva impregnačního materiálu. Příklad natištěné antény je zobrazen na Obr. 76. Záměrně byl zvolen vzorek s nižším počtem natištěných vrstev, tak aby byla patrná nutnost tisku více vrstev. Nedokonalost při tisku menšího počtu vrstev je zde vidět v pravém rameni dipólové antény kdy vodivá vrstva nepokrývá homogenně celý motiv.

Pro účely srovnání technologií realizace textilních antén byly natištěny dipólová a fraktální bow tie anténa. Byly zvoleny stejné rozměry jako u vyšívaných verzí těchto antén. Připojení měřicího koaxiálního kabelu bylo v tomto případě provedeno pomocí stříbrného epoxidového lepidla.

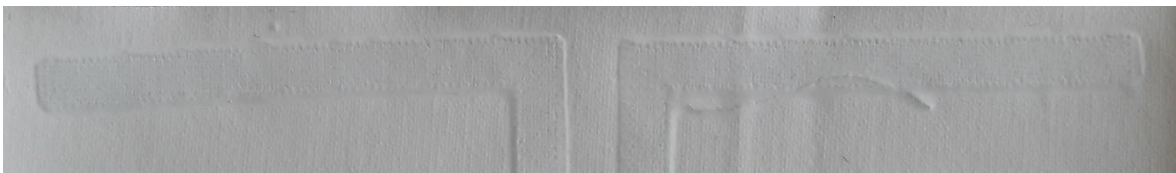


Obr. 76 - dipólová anténa vyrobená pomocí sítotisku

Naměřené hodnoty a grafické porovnání tištěných antén s anténami realizovanými ostatními technologiemi je znázorněno v kapitole 5.2.6.

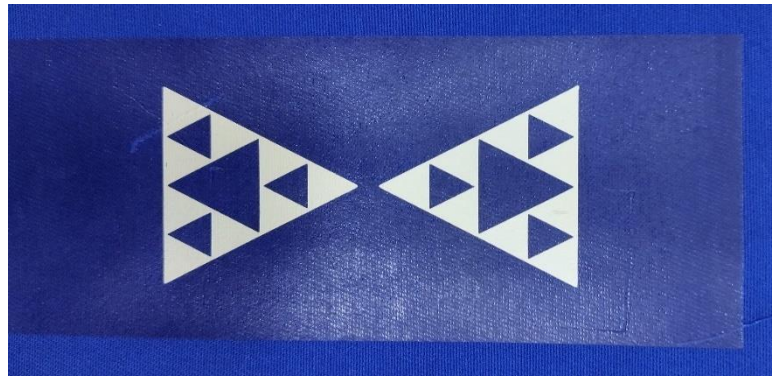
5.2.4 Laminované antény

Další možností jak vytvořit textilní anténu je využití technologie laminace. U laminace jsou obecně dva způsoby výroby, které lze využít. První a více náročný způsob, je využití vodivé látky, která je následně nalaminována pomocí fólie na textil. V tomto experimentu byla použita vodivá látka SHIELDEX Kassel o tloušťce $0,11 \text{ mm} \pm 10 \%$. Z této vodivé látky bylo zapotřebí pomocí řezacího plotru vyříznout motiv dipólové antény. Následně se vyřezaný motiv umístil na vybraný substrát a překryl se zažehlovací nevodivou folií Strechflex. Mezi nevýhody této metody patří komplikované sesazení, neboť vodivý motiv není nijak fixován k substrátu a problematické kontaktování z důvodu překrytí vodivého materiálu nevodivou folií. Rozměry laminovaného dipólu byly z důvodu porovnání zvoleny stejné jako u vyšívaného dipólu (Tabulka 6).



Obr. 77 - laminovaný dipól

Další možností realizace textilní antény s využitím laminace je natisknutí vodivého materiálu na nevodivou přenosovou folii, která je následně nalaminována s motivem na substrát. V tomto experimentu byla zvolena přenosová folie DuPont Intexar, na kterou byl motiv bow tie antény (o stejných rozměrech jako vyšívaná verze) natištěn pomocí vodivé stříbrné pasty. DuPont Intexar je vícevrstvá TPU folie o tloušťce $100 \mu\text{m}$. Teplota potřebná k přenosu je $130 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 15 s. Tato metoda je méně komplikovaná, ale přináší opět problémy s kontaktováním, neboť laminace probíhá vodivým motivem na substrát. Pro kontaktování je tedy zapotřebí narušit vrstvu laminované folie.



Obr. 78 laminovaná bow tie anténa

Výsledky jsou porovnány s ostatními technologiemi v kapitole 5.2.6.

5.2.5 Hybridně vytvořené textilní antény

Antény, které jsou v této práci nazývány jako hybridně vytvořené, byly vyrobeny pomocí kombinace technologie vyšívání a sítotisku. Na Obr. 79 je zobrazena struktura hybridní antény natištěné na substrátu NOMEX. Nejdříve byl sítotiskovým strojem EKRA E2 natisknut nevodivý nátěr EXP 2649-39 a poté byla flexibilní stříbrnou pastou PE-AG530 natištěna vodivá část antény. Následně přešitá šicím strojem Bernina QE750 s využitím stříbrné hybridní šicí nitě. Z ilustračních důvodů, tak aby byly vidět obě technologie, je zde zobrazena struktura antény, která nebyla správně sesazena. Finální verze hybridní textilní antény byla sesazena bez přesahů.

Hybridní textilní anténa byla vyrobena proto, aby kombinovala výhody technologií vyšívání a sítotisku a zároveň co nejvíce eliminovala jejich nevýhody.

Výhody hybridní antény – homogenní vrstva, zvýšená elektrická vodivost, zvýšená mechanická odolnost, stabilnější výsledky při ohybu, možnost pájet přímo na motiv

Nevýhody hybridní antény – složitá výroba, náročná časově, při přešívání dojde k poškození natištěné vrstvy



Obr. 79 – Struktura hybridní antény

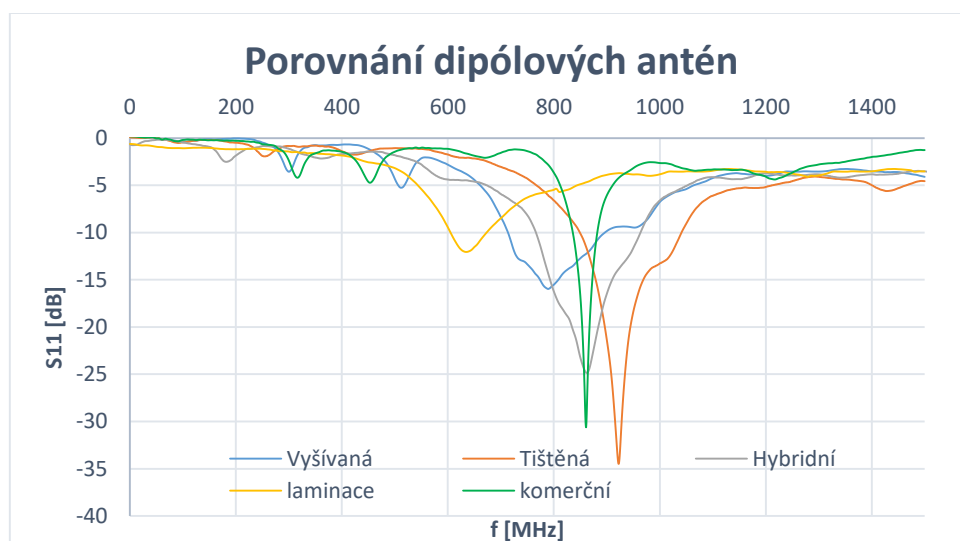
Porovnání hybridních antén s anténami vyrobenými jinými technologiemi je provedeno v kapitole 5.2.6.

5.2.6 Porovnání textilních antén

Tato kapitola je zaměřena na zobrazení a porovnání naměřených výsledků pro jednotlivé technologie vhodné k realizaci textilních antén. Jako první je porovnáván dipól ve všech jeho vyrobených verzích (vyšíváním, tiskem, laminací a hybridní realizací), následně je porovnávána bow tie anténa.

Dipól

Na Obr. 80 jsou graficky znázorněny průběhy závislosti činitele odrazu na frekvenci pro vyšívání, tištěný, laminovaný a hybridní dipól při zachování stejných rozměrů. Z Tabulka 9 vyplývá, že vyšívaná, tištěná a hybridní anténa dokáže pracovat v obou ISM pásmech. Vyšívání dipól dosahuje ze všech porovnávaných antén nejhoršího parametru S_{11} , ale naopak má největší šířku pásma. Opačných výsledků dosahuje tištěný dipól, má z textilních antén nejmenší šířku pásma a nejlepší hodnotu činitele odrazu. Lepší hodnotu činitele odrazu dosahuje pouze komerčně dostupný dipól, ten má ale rapidně menší šířku pásma. Hybridní dipólová anténa se výsledkově nachází mezi vyšívanou a tištěnou anténou. Dle očekávání došlo díky spojení technologií ke zlepšení činitele odrazu oproti vyšívání (o 8,83 dB) a rozšíření šířky pásma oproti tisku (o 22 MHz). Laminovaný dipól je zcela mimo ostatní výsledky a nedosahuje výsledků, pro které by se tento způsob realizace textilní antény dal doporučit.



Obr. 80 - porovnání dipólových antén

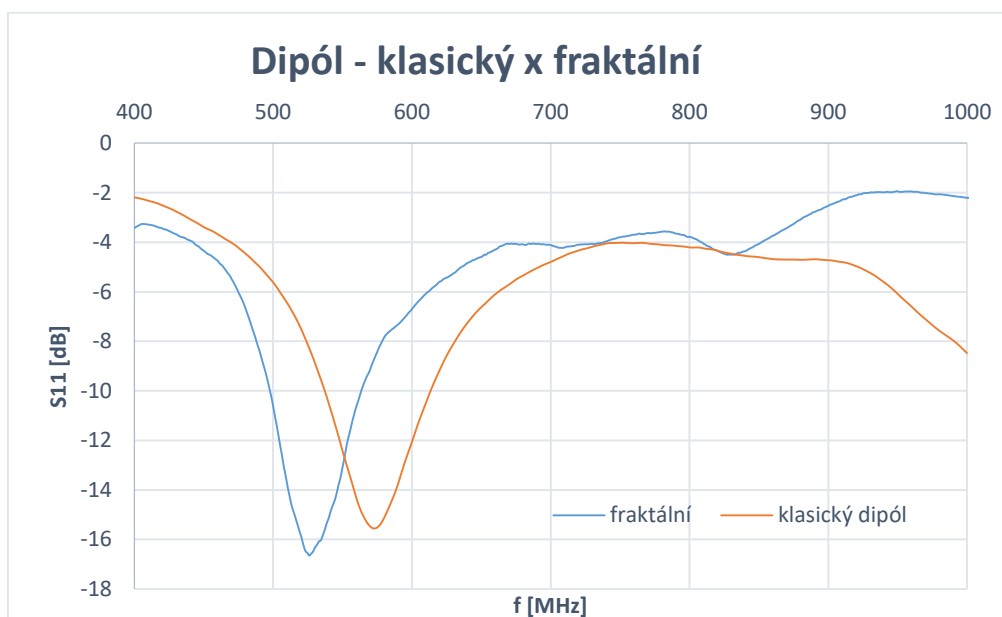
Z výsledků je patrné, že hybridně vytvořená antén je kompromis mezi vyšívanou a tištěnou anténou. Při zlepšení mechanických vlastností se tedy jedná o vhodnou technologii výroby textilní antény.

