

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY A STROJŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Elektroizolační kompozity s funkčními vlastnostmi

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tereza KREJNICKÁ**
Osobní číslo: **E18B0071P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Elektroizolační kompozity s funkčními vlastnostmi**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Popište pomocí odborné literatury teoretickou tematiku související s kompozitními materiály.
2. Shrňte současné poznatky o tzv. kompozitech s funkčními vlastnostmi a stručně popište jejich možný aplikační potenciál v elektroizolační technice.
3. Navrhněte a vyrobte elektroizolační kompozit s funkčními vlastnostmi.
4. Demonstrujte funkční vlastnosti vyrobeného kompozitu.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. ASKELAND, Donald R. a Pradeep P. FULAY. Essentials of materials science and engineering. 2nd ed., SI ed. United States: Cengage Learning, 2010. ISBN 978-0495438502.
2. CARDARELLI, Francois. Materials Handbook. London: Springer London, 2008. DOI: 10.1007/978-1-84628-669-8. ISBN 978-1-84628-668-1.
3. Elektronické informační zdroje (databáze SCIENCE DIRECT, Scopus, Interscience-Wiley apod.).

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Radek Polanský, Ph.D.**
Katedra materiálů a technologií

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


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Tato práce se zabývá kompozitními materiály s pokročilými funkcemi a jejich současnými i potenciálními aplikacemi v elektrotechnice. Nejdříve se věnuje shrnutí základních poznatků o kompozitních materiálech obecně a dále poskytuje stručný přehled materiálů, ve světě známých jako „chytré kompozity“ nebo „pokročilé kompozity“, a jejich možného aplikačního potenciálu v oblasti elektroizolační techniky. V experimentální části je pak popsán návrh a výroba vlastního kompozitu s funkčními vlastnostmi a měření jeho základních parametrů. Na závěr jsou představeny výsledky měření a vyhodnocena úspěšnost experimentu.

Klíčová slova

Kompozitní materiály, kompozity s funkčními vlastnostmi, elektrická izolace, prepreg, vodivá vlákna, vyšívání, antény, pasivní parametry.

Abstract

This paper deals with composite materials with advanced functions and their current and potential applications in electrical engineering. First, it summarizes basic knowledge about composite materials in general. It also provides a brief overview of materials, worldwide known as "smart composites" or "advanced composites", and their possible use in electrical insulation. The experimental part describes the design and production of composite material with functional properties and measurement of its essential parameters. In the end, the results of measurement are presented, and the success of the experiment is evaluated.

Key words

Composite materials, composites with functional properties, electrical insulation, pre-preg, conductive threads, embroidery, antennas, passive parameters.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

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

.....

podpis

V Plzni dne 21.5.2021

Tereza Krejnická

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Radkovi Polanskému, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych také chtěla poděkovat Ing. Daniele Moravcové, Ph.D. a Doc. Ing. Tomáši Blechovi, Ph.D. za neocenitelnou pomoc při přípravě a realizaci praktické části. V neposlední řadě pak děkuji i své rodině za podporu v průběhu celého studia.

Tato bakalářská/diplomová práce vznikla s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu OP VVV Elektrotechnické technologie s vysokým podílem vestavěné inteligence, číslo CZ.02.1.01/0.0/0.0/18_069/0009855. Tato práce byla dále podpořena grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2021-003 „Materiály, technologie a diagnostika v elektrotechnice“.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	11
1.1 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	11
1.1.1 Kompozity s kovovou maticí (MMC – Metal Matrix Composites).....	12
1.1.2 Kompozity s polymerní maticí (PMC – Polymer Matrix Composites).....	13
1.1.3 Vláknové kompozitní materiály.....	15
1.1.4 Částicové kompozitní materiály.....	16
1.2 POUŽITÍ V ELEKTROTECHNICE.....	17
1.2.1 Desky plošných spojů (DPS).....	17
1.2.2 Izolační systémy elektrických točivých strojů.....	18
2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY S FUNKČNÍMI VLASTNOSTMI	20
2.1 PŘEHLED KOMPOZITŮ S FUNKČNÍMI VLASTNOSTMI.....	20
2.1.1 Samoléčitelné materiály.....	20
2.1.2 Kompozity pro senzory, aktuátory a převodníky.....	21
2.1.3 Kompozity s tvarovou pamětí.....	22
2.1.4 Nanokompozity.....	22
2.1.5 Kompozity pro 3D tisk.....	23
2.2 APLIKACE KOMPOZITŮ S FUNKČNÍMI VLASTNOSTMI V ELEKTROIZOLAČNÍ TECHNICE.....	24
2.2.1 Vysokonapěťové izolátory.....	24
2.2.2 Izolační systémy vysokonapěťových zařízení.....	25
3 EXPERIMENT	26
3.1 POUŽITÉ MATERIÁLY.....	26
3.1.1 Kompozitní prepregy.....	26
3.1.2 Vodivé nitě.....	27
3.2 POUŽITÉ PŘÍSTROJE.....	28
3.2.1 Šicí stroj BERNINA 750 QE.....	28
3.2.2 Laboratorní lis Carver 2518.....	29
3.2.3 LRC metr Keysight E4982A.....	29
3.3 NÁVRH.....	30
3.4 VÝROBA.....	32
3.4.1 Vyšívání.....	32
3.4.2 Kontaktování.....	34
3.4.3 Lisování.....	35
3.5 MĚŘENÍ.....	38
4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	40
ZÁVĚR	42
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	43
PŘÍLOHY	54