Tabulka 9 - Hodnoty dipólových antén

Prototyp antény	Vyšitý dipól	Tištěný dipól	Hybridní dipól	Laminovaný dipól	Komerční dipól
f_c (MHz)	790	921	863	635	861
S_{11} (dB) @ f_c	-15,97	-34,3	-24,8	-12	-30,6
f_1 (MHz)	715	859	765	605	836
f_2 (MHz)	920	1030	961	675	881
-10 dB BW (MHz)	205	174	196	70	45

Fraktální dipól – Van Kochova křivka

Na Obr. 81 jsou zobrazeny závislosti činitele odrazu na frekvenci pro klasický a fraktální dipól s rozměry vycházejícími z teoretických výpočtů. Z výsledků je patrné, že fraktální dipól v porovnání s klasickým má posunutou f_c o 49 MHz a zlepšený parametr S_{11} . Tento rozdíl je dán většími rozměry jednotlivých ramen oproti klasickému dipólu. Pro dosažení stejných výsledků je tedy nutné zmenšit rozměry fraktálního dipólu. Tato změna může být žádoucí s ohledem na úsporu prostoru.



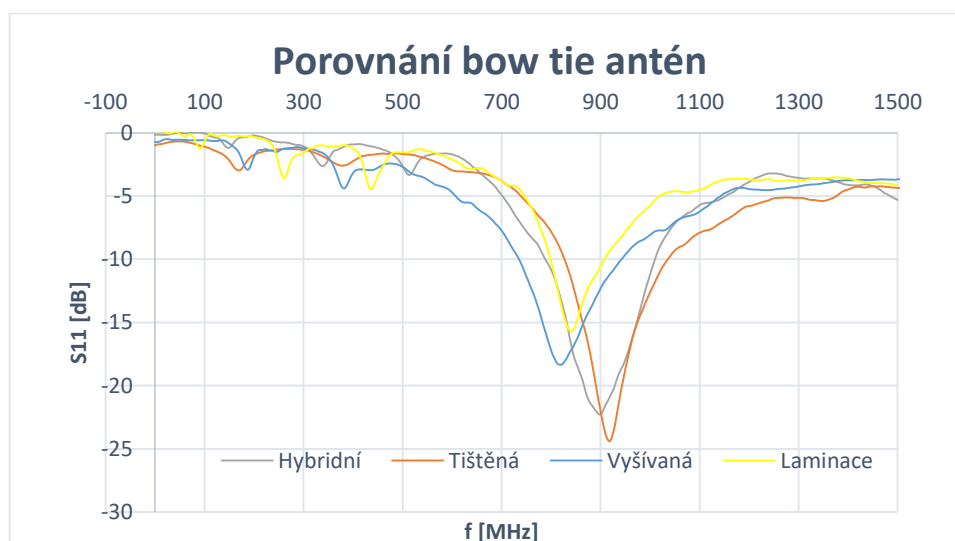
Obr. 81 - dipól - klasický x fraktální

Tabulka 10 - naměřené hodnoty dipólů

Druhy dipólu	klasický	fraktální
f_c (MHz)	575	526
S_{11} (dB) @ f_c	-15,7	-16,4
f_1 (MHz)	538	498
f_2 (MHz)	613	563
SWR @ f_c	1,29	1,37
-10 dB BW (MHz)	75	65

Bow tie

Na Obr. 82 je zobrazena závislost činitele odrazu na frekvenci vyšívané, tištěné a hybridně vytvořené bow tie antény, při zachování stejných rozměrů. Z výsledků v Tabulka 11 je patrné, že všechny porovnávané antény jsou schopné pracovat v obou ISM pásmech (ač hraničně). U hybridně vytvořené bow tie antény došlo k posunu frekvence, rozšíření šířky pásma (o 4 MHz oproti tištěné verzi) a zlepšení činitele odrazu (o 4 dB oproti vyšívané verzi). Toto zlepšení bylo očekávané, neboť z předchozích experimentů vyplývalo, že tištěné anténa má menší šířku pásma a vyšší hodnoty parametru S_{11} , vyšívaná anténa má naopak větší šířku pásma, ale dosahuje horších výsledků parametru S_{11} . Laminovaná bow tie anténa dokáže pracovat pouze v prvním ISM pásmu 868 MHz a obecně dosahuje v porovnání s ostatními technologiemi nejhorších výsledků. Toto je pravděpodobně způsobeno vytvořením kontaktu pomocí vodivého lepidla. Potenciál využití laminace je tedy spíše k realizaci hybridních antén nebo pro zvýšení mechanické odolnosti a odolnosti vůči vnějším vlivům na elektrické parametry antény.

**Obr. 82 - porovnání bow tie antén**

I v případě bow tie antény dosahuje hybridně vytvořená anténa kompromisem mezi vyšívanou a tištěnou verzí využívající výhod obou technologií.

Tabulka 11 - porovnání bow tie antén

Prototyp antény	Vyšívaná anténa	Tištěná anténa	Hybridní anténa	Laminovaná anténa
f_c (MHz)	820	917	900	835
S_{11} (dB) @ f_c	-18,3	-24,3	-22,3	-15,4
f_1 (MHz)	735	835	803	800
f_2 (MHz)	940	1029	1001	910
-10 dB BW (MHz)	205	194	198	110

5.3 Měření a simulace činitele odrazu na vstupu antény ve volném prostoru

Pro účely referenčního měření (simulace) činitele odrazu na vstupu antény ve volném prostoru bylo zvoleno prostředí s obvyklými podmínkami, tedy s teplotou 20 °C a vlhkostí vzduchu 67 %. Pro účely této analýzy byly použity vyšívané antény typu bow-tie v několika různých technologických provedeních, ty lze rozdělit podle:

- typu použité hybridní šicí nitě
- hustoty výšivky
- počtu vodivých vrstev

V rámci měření a simulace činitele odrazu na vstupu antény ve volném prostoru byly zvoleny hybridní šicí nitě, které obsahovaly postříbřenou měď a mosaz. Více informací o použitých nitích lze najít v kapitole 4.1.2. Dále byly zvoleny tři různé hustoty výšivky – nízká, střední a vysoká. Nízkou úroveň hustoty výšivky definuje vzdálenost mezi dvěma sousedními stehy 0,3 mm, pro střední úroveň hustoty výšivky je tato vzdálenost 0,2 mm a pro vysokou 0,1 mm (více v Tabulka 12). Antény byly vyrobeny s jednou a dvěma vodivými vrstvami. Jedna vodivá vrstva znamená, že pouze na vrchní vrstvu byla použita vodivá šicí nit, u dvou vodivých vrstev byla vodivá šicí nit použita jak na vrchní tak spodní vrstvu antény.

Tabulka 12 - parametry hustoty výšivek

Hustota výšivky	délka stehu [mm]	vzdálenost mezi stehy [mm]	spotřeba nitě [m]
nízká (LOW)	4	0,3	15,91
střední (MEDIUM)	3	0,2	20,84
vysoká (HIGH)	2	0,1	24,07

Geometrické parametry vyrobených antén jsou shrnuty v Tabulka 13. Symboly v označení prototypů antén mají následující význam, první písmeno označuje typ použité hybridní šicí nitě (S pro postříbřenou měď, B pro mosaz). Číslice značí počet vodivých vrstev. Písmeno na třetí pozici určuje hustotu výšivky. L (LOW) pro nízkou hustotu, M (MEDIUM) pro střední hustotu a H (HIGH) pro vysokou hustotu použité výšivky. Písmena „a“ a „b“ jsou zvolena pro odlišení antén vyšitých stejnou nití a se stejnou hustotou výšivky, ale s rozdílnými rozměry. Dále jsou v tabulce uvedeny hodnoty, které byly zvoleny jako nominální a hodnoty, které byly použity pro simulace. Jak je patrné, parametry vyšitých antén jsou rozdílné. V některých případech je tato variace zvolena záměrně k otestování odlišných parametrů, v dalších případech se jedná o technologické omezení, kdy vzhledem k celkové hustotě výšivky nelze odstranit variaci výsledků pod ± 1 mm.

Tabulka 13 - geometrické parametry vyšivaných antén

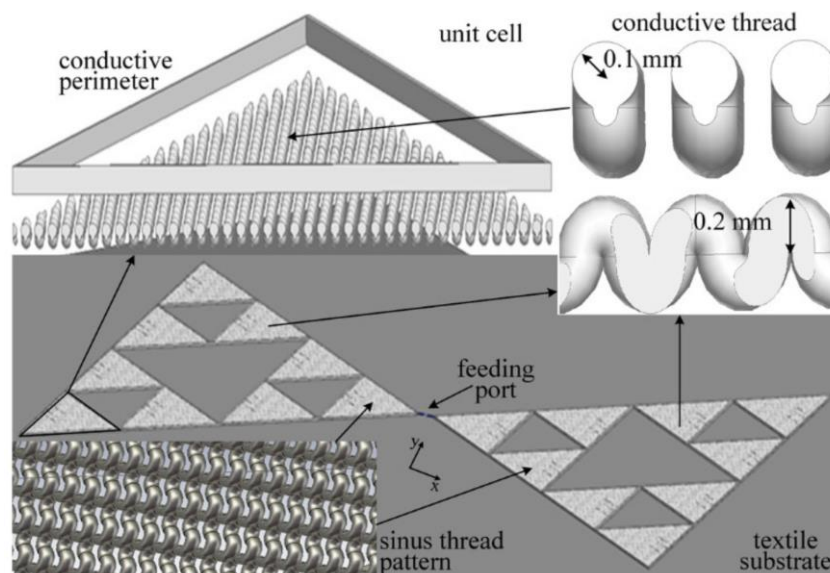
Prototyp antény	S1L	S1M	S1Ha	S1Hb	S2H	B1Ha	B1Hb	Nominální	Simulace
Typ nitě	S	S	S	S	S	B	B	-	S/B
Hustota výšivky	nízká	střední	vysoká	vysoká	vysoká	vysoká	vysoká	-	vysoká
Vodivá strana	1	1	1	1	2	1	1	-	1
L_0 (mm)	48,03	47,78	48,54	44,57	48,24	45,91	49,77	50	48
L_1 (mm)	22,23	21,91	21,41	19,98	22,22	21,36	23,89	23	24
L_2 (mm)	10,37	9,74	9,12	9,1	9,99	9,23	10,26	10	12
w_g (mm)	2,79	2,81	3,03	3,88	3,07	1,9	3,13	2,1	2,2
Θ_t (deg)	60,66	61,53	58,27	56,38	58,33	61,98	62,44	60	60

Dále bylo provedeno několik experimentální a simulačních testů s cílem analyzovat elektrické parametry vyšivané bow-tie antény v závislosti na použité hybridní šicí niti a hustotě výšivky.