Seznam symbolů a zkratk

MMC	kompozity s kovovou maticí (Metal Matrix Composites)
PMC	kompozity s polymerní maticí (Polymer Matrix Composites)
T_g	teplota skelného přechodu ($^{\circ}\text{C}$)
T_d	teplota rozkladu ($^{\circ}\text{C}$)
UPE	nenасыený polyester (Unsaturated Polyester)
DPS	desky plošných spojů
PET	polyethylentereftalát
PEN	polyethylennaftalát
PI	polyimid
VPI	vakuově tlaková impregnace (Vacuum Pressure Impregnation)
PZT	olovo-zirkonát-titanát
SMP	polymer s tvarovou pamětí (Shape Memory Polymer)
SMPC	kompozit s tvarovou pamětí (Shape Memory Polymer Composite)
FDM	Fused Deposition Modelling
FFF	Fused Filament Fabrication
CFE	Continuous Fiber Fabricating
DLP	Digital Light Processing
PCA	polykaprolakton
PES	polyester
SMA	konektor pro tenký koaxiální kabel (SubMiniature version A)

Úvod

Kompozitní materiály jsou v dnešní době hojně využívány v mnoha oblastech lidské činnosti. Důvodem je to, že jejich vlastnosti bývají nadřazené vlastnostem jiných materiálů používaných v různých odvětvích průmyslu (svými mechanickými vlastnostmi mohou třeba konkurovat ocelím, ale bývají mnohem lehčí a levnější). V posledních letech probíhá snaha tyto jejich parametry stále více zdokonalovat a vylepšovat, což by mohlo vést k dalšímu rozšíření jejich pole působnosti. Výzkum v této oblasti se tedy zabývá především vývojem a testováním nových materiálů a také vytvářením nových způsobů, jak kompozitům zajistit dodatečné funkce nad rámec těch standardních (např. zakomponováním aktivních prvků do jejich struktury). V elektrotechnice jsou kompozity využívány především jako izolanty, nebo pro konstrukční účely v oblasti elektroniky. Izolační systémy jsou kritickou částí elektrických strojů a zařízení a bývají náchylné k poruchám. Zavedení dalších vlastností má v tomto oboru tedy velký potenciál, protože otevírá nové možnosti pro zlepšení těchto systémů (zejména jejich spolehlivosti). Mezi důležité přínosy můžeme počítat třeba zavedení různých způsobů detekce případných poruch, což v některých případech může vést k jejich předcházení, nebo alespoň zmírnění jejich dopadů a následků.

1 Kompozitní materiály

Kompozitní materiál (nebo zkráceně kompozit) je multifunkční materiál obsahující dvě nebo více složek, které společně tvoří jeden celek, jehož mechanické a fyzikální vlastnosti jsou znatelně lepší, než je tomu u samotných složek [1]. Většina kompozitů je složena ze dvou fází: první z nich (primární) je tzv. matrice, která tvoří základ (pevnou hmotu, spojitou fázi), ta je pak zpevněna druhou (sekundární) fází, která se nazývá výztuž nebo plnivo (nespojité fáze). Jejím úkolem je především zvýšit mechanickou pevnost a tuhost matrice, někdy se však používá např. k úpravě tepelné vodivosti a elektrické rezistivity [2]. Výplň je nejčastěji tvořena vlákny (např. monofilamenty, monokrystalickými vlákny¹), ale může být i částicová (zpevněná disperzí, vyztužená částicemi) nebo dokonce z materiálu s komplexnějším tvarem (pletivo, stuha, laminát) [3].

Díky kombinaci dvou různých složek mají kompozity výborné mechanické vlastnosti, které však ovlivňuje kvalita rozhraní mezi maticí a výztuží [4]. Pro zlepšení elektroizolačních, tepelných a mechanických parametrů se přidávají především do polymerních (reaktoplastických, termoplastických a elastomerních) matic plniva. V praxi mohou být plniva organického i anorganického původu. V elektrotechnice se pro tyto účely nejčastěji používá slída [5].

1.1 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozity můžeme dělit podle několika různých kritérií [6], například dle:

1) Materiálu matrice (závisí na něm maximální provozní teplota) na:

- kovové,
- polymerní,
- keramické,
- kombinované.