Pro simulace byl využit softwarový nástroj CST Studio Suite 2021. Rozměry fraktální bow-tie antény založené na Sierpinského trojúhelníku odpovídali následující rovnici $L_0 = 2L_1 =$

4L₂. Model pro simulaci bow-tie antény nebyl obsažen v žádném komerčně dostupném softwaru a proto bylo nutné vytvořit model vlastní. Model byl založen na opakování „jednotkové buňky“ což byl rovnostranný trojúhelník o délce strany 12 mm, viz Obr. 83. Tento trojúhelník se skládá z linie stehů nestejně délky, které jsou navzájem rovnoběžné. Vzdálenost mezi sousedními liniemi je 0,1 mm (pro vysokou hustotu výšivky). Použitá nit' je vlastně válcovitého tvaru o poloměru 0,1 mm a je obšita kolem textilního substrátu sinusovým vzorem, který tvoří linie stehu. Vzdálenost mezi dvěma body, kde jehla pronikla textilním substrátem je 0,2 mm. Vodivý trojúhelníkový obvod o šířce 0,2 mm obklopuje vyšívání vzor tak aby všechny nitě napájel proudem. Jakmile je jednotková buňka hotová je replikovaná podle Sierpinského vzoru, tak aby vznikla kompletní vyšívání anténa.

Cílem bylo nasimulovat a vyšít bow-tie anténu, která by byla schopná pracovat v nelicencovaných ISM pásmech 868 MHz a 915 MHz. Postup návrhu byl inicializován pomocí převzatých parametrů z [36] pro jeho bow-tie anténu v mikropáskové podobě. Jelikož velikost L₀ a L₁ záleží na velikosti L₂, nejdůležitějšími návrhovými parametry jsou L₂ a w_g. Optimální hodnoty pro L₂ a w_g byly vyhodnoceny pomocí optimalizačního nástroje CST. Hodnoty všech parametrů získaných z programu CST jsou uvedeny v Tabulka 13 v posledním sloupci – simulace.



Obr. 83 - Zobrazení struktury bow-tie antény

Tabulka 14 zobrazuje naměřené a simulované charakteristiky prototypových antén ve volném prostoru. Je zde zobrazena rezonanční frekvence f_c , velikost parametru S_{11} , poměr napětí stojacích vln při rezonanční frekvenci f_c . Šířka pásma (BW) -10 dB je zde vyjádřeno v MHz a %, z této hodnoty vycházejí f_1 a f_2 . Určující spodní a horní hranici šířky pásma. Hodnoty byly naměřeny vektorovým analyzátozem HP 8714ET a pro kontrolní měření byl použit signálový analyzátor SPARQ-3002E.

Tabulka 14 - Naměřené a simulované charakteristiky prototypových antén ve volném prostoru

Prototyp antény	S1L	S1M	S1Ha	S1Hb	S2H	B1Ha	B1Hb	S-simulace	B-simulace
f_c (MHz)	963,2	949,1	957,2	975	970,2	948	860	918,3	912,4
S_{11} (dB) @ f_c	-18,7	-15,4	-16,1	-16	-21,9	-22,7	-23	-14,5	-15,4
VSWR @ f_c	1,26	1,41	1,37	1,35	1,2	1,17	1,16	1,46	1,41
f_1 (MHz)	868	861	841	900	910	840	740	863	855
f_2 (MHz)	1027	998	1007	1019	1048	1068	977	982	974
-10 dB BW (MHz)	159	137	166	119	138	228	237	119	119

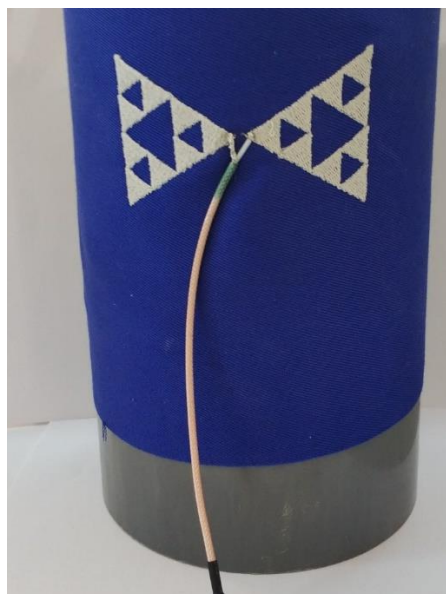
Z naměřených hodnot vyplývá, že všechny testované prototypové antény pokrývají nelicencované ISM pásmo 902 - 928 MHz. Elektrické parametry antény jsou závislé na geometrických a výrobních parametrech. Nicméně většina antén pokrývá také ISM pásmo 863-870 MHz. Z tabulky dále vyplývá, že naměřené hodnoty jsou lepší než hodnoty simulované. Například pro prototypovou anténu S1Ha je šířka pásma o 4,4% větší než šířka pásma, která byla simulovaná pro stříbrnou hybridní šicí nit'. Obecně lze říci, že antény vyrobené s využitím mosazné hybridní šicí nitě vykazují nižší hodnotu parametru S_{11} při rezonanční frekvenci f_c , ale šířka pásma je větší oproti anténám, pro které byla využita stříbrná hybridní šicí nit'. Například činitel odrazu S_{11} u antény B1Ha je o 6,5 dB lepší než u antény S1Ha, šířka pásma je také větší a to o 6,4%. Srovnání mezi anténami B1Ha a B1Hb ukazuje, že obě nabízejí relativně velkou šířku pásma podle činitele odrazu S_{11} obě fungují téměř stejně. Nižší rezonanční frekvence u antény B1Hb může být způsobena jeho, ač nepatrně většími rozměry. Naopak u porovnání antény S1Ha a S1Hb je vidět, že nepatrně větší rozměry antény S1Ha způsobí větší šířku pásma, lepší hodnotu S_{11} a pokrytí obou ISM pásem 868 a 915 MHz.

5.4 Analýza vlivů mechanického namáhání a vlivu prostředí, údržby na elektrické parametry antény

Pro analýzu vlivů mechanického namáhání, vlivu prostředí a údržby na elektrické parametry antény byla použita vyšívaná bow-tie anténa. Vzorky pro tyto testy byly vyšity pomocí stříbrné a mosazné hybridní šicí nitě ve dvou verzích. První verze byla vyšita tak, aby vodivá vrstva byla pouze na vrchní části antény. Druhá verze byla upravena a vyšita tak, aby vrchní i spodní část antény byla vodivá.

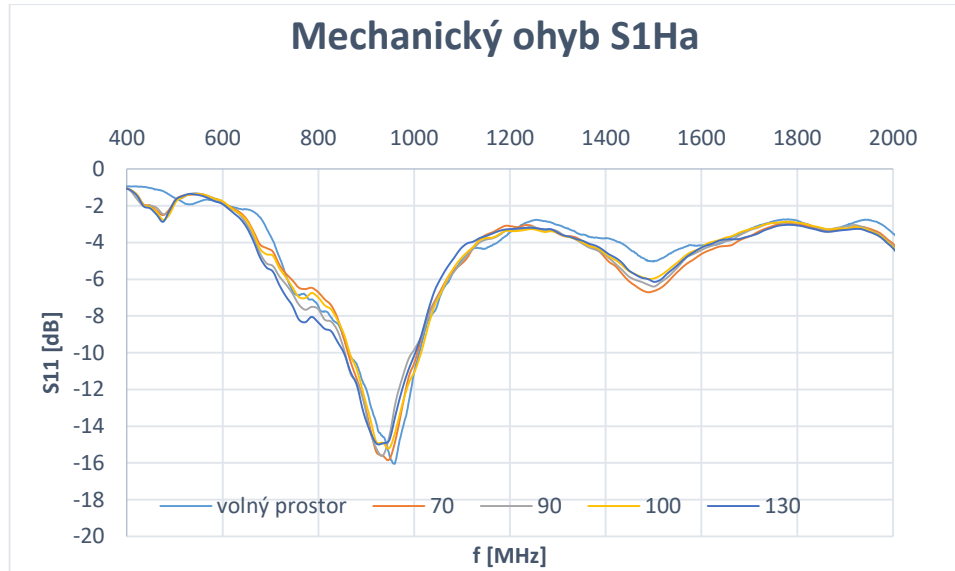
5.4.1 Vliv mechanického namáhání na elektrické parametry antény

Zkoumání vlivu mechanického namáhání na elektrické parametry antény bylo provedeno pro ohyby v obou osách, tedy v X a Y. Obr. 44 ukazuje způsoby, jakými byly provedeny testy mechanického namáhání. Mechanického ohybu bylo docíleno tak, že testovaná anténa byla umístěna na PVC válec o délce 50 cm a relativní permitivitou $\epsilon_r = 4$. V rámci provádění analýzy byly využity čtyři PVC válce o průměrech $d = 70, 90, 100, 130$ mm a o šířce stěny válců 2,2,3 a 4 mm. Příklad ohybu přes PVC válec je zobrazen na Obr. 84. Pro každou osu byl uvažován konkávní i konvexní směr ohybu. U konkávního ohybu byla na PVC válec přiložena nevodivá část vyšívané antény, u konvexního ohybu byla na PVC válec umístěna vodivá část testované vyšívané antény.



Obr. 84 - Ohyb vyšívané antény přes PVC válec

Pro účely ověření vlivu mechanického namáhání na elektrické parametry antény byly vybrány antény vyšité stříbrnou nití (S1Ha) a mosaznou (B1Ha). Na Obr. 85 jsou graficky zobrazeny naměřené hodnoty v závislosti na poloměru ohybu antény S1Ha pro konkávní ohyb v ose y.



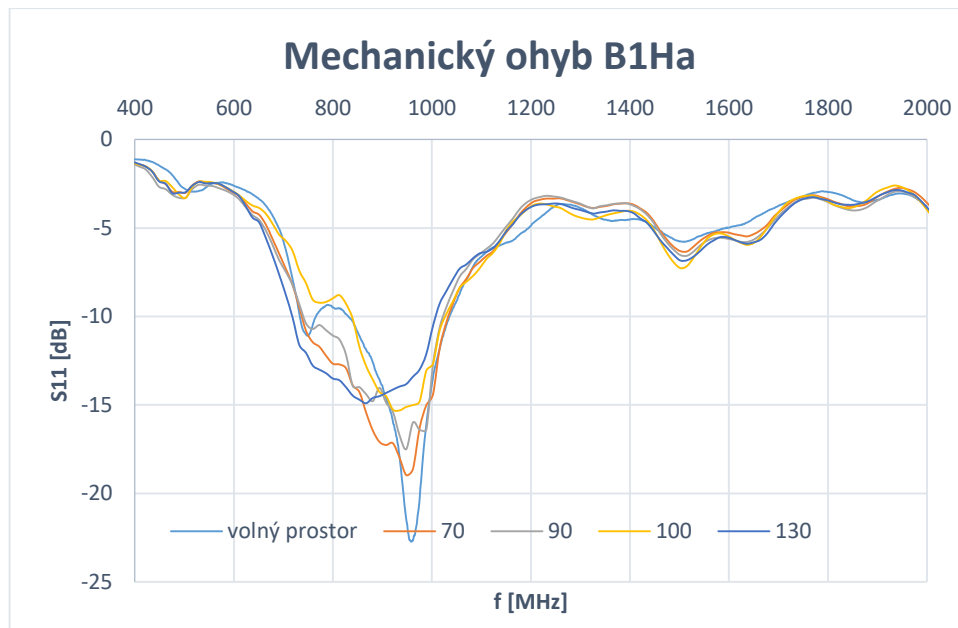
Obr. 85- mechanický ohyb S1Ha

Pro porovnání byla vynesena křivka naměřená pro danou anténu ve volném prostoru. Z výsledků v Tabulka 15 je patrné, že pro tuto anténu nemělo mechanické namáhání velký vliv. Ve všech případech (ač hraničně) dokáže tato zkoumaná anténa pracovat v obou ISM pásmech. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší frekvencí je pouze 13 MHz, rozdíl činitele odrazu je 1,16 dB. Rozdíl mezi šířkami pásma činí 11 MHz.