¹ Monofilamenty jsou tvořeny jedním vláknem nejčastěji kruhového plného průřezu. Jejich průměr se pohybuje mezi 100 – 2000 μm [7]. Monokrystalická vlákna (také nazývaná „whiskery“) jsou vlákna s velkým poměrem délka/tloušťka (typická délka je 1 mm a průměr se pohybuje v řádu μm). Jejich struktura je tvořena monokrystalem (makroskopický krystal, který má velmi malé defekty ve své krystalové struktuře) [8].

2) Struktury nebo geometrické charakteristiky fáze vložené do matrice na:

disperzní²,

částicové,

vláknové.

3) Technologie výroby na:

lisované za tepla v tuhém stavu,

připravované v tekutém stavu,

připravované nanášením matrice na povrch vláken,

vyráběné jiným způsobem.

4) Kombinace materiálů na:

kov-kov,

kov-keramika,

keramika-keramika,

polymer-sklo

atd.

Dále se budeme detailněji zabývat nejdůležitějšími skupinami kompozitních materiálů, s nimiž se setkáme nejčastěji.

1.1.1 Kompozity s kovovou maticí (MMC – Metal Matrix Composites)

Historicky nejstarší používaný materiál pro výrobu matrice byla měď (Cu), postupně se ale zkoumaly i další kovy. Dnes se můžeme setkat s různými materiály (např. titan (Ti), nikl (Ni), bór (B), ocel), zdaleka nejpoužívanějším kovem je však hliník (Al) [10]. Jeho hlavní výhodou je nízká cena a hmotnost a dobré mechanické vlastnosti v oblasti tribologie³ [11]. Jako výztuž se nejčastěji používá keramika, ale v některých případech může roli výztuže plnit i měkký a poddajný materiál (grafitové vločky, částice olova nebo dokonce plyny). Je také možné použít žáruvzdorné kovy, intermetalické sloučeniny nebo polovodiče. Výztuž může být ve formě částic, dlouhých (nepřerušovaných) i krátkých (přerušovaných) vláken [13].

² Disperzní kompozity se dají považovat za podkategorii částicových. Rozdíl mezi nimi je ten, že spojení matrice a výztuže u disperzních probíhá na molekulární úrovni [9].

³ Tribologie je vědní disciplína zabývající se třením, opotřebením a mazáním dotýkajících se povrchů v relativním pohybu. To je důležité sledovat především u pohyblivých mechanických částí, ložisek a kontaktů [12].

Výztuže částicových metalických kompozitů mohou mít různý tvar, pravidelný (kulový, ve formě destiček) i nepravidelný. Velikost částic se typicky pohybuje v rozmezí 1-20 μm a jejich množství závisí na konkrétní aplikaci. Nejrozšířenější částicovou výplní je karbid křemíku (SiC) nebo oxid hlinitý (Al_2O_3), ale byly zkoumány i další materiály (karbid boru (B_4C), karbid titanu (TiC), nitrid titanu (TiN), nitrid hlinitý (AlN), oxid zirkoničitý (ZrO_2), grafit, jíla, slída atd.) [14].

1.1.2 Kompozity s polymerní matricí (PMC – Polymer Matrix Composites)

Polymerní kompozity jsou nejrozšířenějším typem kompozitů a jejich výhodou je možnost použití široké škály výztuží (nejčastěji se jedná o vlákna) [15]. K výrobě těchto kompozitů se používají reaktoplasty (termosety) a termoplasty, přičemž reaktoplasty jsou běžnější [16].

Mezi reaktoplasty řadíme polyestery, vinylestery, epoxidové pryskyřice, bismaleimidy, estery kyanátu, polyimidy a fenoly. Dominantními reaktoplasty jsou v současnosti epoxidové pryskyřice, které se používají při nízkých a středních teplotách (do 135 $^\circ\text{C}$) [17]. Aby reaktoplastické pryskyřice měly požadované vlastnosti, musí u nich dojít k polymerizaci (vytvrzení), která způsobí zesíťování polymerních řetězců a spojí celou matici do třírozměrné struktury. Výsledný celek je netavitelný a nerozpustný ve většině organických rozpouštědel. Po vytvrzení již pryskyřice nelze přetavit ani změnit jejich tvar [18]. Mezi požadované vlastnosti termosetů patří vysoká teplota skelného přechodu (T_g), vysoká teplota rozkladu (T_d), tepelná a termooxidační stabilita, zachování vlastností v horkém vlhkém prostředí, dobré mechanické vlastnosti, nízká absorpce vody a vysoká odolnost vůči hoření. Hlavní nevýhodou reaktoplastů je křehkost, která je příčinou jejich nízké odolnosti vůči šíření trhlin [19].

Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice jsou viskózní kapaliny, které mají ve své chemické struktuře epoxidovou skupinu [20]. Jejich výhodou oproti jiným typům reaktoplastů je možnost částečného vytvrzení a následného skladování v tomto stavu a také nízké smrštění během vytvrzování [21]. Nevýhodou je pak vysoká cena, dlouhá doba vytvrzování a obtížná manipulace [22]. Ve vytvrzeném stavu vykazují vysokou chemickou odolnost a odolnost proti korozi, dobré mechanické a tepelné vlastnosti, vynikající přilnavost k rozmanitým

podkladům a dobré elektrické vlastnosti. Optimální teplota vytvrzování a teplotní stálost závisí na použitém vytvrzovacím činidle⁴ [23].

Epoxidové pryskyřice mají široké uplatnění, používají se jako lepidla, lamináty, tmely a nátěry [25, 26]. V elektrotechnice se využívají epoxidové pryskyřice vytvrzené anhydridem, díky kterému mají výborné elektrické, chemické a mechanické vlastnosti [27].

Polyesterové pryskyřice

Polyesterové pryskyřice jsou průhledné viskózní kapaliny, které obsahují styren [28]. Polyesterové pryskyřice používané pro kompozity jsou nenasycené (UPE – Unsaturated Polyester) a je možné je vytvrzovat v kapalné i pevné formě (při správných podmínkách). To u nasycených polyesterů není možné [29].

Výhodou polyesterových pryskyřic je nízká cena, odolnost vůči vodě a velkému množství chemikálií, odolnost vůči zvětrání a stárnutí a dobrá teplotní odolnost (do 80 °C) [30]. Jejich vytvrzování probíhá za přítomnosti katalyzátoru, jímž je nejčastěji peroxid s koncentrací 0,5 - 2 %. Díky němu jsou pak pryskyřice dobře rozpustné ve styrenu a jejich vysoká reaktivita umožňuje vytvrzování za nižší teploty [31].

Polyesterové matrice jsou velmi dobře slučitelné s rozmanitými výplněmi, kterými mohou být např.: uhličitán vápenatý (CaCO_3), mastek, piliny nebo bavlněná a skleněná vlákna [32].

Polyimidy

Polyimidy jsou vysoce výkonné polymery obsahující cyklický imid a aromatické skupiny v hlavních řetězcích. Nejznámější polyimid je obecně znám pod obchodní značkou Kapton H (uveden na trh v 60. letech firmou DuPont) [33].

Polyimidy mají výborné dielektrické vlastnosti, teplotní stabilitu, mechanickou pevnost, chemickou odolnost a nízký koeficient teplotní roztažnosti. Tyto vlastnosti umožňují použití i za vysokých teplot (více než 500 °C) [34]. Kvůli špatné rozpustnosti

⁴ Vytvrzovací činidlo je látka, která podporuje síťování (vytvřování epoxidových pryskyřic). Vytvrzování může probíhat dvěma způsoby závisujícími na užitém činidle. Jedna z reakcí zvaná homopolymerizace je zahájena katalytickým činidlem (např. aminy), zatímco multifunkční činidlo zahájí tzv. polyadici/kopolymerizaci [24].

v organických rozpouštědlech se do struktury polyimidů začleňují asymetrické skupiny obsahující fluor. Další možností, jak zvýšit tuto rozpustnost, je snížení molekulární hmotnosti polyimidů. To však může způsobit zhoršení jejich výsledných tepelných i mechanických vlastností [35].

Díky skvělé kombinaci vlastností nalézají tyto materiály široké uplatnění v různých odvětvích průmyslu. Používají se např. pro letecké a kosmické aplikace, pro výrobu mikroelektronických a optoelektronických displejů nebo jako elektrická izolace (ve formě filmu) [36].

1.1.3 Vláknové kompozitní materiály

Výztuž tvoří silná tuhá a lehká vlákna, která mají za úkol zvýšit především pevnost, tuhost a snížit tepelnou roztažnost [37]. Tato vlákna mají největší vliv na vlastnosti výsledného kompozitu, zatímco hlavním úkolem matrice je především udržet vlákna na správném místě a ochránit je před vnějšími podmínkami [38]. Nejčastějšími materiály pro výrobu vláken jsou sklo, uhlík a Kevlar⁵, můžeme se však setkat i s vlákny založenými na bóru, karbidu křemíku, oxidu hlinitém nebo oxidu zirkoničitým [40]. Vláknové výplně jsou charakterizovány vysokou mechanickou pevností a tuhostí, obecně však platí, že jsou křehké. Tato jejich vlastnost pak může přispět ke zvýšení celkové křehkosti výsledného materiálu [41].