Tabulka 15 - S1Ha mechanický ohyb

Poloměr ohybu	volný prostor	70	90	100	130
f_c (MHz)	957,2	961	948	961	948
S_{11} (dB) @ f_c	-16,1	-15,8	-15,6	-15,2	-14,94
f_1 (MHz)	841	856	843	857	845
f_2 (MHz)	1007	1015	998	1015	1002
-10 dB BW (MHz)	166	159	155	158	157

Analýza mechanického namáhání antény B1Ha přineslo jak je patrné již z grafického znázornění rozdílnější výsledky, kde je vliv ohybu více znatelné než u antény S1Ha.



Obr. 86- mechanický ohyb B1Ha

Se zvyšujícím se poloměrem ohybu dochází jak k posunu rezonanční frekvence na nižší (961 MHz; 948 MHz; 921 MHz; 853 MHz), tak i snižování činitele odrazu (-18,6 dB; -17,5 dB; -15,2 dB; -14,7 dB). Ve všech situacích dokáže anténa pracovat v obou ISM pásmech, i když pro volný prostor a poloměr ohybu 100 mm se jedná o hraniční hodnoty. Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou rezonanční frekvence je 108 MHz a rozdíl mezi činiteli odrazu je 8 dB. Rozdíl šířek pásma činí 108 MHz. Rozdílné hodnoty oproti anténě S1Ha jsou pravděpodobně dány vyšším odporem mosazné hybridní šicí nitě a také její tuhostí, kdy není při ohýbání tak tvárná jako stříbrná šicí nit.

Tabulka 16 - B1Ha mechanický ohyb

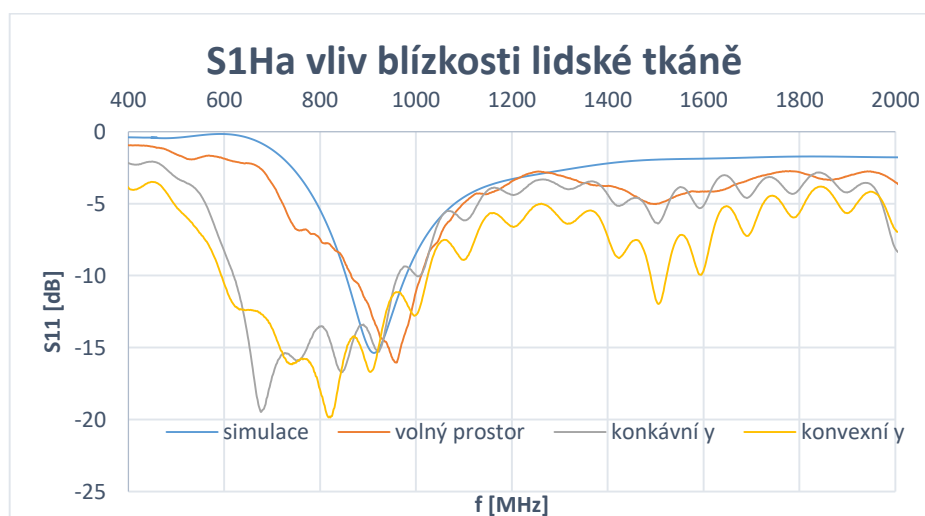
Poloměr ohybu	volný prostor	70	90	100	130
f_c (MHz)	948	961	948	921	853
S_{11} (dB) @ f_c	-22,7	-18,6	-17,5	-15,2	-14,7
f_1 (MHz)	840	745	745	840	718
f_2 (MHz)	1029	1029	1029	1029	1015
-10 dB BW (MHz)	189	284	284	189	297

5.4.2 Vliv lidského těla na elektrické parametry antény

Planární antény na textilní bázi jsou uvažovány jako nositelné, s tím souvisí zkoumání vlivu lidské tkáně na elektrické parametry překládaných antén. S rozvojem nositelné elektroniky došlo příchodu nového typu sítě zaměřující se na komunikaci zařízení, která se nacházejí v blízkosti lidské tkáně. Tato síť se označuje BAN, z anglického Body-Area Networks. Využití tohoto typu sítě se předpokládá pro sběr dat ve zdravotnictví, oblasti bezpečnostních složek či sportovních odvětvích. Síť BAN lze rozdělit na tři části, podle toho v jaké pozici jsou komunikační zařízení vůči lidskému tělu.

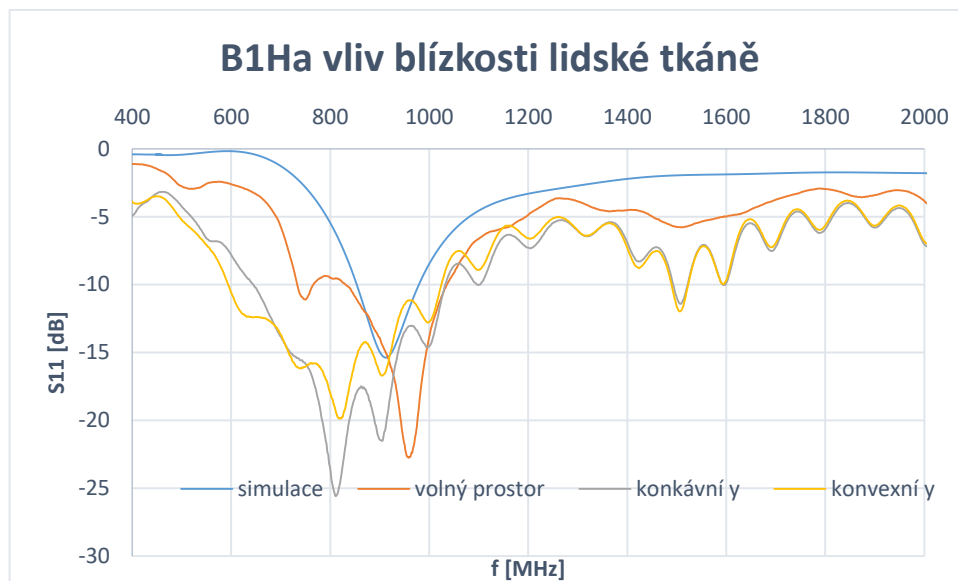
- On-Body – vysílací anténa a nadřazené zařízení jsou v blízkosti lidského těla, typicky přímo na lidském těle.
- Off-Body – v tomto případě, se nachází nadřazené zařízení vzdáleno od lidského těla
- In-Body – takovéto zařízení je přímo implantováno do lidského těla [22].

Pro analýzu vlivu toho jaký vliv má blízkost lidského těla na elektrické parametry byly zvoleny dvě antény typu bow-tie, jedna vyšitá stříbrnou hybridní šicí nití a druhou nití mosaznou. V rámci testování byly tyto antény přiloženy na lidské tělo, přesněji na pánský hrudník. Mezi hrudníkem a testovanou anténou bylo bavlněné triko z důvodu napodobení běžného použití nositelné antény. Na Obr. 87 a Obr. 88 je znázorněna velikost S_{11} bow-tie antén v závislosti na frekvenci. Šedá křivka zobrazuje případ, kdy byla anténa přiložena k hrudníku spodní nevodivou stranou (konkávní), žlutá křivka zobrazuje případ, kdy byla anténa přiložena vodivou stranou (konvexní) k hrudníku. Dále je v grafu pro srovnání vyneseno měření bow-tie antén ve volném prostoru a také simulace pro volný prostor.



Obr. 87 - vliv blízkosti lidské tkáně S11a

Na Obr. 87 je vidět, že rozmezí -10 dB šířky pásma se z původních 166 MHz (17,3%) u vyšívání antény ve volném prostoru se toto rozmezí zvýšilo pro anténu vyšitou pomocí stříbrné šicí nitě na 343 MHz (50,7 %), tj. 619 - 962 MHz při konkávním způsobu přiložení. U konvexního způsobu je rozdíl rozšíření ještě větší a to 430 MHz (52 %), tj. 594 – 1024 MHz. Ačkoliv se rozdíl šířky pásma oproti měření uložení antény ve volném prostoru může zdát velký, tak v obou případech anténa pokrývá obě ISM pásma. Problém s vysíláním / příjmem signálu mimo ISM pásma lze vyřešit použitím vhodných filtrů.



Obr. 88 - vliv blízkosti lidské tkáně B1Ha

Obr. 88 znázorňuje výsledky pro anténu vyšitou s využitím mosazné hybridní šicí nitě. I zde je znatelné rozšíření šířky pásma -10 dB pro konkávně přiloženou anténu na 386 MHz (47,4 %), tj. 646-1032 MHz, pro konvexně přiloženou anténu se šířka pásma rozšíří na hodnotu 427 MHz (52 %), tj. 596 – 1023 MHz. Rozšíření šířky pásma -10 dB lze přičíst skutečnosti, že lidské tělo působí jako další substrát s velkými rozměry a permitivitou, což ovlivňuje výkon antény.

5.4.3 Prací testy

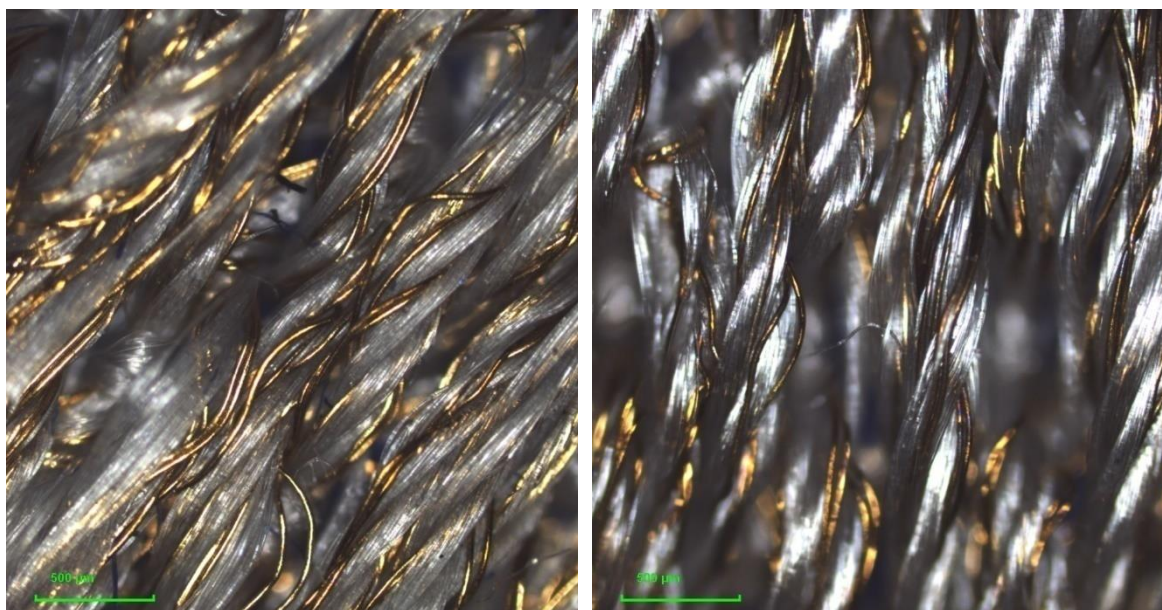
Jelikož vývoj textilních antén se zaměřuje na jejich nositelnost a jejich snadnou integraci do různých částí oblečení jako jsou trička nebo bundy, je třeba uvažovat o délce životního cyklu takového oblečení. Proto jsou prací testy důležitou součástí výzkumu, neboť vývoj jednorázových antén (bez možnosti vyčistění) by byl značně neekologický a neekonomický.