Při výběru vláken je pro nás důležitá jejich délka (dlouhá/krátká vlákna) a orientace, která ovlivňuje izotropii – krátká náhodně orientovaná vlákna vykazují izotropické chování, zatímco dlouhá vlákna orientovaná v jednom směru se chovají anizotropicky (při zatížení ve směru vláken jsou kompozity pevnější, ve směru kolmém ke směru vláken jsou však jejich vlastnosti horší) [42].

Matrice má na starost udržet vlákna na jejich místě, přenášet na ně zatížení, chránit je před mechanickým poškozením a zabránit šíření prasklin ve vláknech do celého kompozitu. Dále také určuje elektrické a chemické vlastnosti kompozitu a možnost jeho použití při vyšších teplotách [9]. Z hlediska materiálu matrice rozlišujeme čtyři typy

⁵ Kevlar[®] je obchodní značka materiálu, který je tvořen tepelně odolnými aramidovými vlákny, jejichž molekulární struktura sestávající z četných vazeb mezi řetězci jej činí velmi pevným a houževnatým. Tvůrcem Kevlaru je Stephanie Kwolek ze společnosti DuPont [39].

vláknových kompozitů: kompozity s kovovou matricí, kompozity s keramickou matricí, kompozity s polymerní matricí a kompozity uhlík/uhlík [43].

Nejrozšířenějšími materiály používanými v případě vláknových kompozitů jsou sklo a uhlík, které slouží k výrobě vláken, matrice je pak nejčastěji polymerní. Na kombinaci materiálů vláken a matrice také závisí některé vlastnosti kompozitu, důležité jsou především vazby mezi těmito dvěma fázemi⁶ [44].

Polymerní vláknové kompozity jsou lehké, pevné, odolné vůči korozi, mají upravitelné deformační chování a nízkou elektrickou vodivost (v závislosti na materiálu výztuže) [45]. To z nich dělá ideální materiály pro použití v automobilovém a leteckém průmyslu, civilním inženýrství i medicíně [46, 47].

1.1.4 Částicové kompozitní materiály

Výztuž je tvořena jednotlivými částicemi, jejichž účelem není na rozdíl od vláken zvýšit pevnost, ale spíše přinést různé kombinace jiných vlastností (elektrických, chemických, tepelných) [48]. Přestože hlavním záměrem použití částic jako výztuže není zlepšování mechanických parametrů kompozitů, jejich typ, tvar a prostorové uspořádání jsou klíčovými parametry v určování mechanického chování výsledného celku [49]. Z pohledu velikosti částic pak obecně platí, že jemnější částice mají za následek lepší parametry [50]. Do kategorie částicových kompozitů patří slinuté karbidy, abrazivní materiály, extra tvrdé polykrystalické kompozity, disperzně zesílené kompozity a kompozity z litých kovů [51].

Částice mohou mít prakticky jakýkoliv tvar, velikost i uspořádání [52]. Setkáme se s částicemi s pravidelnou strukturou (ty mohou být např. kulovité, krychlové nebo v podobě destiček), i s těmi, jejichž struktura je nepravidelná [53]. Velikost se pak může pohybovat od stovek mikrometrů až po rozměry v řádu nanometrů [54]. Na výrobu částic se používá velké množství materiálů, mezi nimi např. oxid zirkoničitý (ZrO_2), karbid křemíku (SiC),

⁶ Jak již bylo zmíněno dříve, jedním z úkolů matrice je přenášet zatížení na výztuž. Tento proces probíhá prostřednictvím rozhraní mezi nimi, a proto se klade velký důraz na jeho kvalitu. Síla této vazby také ovlivňuje mechanické vlastnosti kompozitu, jako jsou např. pevnost, tuhost nebo křehkost. V některých případech dokonce může na rozhraní dojít k vytvoření další fáze široké pouze několik atomů, jejíž chemické i mechanické vlastnosti jsou rozdílné od vlastností matrice i výztuže. Tato fáze zapříčiňuje porušení souvislosti krystalické i molekulární struktury kompozitu. Z tohoto důvodu se na výztuži někdy provádí povrchová úprava [3].

nitrid titanu (TiN) a disilicid molybdenu (MoSi_2). Například SiC se díky jeho dobré kompatibilitě s nitridy hojně používá u keramických matric [55].

Mezi částicové kompozity se řadí i mnohé polymery obsahující plniva. Nejtypičtějším příkladem je vulkanizovaný kaučuk, který obsahuje saze, jejichž částice dosahují průměru 5 – 500 nm. V tomto případě slouží ke zvýšení pevnosti, tuhosti, tvrdosti, odolnosti proti opotřebení a degradaci vlivem UV záření a tepelné odolnosti. Dále mohou být přidány jiné látky (např. uhličitan vápenatý CaCO_3), díky nimž se spotřebuje menší množství dražšího polymeru a které mohou také zlepšit některé vlastnosti. Mnohá plniva také bývají nositelem funkčních vlastností, příkladem jsou kovové prášky, které zlepšují elektrickou vodivost [9].

Částicové kompozity potkáváme denně všude kolem nás, názornými příklady mohou být beton, pneumatiky, magnety nebo zubní plomby. Také se často používají pro výrobu např. umělých kostí, rezných kotoučů nebo dílů pro automobilový a letecký průmysl [56].

1.2 Použití v elektrotechnice

Na rozdíl od kompozitů určených pro konstrukční účely, u kterých je kladen důraz především na mechanickou pevnost, elektrotechnické kompozity vyžadují dobrou tepelnou vodivost, nízkou tepelnou roztažnost a podle aplikace i vysokou/nízkou elektrickou vodivost [57]. Jejich vlastnosti, jako je vysoká elektrická pevnost, odolnost vůči elektrickému oblouku a především vysoká vnitřní a povrchová rezistivita, činí z kompozitů ideální materiály pro výrobu desek plošných spojů, izolátorů a izolačních systémů velkých točivých strojů. V elektronice se používají jako konstrukční prvky [58].

1.2.1 Desky plošných spojů (DPS)

U desek plošných spojů se setkáme s polymerními kompozitními materiály vyztuženými vlákny. Jako pojivo bývá použita organická nebo anorganická pryskyřice, nejčastějšími případy jsou fenolformaldehydové, epoxidové a polyesterové pryskyřice (pro neohebné desky) nebo polyethyltereftalát (PET), polyethylnaftalát (PEN) a polyimid (PI) jako ohebný základ. Výztuž může být tvořena skleněnými vlákny (rohož, tkanina), tvrzeným papírem nebo aramidovým, křemenným či uhlíkovým vláknem [59].

1.2.2 Izolační systémy elektrických točivých strojů

Izolace točivých strojů se dají podle velikosti provozního napětí rozdělit na dvě kategorie: nízkonapěťové a vysokonapěťové. U nízkonapěťových systémů se zaměřujeme na tři hlavní oblasti: izolace vinutí, vyložení drážky stroje a impregnace. Zde se setkáme s různými materiály, např. pryskyřice, bavlna, skleněná tkanina, lepenka a další. Vysokonapěťové systémy jsou z hlediska kompozitů mnohem zajímavější, používají se zde dvě technologie zpracování kompozitních materiálů nazývané resin-rich a VPI (Vacuum Pressure Impregnation) [60].

Resin-rich

Tato technologie je založena na použití tříslložkového kompozitu, jehož nosnou složkou je skleněná tkanina a izolační funkci plní plnivo v podobě kalcinovaného slídového papíru. Tyto dvě části jsou pak spojeny epoxidovou pryskyřicí. Materiál se dodává v částečně vytvrzeném stavu s obsahem pojiva přibližně 30 – 40 procent a to v podobě pásy o šířce 20 mm a tloušťce cca 0,15 – 0,2 mm [60]. Izolační páska se namotává přímo na vodiče pod mechanickým napětím 40 – 60 N a spolu s nimi je pak vkládána do drážek vinutí. Počet otoček udává tloušťku izolace (výsledná tloušťka po kompresi je přibližně o 25 – 30 % menší než po namotání). Celé vinutí se následně vloží do vyhřívaného lisu, kde je stlačeno na požadovaný rozměr. Proces probíhá na dvou teplotních hladinách – jednou z nich je teplota 100 °C, při níž začíná polymerizační reakce a dochází k nasáknutí pryskyřice do celého prostoru vinutí. Samotné vytvrzení pak následně probíhá při teplotě přibližně 170 °C po dobu 30 – 40 minut. Je důležité provést celý postup velmi pečlivě, jinak by během vytvrzování mohlo dojít k vytvoření vnitřních napětí, jež by měla za následek špatné propojení jednotlivých vrstev pásy mezi sebou nebo jejich oddělení od izolovaného vodiče. Také je nutné předejít vytvoření záhybů během namotávání pásy (zejména na okrajích), které by mohly způsobit zvětšení elektrického pole [61].

VPI (Vacuum Pressure Impregnation)

Tyto systémy jsou pojmenovány podle základní používané výrobní technologie, která se nazývá vakuově tlaková impregnace. Při ní je využíváno izolačních pásek, které jsou pouze částečně napuštěny nevytvrzenou pryskyřicí a následně omotány kolem vinutí. Princip této metody spočívá v ponoření takto ovinutého elektrického zařízení (nejčastěji statoru) do nádoby, kde je vysušeno, a jeho následném zaplavení pryskyřicí