Elektrické parametry vyšívané antény byly zkoumány po 1,2,3,5 a 10 pracích cyklech. Při každém praní byl použit tekutý nebo práškový prací prostředek. Každý prací cyklus trval 90 minut při nastavené prací teplotě 40°C a otáčkách 400 rpm. Po každém praní byla testovaná anténa vysušena v sušičce prádla, ale nebyla žehlena. Před každým praním byl koaxiální kabel odpájen a znovu připájen k anténě po usušení. Výsledky jsou zobrazeny v Tabulka 17. Prací cyklus označený jako „0“ odpovídá referenčnímu měření před započítáním pracích cyklů.

Tabulka 17 - Charakteristika antény v závislosti na počtu pracích cyklů

Počet pracích cyklů	0	1	2	3	5	10
f_c (MHz)	860	842	845	892	903	911
S_{11} (dB) @ f_c	-23	-19	-16	-16	-18	-15
VSWR @ f_c	1,16	1,27	1,38	1,38	1,3	1,44
f_1 (MHz)	740	735	730	719	731	840
f_2 (MHz)	977	977	946	977	979	987
-10 dB BW (MHz)	237	242	216	258	258	147

Z Tabulka 17 vyplývá, že i po 10 pracích cyklech a navzdory posunu rezonančního je dosaženo stabilního pokrytí nelicencovaných pásem ISM 868 a 915 MHz. Rezonanční frekvence má tendenci se zvyšovat, nicméně maximální posun oproti referenčnímu měření, kde je $f_c = 860$ MHz, nepřekročí 6 %. Výkonnost antény, vyjádřená činitelem odrazu nebo VSWR @ f_c , zůstává uspokojivá i po 10 praních. S_{11} (VSWR) @ f_c neklesne pod (překročí) 15 dB (1,44). Šířka pásma -10 dB se prakticky nezhoršuje až do dosažení 10 pracích cyklů. Nicméně i po 10 pracích cyklech anténa stále dokáže pokrýt obě ISM pásma a plnit tak svůj účel.



Obr. 89 - mosazná hybridní šicí nit' vlevo před praním, vpravo po praní

Obr. 89 zobrazuje porovnání hybridní šicí nitě před a po pracích cyklech. Na obrázku vpravo je vidět detail struktury výšivky pomocí hybridní šicí nitě po mikroskopem LEXT, patrné jsou zde částičky substrátu ve struktuře. Vpravo je patrná oxidace mosazných mikrodrátků po pracích cyklech a odstranění zbytků substrátu z výšivky. U stříbrné šicí nitě se ve výšivce před praním také nacházely částičky substrátu a po pracích cyklech došlo k jejich odstranění. Na rozdíl od mosazné hybridní šicí nitě nedošlo u stříbrné k žádné oxidaci.

V rámci analyzování vlivu prací cyklů nedošlo po mechanické stránce k významnému poškození (přerušení, zlomení atd.) hybridních šicích nití.

5.4.4 Vliv potu na elektrické parametry antény

Jelikož textilní antény považujeme za antény nositelné, je zapotřebí uvažovat i další vnější vlivy, které mohou ovlivnit elektrické parametry textilní antény. Jedním z těchto vlivů je bezpochybně lidský pot, neboť pokud bude anténa integrovaná například do sportovního oblečení, tak lze předpokládat, že dojde ke kontaktu antény s lidským potem. Získat dostatečné množství lidského potu pro potřeby této analýzy by bylo velice náročné, a proto byl jako náhrada vyroben umělý lidský pot. Odolností textilií vůči potu se zabývá norma ČSN EN ISO 105-E04.

Umělý pot pro účely této analýzy byl vyroben v uvedených poměrech z následujících surovin - 0,3g KCl, 4,5g NaCl, 0,3g Na₂SO₄, 0,4g NH₄Cl, 3g CH₃CH(OH)COOH, 0,2g NH₂-COH₂ a 1000ml destilované vody. Hodnota pH byla upravena 5,5.



Obr. 90 - testování elektrických parametrů bow-tie antény na účinky lidského potu

Pro otestování účinků umělého lidského potu na elektrické parametry antény byly zvoleny antény typu bow-tie s využitím mosazné (B) a stříbrné (S) hybridní šicí nitě. Testovaná anténa byla vložena do boxu, kde byla zcela zalita uměle vyrobeným lidským potem. V boxu byla anténa máčena po dobu 30 minut. Poté byla anténa z boxu vyjmuta a sušena ve vodorovné poloze v sušárně předehřáté na teplotu 37 °C než byla anténa zcela vysušena.

Prototypové antény byly změřeny před namáčením v umělém lidském potu (B/S před), těsně po působení potu (B/S pot) a znovu po úplném vysušení antény (B/S po).

Tabulka 18 - účinky lidského potu na bow-tie antény

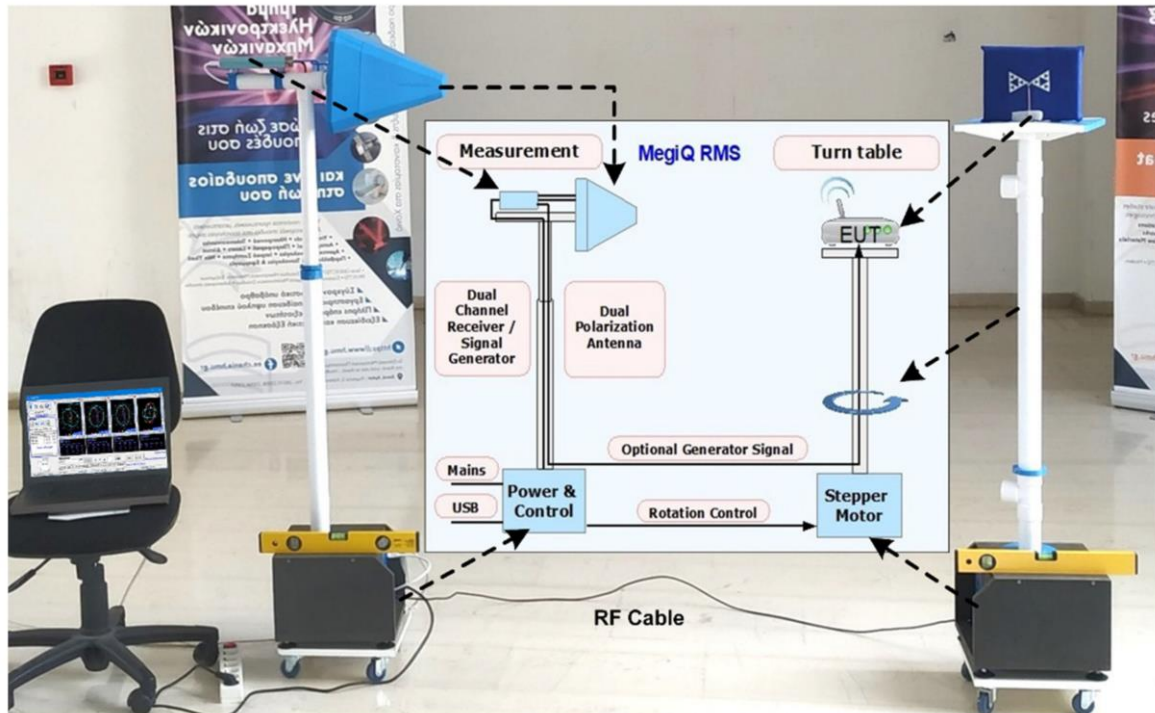
Prototyp antény	B před	B pot	B po	S před	S pot	S po
f_c (MHz)	905	680	852	932	700	850
S₁₁ (dB) @ f_c	-14	-20	-22	-14	-18	-20
f₁ (MHz)	807	610	742	877	620	752
f₂ (MHz)	987	907	962	990	842	949
-10 dB BW (MHz)	180	297	220	113	222	197

Z Tabulka 18 je patrné, že po působení umělého potu dojde k posunu frekvence z 905 na 680 MHz pro anténu s mosaznou hybridní šicí nití a z 932 na 700 MHz pro nit' stříbrnou. Dále patrné rozšíření šířky pásma ze 180 na 297 MHz pro mosaz a ze 113 na 222 MHz pro stříbro. Po vysušení antény dojde ke změně parametrů částečně se blížících původní anténě. Frekvence mosazné antény se posune na 852 MHz a šířka pásma je v 220 MHz, u stříbrné antény se frekvence posune na 850 MHz s šířkou pásma 197 MHz. Tuto změnu lze přičíst přítomnosti solných částí ve struktuře vyšívání antény, které ovlivňuje vodivost a permitivitu prototypové antény. Z výsledků je také patrné, že obě antény po působení umělého potu pokrývají obě ISM pásma.

5.5 Měření směrových charakteristik

V rámci analyzování směrových charakteristik textilních antén byla využita měřicí sestava MegiQ RMS-0660 popsaná v kapitole 0. Na Obr. 91 je zobrazeno uspořádání měřicí sestavy pro měření směrových charakteristik bow-tie antény s využitím přímé metody měření. Výrobce sestavy udává chybovost měření v tomto uspořádání ± 1 dB.