(impregnantem) s nízkou viskozitou neobsahující rozpouštědla. Ta je poté zvýšeným tlakem za přítomnosti vakua natlačena skrz impregnovaný přístroj, aby vyplnila všechny mezery v izolaci. Po odstranění přebytečného impregnantu je izolace vinutí vytvrzena v peci nebo přímo ve VPI nádobě (impregnačním kotli), ve které byla ponořena. Izolační pásy, jež se zde používají, jsou nejčastěji vyrobeny ze slídového papíru vyztuženého skleněnou tkaninou na jedné straně a netkaným materiálem na straně druhé. Obsah pojiva (pryskyřice) v pásce se pohybuje od 10 do 25 procent, toto množství je dostačující ke spojení jejích vrstev během omotávání. V některých případech tyto pryskyřice neobsahují vytvrzovací činidlo, které je obsaženo v impregnantu a je jim dodáno během zaplavení (z tohoto důvodu bývají obě pryskyřice stejného typu). Nejčastěji používanými materiály jsou epoxidové nebo polyesterové pryskyřice. Polyestery jsou levnější a snazší na manipulaci, epoxidy oproti nim mají větší pevnost a chemickou odolnost [62].

2 Kompozitní materiály s funkčními vlastnostmi

Přírozně heterogenní struktura kompozitů umožňuje přidat další fáze materiálů, jež mohou být nositeli dodatečných vlastností, jako jsou elektrická vodivost, magnetické vlastnosti nebo jiné integrované funkce [63]. Běžně se setkáme s kompozity, u kterých jsou tyto vlastnosti zajištěny přímo použitou výplní (např. grafitové částice pro zlepšení elektrické vodivosti) [64], v dnešní době však stále probíhá výzkum zabývající se zakomponováním senzorů, ovladačů nebo antén přímo do kompozitu za použití různých metod, mezi něž patří 3D tisk [65] nebo vyšívání vodivými vlákny [66].

Na základě rešerše bylo zjištěno, že v české literatuře se na toto téma nenachází téměř žádné zdroje (články, výzkumy), z tohoto důvodu je pojmenování tohoto typu kompozitu nejasné. Také v zahraničí je výzkum věnovaný zmíněným materiálům zatím v počátečním stadiu a tak ani v anglické literatuře neexistuje jednotná terminologie. V souvislosti s kompozity s přidanými funkcemi je používáno několik názvů:

- „Smart composites“ (chytré kompozity) – nejčastěji používaný v souvislosti s materiály plnícími nějakou aktivní funkci, popř. pracujícími se signály (použitý např. v odkazech [67], [68], [82], [90]).
- „Advanced composites“ (pokročilé kompozity) – setkáme se s ním převážně u kompozitů, jejichž funkce souvisí hlavně s vylepšováním jejich struktury jako takové, např. zlepšování mechanických vlastností (využíván např. u odkazů [17] a [36]).

Tato dvě pojmenování používaná pro kompozity s přidanými funkcemi však také nejsou přesně definována a neexistuje ani žádné jasné dělení těchto materiálů. V úplných začátcích se při jejich popisu používalo označení „Functional Composites“ nebo „Composites with Functional Properties“, proto je pro účely této práce zvolen termín „kompozity s funkčními vlastnostmi“.

2.1 Přehled kompozitů s funkčními vlastnostmi

2.1.1 Samoléčitelné materiály

Samoléčitelné kompozity jsou perspektivní materiály, jež mají schopnost detekovat poškození dřívě, než dojde k poruše, a do jisté míry ho samy opravit [67]. Detekce

poškození může být provedena několika způsoby – sledováním rezistivity, kapacity nebo optickým sledováním [68, 69].

Sledování rezistivity se provádí u kompozitů s uhlíkovou výztuží a slouží k odhalení okem téměř neviditelného mechanického poškození. To je umožněno díky tomu, že uhlíková vlákna jsou ve své podstatě piezorezistivní, tzn. při změně mechanického namáhání (tlaku) dojde ke změně jejich rezistivity. Tato změna může být také zapříčiněna porušením vodivých cest uvnitř materiálu přímo vlivem poničení izolace [68]. Optické sledování používáme v případě výztuží ze skleněných vláken, které samy o sobě slouží jako snímací element, proto odpadá potřeba dalšího senzoru. Tato metoda dokáže odhalit místo poškození a dokonce i určit jeho rozsah. Stav izolace určíme pomocí přenosu světla skleněnými vlákny – do vláken je vysílán světelný paprsek, a pokud dojde k porušení materiálu, intenzita tohoto paprsku se na konci sníží (dojde k rozptylu) [68]. Při měření kapacity se část pramenů skleněných vláken v pravidelných intervalech nahradí vlákny uhlíkovými, a tím dojde k vytvoření kapacitorů uvnitř kompozitu. Bylo experimentálně prokázáno, že vytvoření prasklin a jejich šíření během mechanického namáhání způsobuje pokles kapacity uhlíkových vodičů, tyto změny jsou navíc citlivější, než je tomu u vodičů z mědi [69].