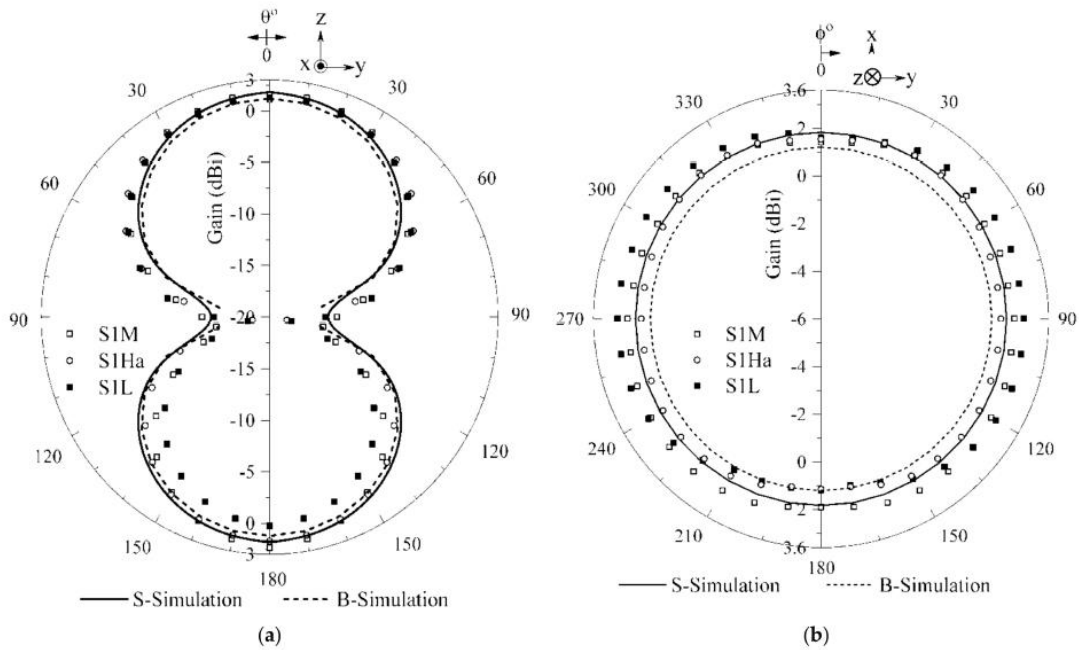
Sestava byla umístěna ve vzdálenosti definované výrobcem, propojena měřícím kabelem a vyrovnána tak, aby byla ve vzájemně ve vodorovné pozici. Poté byla na otočný stůl připojena měřená anténa, v této kapitole jsou uvažovány prototypové vyšívané bow-tie antény ve verzích S1Ha, S1L, S1M, S2H a B1Ha.



Obr. 91 - Uspořádání měřící sestavy MegiQ RMS pro měření směrových charakteristik textilních antén

Na Obr. 92 jsou zobrazeny simulované a naměřené směrové charakteristiky pro antény S1M, S1Ha a S1L ve volném prostoru. Simulované charakteristiky jsou zde zobrazeny plnou a čárkovanou čarou. Měřené charakteristiky jsou zde jako \square a \circ . Charakteristika vlevo (a) je pro rovinu E (rovinu Θ nebo také elevační rovinu), charakteristika vpravo (b) je pro rovinu H (rovinu ϕ nebo také rovina azimutu).

Jak je patrné naměřené i simulované výsledky směrových charakteristik jsou velmi podobné všesměrovému chování antén vycházejících z dipólové antény, tak jak se předpokládalo. Z výsledků lze usuzovat, že hustota výšivky ani typ použité hybridní šicí nitě nemá velký vliv na směrové charakteristiky antény.



Obr. 92 - Simulované a měřené směrové charakteristiky

Výsledky naměřeného zisku, směrovosti a účinnosti vybraných prototypů jsou zobrazeny v Tabulka 19. Z výsledků vyplývá, že naměřená účinnost prototypových antén se pohybuje přibližně v rozmezí 40 – 60 %, což lze považovat za dobrý výsledek. Dále je z výsledků patrné, že simulovaná účinnost je vyšší než ta naměřená, pro stříbrnou hybridní šicí niť 96,5 % a pro mosaznou 85,2 %.

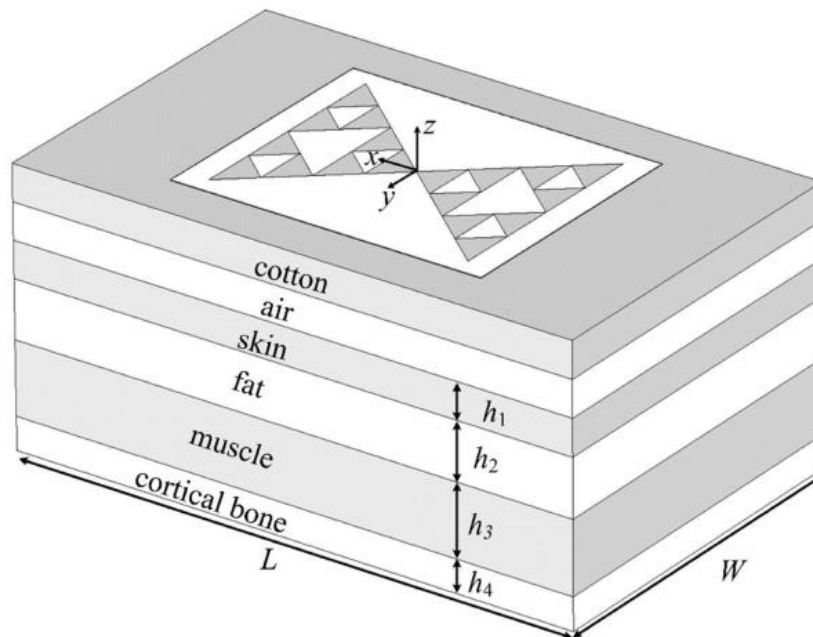
Tabulka 19 - Zisk, směrovost a účinnost měřených bow-tie antén

Prototyp antény	S1L	S1M	S1Ha	S2H	B1H2	S-simulace	B-simulace
Zisk (dBi)	2,37	1,92	2,58	3,51	1,2	1,83	1,21
Směrovost (dB)	6,23	6,02	6,02	5,68	5,44	1,99	1,9
Účinnost	41,10%	38,90%	45,20%	60,70%	37,70%	96,50%	85,20%

5.6 Specifická míra absorpce

Specifický míra absorpce SAR (Specific Absorption Rate) nebo také specifický měřený výkon je fyzikální veličina, která popisuje míru absorpce výkonu živou tkání vystavenou elektromagnetickému poli. Specifická míra absorpce je definovaná jako výkon, který je absorbován lidskou tkání o jednotkové hmotnosti a má jednotku (W/kg). SAR se využívá k analýze účinků vlivu elektromagnetického pole na člověka ve frekvenčním pásmu 100

kHz – 10 GHz, například při používání mobilních telefonů a dalších zařízení, které obsahují vysílací a přijímací části, z důvodů ohřívání lidské tkáně a podráždění nervové soustavy. V České republice je pro dané pásmo 100 kHz – 10 GHz podle nařízení vlády z roku 2015 hodnota expozice lidské tkáně omezena na 0,08 W/kg pro celotělové působení a na 2W/kg pro lokální expozici (10 g tkáně) [37][38][39].



Obr. 93 - Vrstvený model lidského hrudníku

Specifická míra absorpce byla vyhodnocena, jelikož textilní anténa je navržena a předpokládána jako nositelná anténa (v blízkosti hrudníku). Prototyp byl modelován v programu CST Suite 2021 jako čtyři vrstvy tkání o parametrech uvedených v Tabulka 20. Bavlněné triko o tloušťce 1,5 mm, $\epsilon_r = 1,6$, $\tan\delta = 0$ a vzduchovou mezerou 1 mm ($\epsilon_r = 1$, $\tan\delta = 0$) bylo uvažováno mezi anténou a lidskou kůží. Vzduchová mezera byla při prvním výpočtu zachována, při druhém výpočtu odstraněna, a to z důvodu provedení nejhoršího scénáře, kdy by byla anténa umístěna přímo na lidském těle. Hodnota SAR pro celé tělo a pro lokální expozici byla vypočtena podle příslušných mezinárodních standardů [37][38][39]. Anténa byla umístěna v kontaktu s bavlněným trikem, viz Obr. 93, a vstupní výkon antény byl 0,5 W (efektivní hodnota). Výpočty byly provedeny pro centrální frekvence ISM pásma, tj. 868 a 915 MHz, získané rozdíly mezi výsledky byly zanedbatelné. Při zachování vzduchové mezery byla vypočtena hodnota SAR pro celé tělo 0,025 W/kg, pro lokální expozici 1,86 W/Kg. Při zanedbání vzduchové mezery se hodnota SAR zvýšila na 0,029 W/kg pro celé tělo a 1,91 W/kg pro lokální expozici. Hodnoty SAR jsou pro obě situace v nařízených limitech. Nicméně v případě, kdy se mezi anténu a triko vloží zemní

plocha, dosahuje SAR extrémně nízkých hodnot, $2,35 \times 10^{-7}$ W/kg pro celé tělo a $1,93 \times 10^{-6}$ W/kg pro lokální expozici.

Tabulka 20 - Parametry vrstev pro odhad SAR

Vrstva	σ (S/m)	ϵ_r	$\tan\delta$	hustota (kg/m ³)	tloušťka (mm)
Suchá kůže	0,86	41,6	0,426	1100	1,5
Tuk	0,05	5,5	0,19	900	13
Sval	0,93	55,1	0,35	1080	20
Kost	0,14	12,5	0,231	2000	3,5

6 Závěr

V rámci této disertační práce byly realizovány nositelné textilní antény s využitím existujících technologií využívaných v textilním průmyslu, jako jsou sítotisk, vyšívání, laminace a kombinací těchto technologií – hybridní textilní antény. Pro realizaci pomocí vybraných textilních technologií byly zvoleny tři motivy antén. S ohledem na jednoduchost byl jako první motiv antény zvolen dobře známý dipól.

Po ověření funkčnosti dipólu na textilní bázi se tato práce rozšířila o další dva motivy antén. Jednalo se o antény, jejichž geometrie vychází z teorie fraktálů. První z těchto antén byl fraktální dipól, jehož geometrie vychází z Van Kochovi křivky. Druhou realizovanou fraktální anténou byla tzv. bow tie, v literatuře uváděnou také jako motýlkovou anténou. Nejsnadněji realizovatelnou anténou je s ohledem na rozměry a geometrii klasický dipól, následuje fraktální dipól a nejkomplicovanějším motivem k realizaci za pomoci technologií využívaných v textilním průmyslu je anténa typu bow tie. Z pohledu spotřeby materiálu potřebného k realizaci textilní antény je pořadí stejné jako v předchozím bodě. Při hodnocení časové náročnosti realizace antén za pomoci vybraných technologií vycházejí nejlépe tištěné antény (při zanedbání času nutného k výrobě síta) kdy samotný tisk trvá v délce jednotek minut. Nicméně v tomto případě se jedná pouze rychlost samotného tisku, jeho následné potřebné vytvrzení časovou náročnost posunuje nad technologii vyšívání. Následují antény realizované technologií laminace, u kterých se doba realizace prodlouží část potřebný k laminaci. Pro proces vyšívání je v závislosti na velikosti výšivky, její náročnosti a parametrů zvolných při vyšívání je zapotřebí čas v řádu desítek minut. Samozřejmě časově nejnáročnější je realizace hybridních textilních antén.

Výše uvedené realizované antény byly porovnány mezi sebou z důvodu analýzy vlivu technologie výroby na finální elektrické parametry. Při porovnání dipólové antény vytvořené vyšíváním, tiskem, laminací a kombinací více technologií (hybridní dipól) bylo při zachování stejných rozměrů pro všechny technologie zjištěno, že tištěná anténa dosahuje nejlepších hodnot činitele odrazu (-34,3 dB) při druhé nejvyšší šířce pásma (174 MHz). Laminovaný dipól dosahuje jak nejhorších hodnot parametru S_{11} (-12 dB), tak i nejmenší šířky pásma (70 MHz). Vyšitý dipól dosahuje druhé nejhoší hodnoty činitele odrazu (-15,97 dB), ale největší šířky pásma (205 MHz). Hybridní dipól realizovaný kombinací vyšívání a tisku patří výsledkami mezi vyšívány a tištěný dipól. Činitel odrazu pro hybridní dipól

dosahuje hodnoty $-28,4$ dB při šířce pásma 196 MHz. Pro srovnání komerčně dostupný dipól dosáhl hodnoty činitele odrazu $-30,6$ dB při šířce pásma 45 MHz. Při porovnání realizovaných bow tie antén bylo dosaženo méně rozdílných výsledků v porovnání s dipólem. Nejhorších výsledků opět dosáhla laminovaná bow tie anténa ($-15,4$ dB, 110 MHz). Tištěná verze dosáhla opět nejlepších výsledků činitele odrazu ($-24,3$ dB), při druhé nejmenší šířce pásma (194 MHz). Vyšívaná bow tie opět dosáhla největší šířky pásma (205 MHz), ale nižší hodnotě činitele odrazu než tištěná verze ($-18,3$ dB). Hybridně vytvořená bow tie anténa (vyšívání + tisk) opět dosáhla hodnot ležících mezi vyšívanou a tištěnou verzí ($-22,3$ dB, 194 MHz). Z výsledků je tedy patrné, že textilní antény jsou funkční a ubýrat se směrem hybridních antén vzhledem ke kombinaci výhod daných technologií má smysl.

Způsob vytvoření kontaktu mezi textilní anténou a související elektronikou velmi ovlivňuje elektrické, ale i mechanické parametry realizované antény. Z toho důvodu bylo v rámci této práce provedeno několik testů zkoumající vliv způsobu kontaktování na elektrické parametry v závislosti na mechanickém namáhání. Byl navrhnut univerzální testovací plošný spoj, na kterém bylo možné otestovat vytvořené kontakty pomocí pájení, přišívání, lepení, odporového a ultrazvukové svařování. Každý vzorek byl otestován v běžném prostředí a následně vystaven různým vnějším vlivům jako je působení suchého tepla, šoková změna teploty a vliv okolí při definované vlhkosti a teplotě (klimakomora). Pro zhodnocení kvality přenosu byl vybrán parametr S_{21} , který určuje kvalitu přenosové linky. Z výsledků vyplývá, že nejlepšími způsoby kontaktování textilní antény je pájení a přišívání. Nejhorším způsobem kontaktování textilní antény se ukázalo použití vodivého lepidla. Dále byla provedena zkouška mechanické odolnosti vytvořeného kontaktu, potažmo tedy celé antény. Testované vzorky byly vloženy do trhacího zařízení a postupně byla navyšována síla až do té doby, než došlo k přerušení vytvořeného kontaktu. Z této zkoušky vyplývá, že nejvíce mechanicky odolným kontaktem je takový, který byl vytvořen přišíváním (k přerušení bylo zapotřebí 67 - 88 N), nejhůře dopadly kontakty vytvořené odporovým svařováním (3 - 9 N).

Jelikož realizované textilní antény v této práci jsou uvažovány jako nositelné, bylo zapotřebí provést analýzu vlivu mechanického namáhání antény, vlivu prostředí a údržby na elektrické parametry antény. Prvním analyzovaným vlivem na elektrické parametry antény bylo mechanické ohýbání. K otestování vlivu ohybu byly zvoleny bow tie antény vyšité mosaznou a stříbrnou šicí nití. V rámci provádění analýzy byly využity čtyři PVC válce o průměrech $d = 70, 90, 100, 130$ mm a o šířce stěny válců 2, 2, 3 a 4 mm. Pro každou anténu

byl proveden mechanický ohyb v ose X i Y a pro konkávní a konvexní směr. Z výsledků je patrné, že mechanické ohýbání nemělo na bow tie anténu vyšitou pomocí stříbrné šicí nitě velký vliv. Ve všech případech (ač hraničně) dokáže tato zkoumaná anténa pracovat v obou ISM pásmech. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší frekvencí je pouze 13 MHz a rozdíl činitele odrazu je 1,16 dB. Rozdíl mezi šířkami pásma činí 11 MHz. U vyšité bow tie antény pomocí mosazné šicí nitě byl vliv mechanického ohýbání patrnější. Se zvyšujícím se poloměrem ohybu dochází k poklesu činitele odrazu a posunu rezonanční frekvence směrem k nižším hodnotám. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou rezonanční frekvence je 108 MHz a rozdíl mezi činiteli odrazu je 8 dB. Rozdíl šířek pásma činí 108 MHz.

Dalším důležitým prvkem ovlivňujícím elektrické parametry antény je vliv přítomnosti lidské tkáně. Pro tuto analýzu byly zvoleny vyšité bow tie antény (mosaznou a stříbrnou šicí nití). Pro měření přítomnosti lidské tkáně byla testovaná anténa přiložena na pánský hrudník. Z výsledků je patrné, že pro přiložení antény na lidské tělo (konkávní/konvexní směr) dojde k rozšíření šířky pásma ze 166 MHz pro stříbrnou šicí nit' na 343/430 MHz. U bow tie antény vyšité mosaznou šicí nití dochází k rozšíření pásma z 228 MHz na 386/427 MHz. I po rozšíření pásma dokáží obě testované antény pracovat v obou ISM pásmech. Rozšíření šířky pásma lze přičíst skutečnosti, že lidské tělo působí jako další substrát s velkými rozměry a permitivitou, což ovlivňuje výkon antény.

Dále byl zkoumán vliv lidského potu na elektrické parametry antény. Pro tyto účely byl vyroben umělý pot s hodnotou pH 5,5. Jako testovací anténa byla zvolena vyšívaná bow tie anténa ve dvou verzích vyšitých mosaznou a stříbrnou hybridní šicí nití. Parametry testovaných antén byly změřeny ve volném prostoru před aplikací umělého potu, po aplikaci umělého potu kdy byly antény vystaveny jeho vlivu po dobu 30 minut a poté po kompletním vysušení antén. Z výsledků vyplývá, že po aplikaci umělého potu u obou antén dochází k rapidnímu posunu rezonanční frekvence přibližně o 200 MHz, současně ale dochází ke zlepšení hodnoty činitele odrazu a zvětšení šířky pásma. Po kompletním vysušení se rezonanční frekvence opět přiblíží původní hodnotě a dojde ke zmenšení šířky pásma oproti měření po aplikaci umělého potu, nicméně nová šířka pásma je větší než původní. Zároveň dochází ke zlepšení činitele odrazu. Pozitivním jevem je, že ve všech případech dokáží testované antény pracovat v obou ISM pásmech.

S ohledem na životní cyklus chytrého oblečení byla zapotřebí provést analýza vlivu pracích cyklů na elektrické parametry antény. Měření parametrů bylo provedeno po 1, 2, 3, 5 a 10 cyklech. Každá práci cyklus trval 90 minut při nastavené teplotě 40°C, otáčkách 400 rpm a byl využit práci prostředek. Po každém cyklu byl vzorek kompletně vysušen a změřen. Z výsledků vyplývá, že i po 10 pracích cyklech jsou obě nelicencované ISM pásma stabilně pokryta. Se zvyšujícím počtem pracích cyklů má rezonanční frekvence zvyšující se tendenci. Činitel odrazu ani po provedení pracích cyklů nepoklesne pod hodnotu 15 dB. Šířka pásma zůstává stabilní až do dosažení všech pracích cyklů, nicméně i po poklesu při posledním testu dokáže svou šíří pokrýt obě ISM pásma.

V rámci této práce byly zcela splněny všechny zadané cíle disertační práce. Z prezentovaných výsledků je patrné, že je možné vytvořit funkční anténu za pomoci využití stávajících technologií využívaných v textilním průmyslu, případně kombinací více těchto technologií. Textilní antény samozřejmě nedosahují stejných výsledků (zisk, šířka pásma, směrovost atd.) jako antény komerčně dostupné (například na plošném spoji nebo drátové), ale díky své konstrukci nabízejí výhody, které komerčně dostupné antény nemohou nabídnout (pratelnost, odolnost vůči mechanickému namáhání, odolnost vůči vnějším vlivům, integrace na/do textilu). V tomto ohledu se jako nevhodnější jeví hybridně vytvořená anténa, která spojuje výhody vybraných technologií a zároveň potlačuje jejich negativní nevýhody.

Směr, kterým by se měla budoucí práce ubýrat je především vyřešení problému připojení symetrické antény s nesymetrickým koaxiálním kabelem. K tomu bude zapotřebí navrhnout a otestovat symetrizační člen, který bude svou konstrukcí vhodný k použití v textilní oblasti (miniaturní, flexibilní a odolný vůči vnějším vlivům). K tomu by mohl být využit již zmíněný mezičlánek, na který by mohl být umístěn jak symetrizační člen, tak případně další součástky určené k impedančnímu přizpůsobení. Tento mezičlánek by mohl být spojen s textilní anténou za pomoci kombinace přišívání a pájení.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] Koski, K 2015, *Characterization and Design Methodologies for Wearable Passive UHF RFID Tag Antennas for Wireless Body-Centric Systems*. Tampere University of Technology. Publication, vol. 1274, Tampere University of Technology.
- [2] Pavec, M., *Návrh a realizace všíváných elektrických prvků ve Smart textiliích*, FEL ZČU, Diplomová práce, 2016
- [3] P. Mach, V. Skočil, and J. Urbánek, *Montáž v elektrotechnice*, 1st ed. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [4] Starý, J., Kahle, P., 2011. Plošné spoje a povrchová montáž. VUT Brno, Brno.
- [5] Sítotisk, 2019, [online]. Dostupné z <https://www.machineryeurope.com/sitotisk>
- [6] R. Valmiro, H. Kitaguti and S. E. Barbin, "A silk-screen printed RFID tag antenna," *2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, Nanjing, 2015, pp. 1-3. doi: 10.1109/APMC.2015.7413586
- [7] He, H 2018, *New Additive Manufacturing Solutions and Novel Materials for UHF RFID Tag Antennas and Interconnections*. Tampere University of Technology. Publication, vol. 1550, Tampere University of Technology.
- [8] ZÁLESKÁ, V. DESIGN ŠICÍHO STROJE [online]. Brno, 2012 [cit. 2017-02-16]. Dostupné z: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=1705. DIPLOMOVÁ PRÁCE. FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ.
- [9] T. Acti *et al.*, "Embroidered Wire Dipole Antennas Using Novel Copper Yarns," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 638-641, 2015. doi: 10.1109/LAWP.2014.2371338
- [10] P. Benešovský, *Základy textilní a oděvní výroby 2. (přednáška)* Textilní zkušební ústav, 2011
- [11] P. Salonen and L. Hurme, "A novel fabric WLAN antenna for wearable applications," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest. Held in conjunction with: USNC/CNC/URSI North American Radio Sci. Meeting (Cat. No.03CH37450)*, Columbus, OH, 2003, pp. 700-703 vol.2. doi: 10.1109/APS.2003.1219332
- [12] D. Patron *et al.*, "On the Use of Knitted Antennas and Inductively Coupled RFID Tags for Wearable Applications," in *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 10, no. 6, pp. 1047-1057, Dec. 2016. doi: 10.1109/TBCAS.2016.2518871
- [13] Tkaní: textilní řemeslo s bohatou historií 2018, [online]. Dostupné z <http://www.spektrumzdravi.cz/remesla/tkani-textilni-remeslo-s-bohatou-historii>
- [14] Vazba tkaniny - tkaní 2018, [online]. Dostupné z <http://rucniprace.cz/vazba-tkaniny-tkani.php>
- [15] C. Du, Y. Wang, F. Yang and S. Zhong, "Ultra-wideband textile antenna integrated in three dimensional orthogonal woven fabrics," *2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, Xi'an, 2017, pp. 1-3. doi: 10.1109/APCAP.2017.8420718
- [16] PROCHÁZKA, Miroslav. *Antény: encyklopedická příručka*. Praha: BEN - technická literatura, 2000. ISBN 80-86056-59-7
- [17] MATUSZCZYK, Jacek. *Antény prakticky*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-084-9
- [18] J. Prokop and J. Vokurka, *Šíření elektromagnetických vln a antény*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1980

- [19] Radiové vlny a mikrovlny, 2019, [online]. Dostupné z <http://www.realisticky.cz/ucebnice/02%20Fyzika%20SŠ/05%20Optika/04%20Elektromagnetické%20záření/03%20Rádiové%20vlny%20a%20mikrovlny.pdf>
- [20] J. Sehnal, Antény, Internetový portál elektrotechnika, 2019, [online]. Dostupné z <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=3188&revision=-1&instance=1>
- [21] T. Acti *et al.*, "Embroidered Wire Dipole Antennas Using Novel Copper Yarns," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 638-641, 2015. doi: 10.1109/LAWP.2014.2371338
- [22] ZAPLETAL, O. Nositelné antény pracující v ISM pásmu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. Diplomová práce.
- [23] Maxwell, W.: Some Aspects of the Balun Problem.
- [24] Anténa lambda půl, 2019, [online]. Dostupné z <http://oklike.c-a-v.com/soubory/pulka.htm>
- [25] LESNIKOWSKI, J. Dielectric permittivity measurement methods of textile substrate of textile transmission lines. *Przegląd elektrotechniczny*. 2012, : 148 - 151. ISSN ISSN 0033-2097, R. 88 NR 3a/2012. Dostupné z: <http://www.red.pe.org.pl/articles/2012/3a/43.pdf>
- [26] Salvado, Rita & Loss, Caroline & Gonçalves, Ricardo & Pinho, Pedro. (2012). Textile Materials for the Design of Wearable Antennas: A Survey. *Sensors* (Basel, Switzerland). 12. 15841-57. 10.3390/s121115841.
- [27] B Oliver Riera, Permittivity measurements using coaxial probes. 2017. Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona Universitat Politècnica de Catalunya, PhD dissertation
- [28] Mičúch, J., Antény realizované pomocí technologie šití nebo pletení, FEL ZČU, Bakalářská práce, 2018
- [29] What are the functions and principles of S-parameters?, 2023, [online]. Dostupné z <https://www.analogictips.com/what-are-the-functions-and-principles-of-s-parameters-part-1/>
- [30] Ekra E2, datasheet [online]. Dostupné z <http://www.ortakelektronik.com>
- [31] Princip odporového svařování, online, dostupné z <http://www.zmrzlik.cz/cl1801735951.htm>
- [32] Hlavatý, Ivo: Ultrazvukové svařování, VŠB Ostrava
- [33] Smutný, M., ANTÉNA PRO IMPULZNÍ ŠIROKOPÁSMOVÝ SIGNÁL, VÚT Brno, Diplomová práce, 2015
- [34] HEBELKA, V. Širokopásmová anténa pro pásmo od 5GHz do 10GHz: bakalářská práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008. 41 s
- [35] Pilný Roman, Teorie – Zisk a směrová charakteristika [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné na: <http://www.rc-eagleeye.cz/rc-eagleeye/0/0/2/93>
- [36] Chowdary, P.S.R.; Prasad, A.M.; Rao, P.M.; Anguera, J. Design and performance study of Sierpinski fractal based patch antennas for multiband and miniaturization characteristics. *Wirel. Pers. Commun.* 2015, 83, 1713–1730.
- [37] INFO@AION.CZ, AION CS-. 291/2015 Sb. Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením., [online]. Dostupné z <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-291/zneni-20151118>
- [38] Method for SAR Calculations; IEC/IEEE 62704-1:2017; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2017; pp. 1–86. IEEE-SA Standards Board.
- [39] IEEE Recommended Practice for Measurements and Computations of Radio Frequency Electromagnetic Fields with Respect to Human Exposure to Such Fields,

100 kHz 300 GHz; IEEE Std C95.3-2002 (Revision of IEEE Std C95.3-1991), no. 4; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2002; pp. 1–126.

- [40] Merilampi, S 2011, *The Exploitation of Polymer Thick Films in Printing Passive UHF RFID Dipole Tag Antennas on Challenging Substrates*. Tampere University of Technology. Publication, vol. 967, Tampere University of Technology.
- [41] M. Syrovátková, „Historie pletení“ 2018, [online]. Dostupné z <https://static2.flircdn.net/upfiles/d1/5/7/9/2/79272/5/historie-pleteni.pdf>
- [42] M. Tanaka and Jae-Hyeuk Jang, "Wearable microstrip antenna," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest. Held in conjunction with: USNC/CNC/URSI North American Radio Sci. Meeting (Cat. No.03CH37450), Columbus, OH, 2003, pp. 704-707 vol.2. doi: 10.1109/APS.2003.1219333
- [43] CHAURAYA, A. ... et al, 2013. Inkjet printed dipole antennas on textiles for wearable communications. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 7 (9), pp.760-767.
- [44] Driveby therapy, 2019, [online]. Dostupné z <https://www.rt.com/usa/316341-car-seat-monitors-stress/>
- [45] Polívka, Milan: *Návrh a konstrukce antén*, ČVUT v Praze, 2013 [online]. Dostupné z https://elmag.fel.cvut.cz/sites/default/files/ppt/03_male_anteny_01_a0m17NKA%202013.pdf
- [46] Abhilash Rajagopal., *Printed circuit board (PCB) loss characterization up-to 20 GHz and modeling, analysis and validation*, UNIVERSITY OF MISSOURI-ROLLA, Diplomová práce, 2007

Seznam publikací a výstupů studenta vztahujících se k disertační práci

- [A1] PAVEC, M. Návrh a realizace všíváných anténních prvků ve Smart textiliích. In *Elektrotechnika a informatika 2016. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. s. 133-134. ISBN: 978-80-261-0516-9
- [A2] PAVEC, M., BYSTRICKÝ, T., MORAVCOVÁ, D., ŘEBOUN, J., SOUKUP, R., NAVRÁTIL, HAMÁČEK, A. A comparison of embroidered and screen-printed ultra-wideband antennas. In *Proceedings of the International Spring Seminar of Electronics Technology (ISSE 2017)*. Piscataway: IEEE, 2017. s. 1-4. ISBN: 978-1-5386-0582-0
- [A3] PAVEC, M., SOUKUP, R., HAMÁČEK, A. Embroidered textile antennas based on hybrid sewing thread. In *PCNS Passive Components Networking Days Proceedings*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2017. s. 87-90. ISBN: 978-80-905768-8-9
- [A4] ŘEBOUN, J., BLECHA, T., HAMÁČEK, A., SOUKUP, R., MORAVCOVÁ, D., VIK, R., PAVEC, M. Anténa na textilní bázi. Praha, 2019.
- [A5] PAVEC, M., SOUKUP, R., HAMÁČEK, A. Fraktální anténa vyrobená technologií vyšívání a Aerosol Jet. In *Elektrotechnika a informatika 2018. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2018. s. 105-108. ISBN: 978-80-261-0785-9.
- [A6] PAVEC, M., SOUKUP, R., HAMÁČEK, A. Návrh a realizace vyšíváných antén s využitím hybridní šicí nitě. In *Elektrotechnika a informatika 2017. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017. s. 145-148. ISBN: 978-80-261-0712-5
- [A7] PAVEC, M., NAVRÁTIL, SOUKUP, R., HAMÁČEK, A. A bowtie antenna prepared by Aerosol Jet and embroidering technology. In *2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2018) : /proceedings/*. Piscataway: IEEE, 2018. s. 1-4. ISBN: 978-1-5386-5731-7 , ISSN: 2161-2528
- [A8] M. Pavec, J. Navratil, R. Soukup, V. Smitka and A. Hamacek, "Fully Printed IoT Antenna for Drone-Deployed Autonomous Sensor Unit," 2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Wroclaw, Poland, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/ISSE.2019.8810226
- [A9] M. Pavec, M. Hirman, R. Soukup and A. Hamacek, "The Testing of Brass Solderability for Hybrid Sewing Thread," 2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Wroclaw, Poland, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/ISSE.2019.8810282
- [A10] ŘEBOUN, J. SOUKUP, R. MORAVCOVÁ, D. BLECHA, T. HAMÁČEK, A. SUCHÝ, S. PAVEC, M. *Antény na textilní bázi vytvořené kombinovanou technologií*. 2019.
- [A11] L. Kost, M. Pavec, D. Michal, D. Moravcova, R. Soukup and A. Hamacek, "E-textile Piano Fabricated using Several Textile Technologies," 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Demanovska Valley, Slovakia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISSE49702.2020.9121029.
- [A12] M. Pavec, T.N. Kapetanakis, M.P. Ioannidou, C.D. Nikolopoulos, A.T. Baklezos, R. Soukup, T. Blecha, A. Hamacek, and I.O. Vardiambasis, "Implementation of an all-textile bow-tie antenna for the 868 MHz ISM band", 2020 *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2020)*, Rome, Italy, 23-25,2020
- [A13] Kapetanakis, T.N.; Pavec, M.; Ioannidou, M.P.; Nikolopoulos, C.D.; Baklezos, A.T.; Soukup, R.; Vardiambasis, I.O. Embroidered Bow-Tie Wearable Antenna for the 868 and 915 MHz ISM Bands. *Electronics* 2021, 10, 1983.

Ostatní publikace a výstupy studenta

- [B1] NAVRÁTIL, J., PAVEC, M., ŘEBOUN, J., ŘEŘICHA, T., HAMÁČEK, A. Aerosol Jet silver printed lines on subsequently bent glass substrates. In Proceedings of the International Spring Seminar of Electronics Technology (ISSE 2017). Piscataway: IEEE, 2017. s. 1-4. ISBN: 978-1-5386-0582-0
- [B2] ŘEBOUN, J., SOUKUP, R., BLECHA, T., KAŠPAR, P., MORAVCOVÁ, D., MRAČEK, L., PAVEC, M. Bezešvé funkční triko pro měření dechové frekvence. 2016.
- [B3] ŠLAUF, J. PAVEC, M. ŘEBOUN, J. Orientation of carbon nanotubes using electric field for applications of electrochemical sensors. In Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2020. Piscataway: IEEE, 2020. s. 1-4. ISBN: 978-1-72816-773-2 , ISSN: 2161-2528