2.1.2 Kompozity pro senzory, aktuátory a převodníky

Kompozitní senzory mohou vzniknout integrováním samostatného senzoru mezi jednotlivé vrstvy laminovaného kompozitu. Hlavní problém u tohoto způsobu výroby je časté rozlaminování soustavy, zhoršení mechanických vlastností a především vznik a šíření trhlin v okolí zabudovaného senzoru [70]. Další možností je vytvoření senzorů přímo ze samotných kompozitů. Tato varianta je nejčastěji založena na použití piezoelektrických materiálů, tedy materiálů, u kterých při mechanickém namáhání dojde k vytvoření elektrického náboje [71]. Tyto materiály tvoří tzv. aktivní fázi a bývají kombinovány s fází pasivní (nosnou). Na výrobu aktivní (piezoelektrické) fáze se využívají různé keramiky, nejrozšířenější z nich je olovo-zirkonát-titanát (PZT)⁷. Pasivní fáze je převážně polymerní, lze se však setkat i s kovovou [72, 73].

⁷ PZT je piezoelektrická keramika tvořená smíšenými krystaly zirkonátu olova (PbZrO_3) a titanátu olova (PbTiO_3). Její struktura je polykrystalická a obsahuje různé domény skládající se z elementárních buněk, které mají krystalickou strukturu perovskitu [74]. Perovskity jsou syntetické sloučeniny mající krystalickou strukturu stejnojmenného přírodního minerálu a všechny sdílí strukturálně shodný chemický vzorec [75].

2.1.3 Kompozity s tvarovou pamětí

Kompozity s tvarovou pamětí (SMPC – Shape Memory Polymer Composites) jsou aktivní deformovatelné materiály, jež kombinují typické vlastnosti kompozitů a schopnost tvarové paměti [76]. Tato schopnost je zajištěna použitím matrice vyrobené z paměťových polymerů nebo integrováním těchto materiálů do struktury kompozitu. To může být provedeno např. nanesením pružného kompozitního pláště na pěnové paměťové jádro [77].

Polymery s tvarovou pamětí (SMP – Shape Memory Polymer) jsou látky, které mohou být formovány do libovolné podoby a působením vnějšího podnětu (teplo, světlo, magnetická nebo elektrická síla) se vrátit do svého původního tvaru [78]. Nejčastějším typem těchto polymerů jsou teplem aktivované, u nichž tento proces probíhá v tzv. termomechanickém cyklu. Během něj je polymer nejdříve zpracován do své originální podoby a pak se zahřátím vytvaruje do podoby nové. Aby se materiál vrátil zpět do původního tvaru, musí být zahřátý nad přechodovou teplotu. Poté může být opět tvarován. Přidání vláken nebo částic může způsobit zhoršení paměťových vlastností polymeru, bylo však prokázáno, že přítomnost pórů v jeho struktuře tyto parametry naopak vylepšuje. Díky tomu se zde otevírají aplikační možnosti pro tzv. pěnové kompozity, které jsou nejčastěji vyrobeny z epoxidu. Jejich výroba sestává ze dvou kroků – nejdříve se nevytvrzená pryskyřice v práškovém stavu smíchá s plnivem a vylisuje do pevné tablety. Pěnová struktura je následně vytvořena přímým zahřátím zmíněné tablety [77].

Jejich vlastnosti, jako jsou dobré zotavení z namáhání, nízká hustota, nízká cena, biokompatibilita a rozličné způsoby stimulace, dělají ze SMP polymerů a jejich kompozitů perspektivní materiály především v oblasti leteckého a kosmického průmyslu, biomedicíny a 4D tisku aktivních struktur [76, 78].

2.1.4 Nanokompozity

Nanokompozity vznikají smícháním nejčastěji polymerní spojitě fáze a anorganických částic nebo vláken s rozměry v řádu nanometrů (1 – 200 nm) [79]. Výplň tvořená nanovláknem nebo nanočásticemi jednak přispívá k vylepšení stávajících vlastností kompozitu, jako je např. pevnost, tuhost, termální a oxidační stabilita a bariérové vlastnosti, dále také přináší i nové unikátní vlastnosti, mezi něž patří samozhášení nebo biologická rozložitelnost [80]. Nejrozšířenějším materiálem využívaným v nanokompozitech je uhlík, nejčastěji ve formě uhlíkových nanotrubic nebo grafenu [81].

Příkladem nanokompozitu s funkčními vlastnostmi je hybridní piezokompozit vyztužený nanovlákný (konkrétně uhlíkovými nanotrubicemi). Jeho struktura je tvořena paralelními piezoelektrickými vlákny uloženými uvnitř kompozitu obsahujícího uhlíkové nanotrubice. Bylo prokázáno, že implementace uhlíkových nanotrubic výrazně zlepšila elastické i piezoelektrické vlastnosti oproti použití samotných piezoelektrických vláken [82].

2.1.5 Kompozity pro 3D tisk

3D tisk je v dnešní době stále více oblíbeným výrobním postupem, protože umožňuje rychlou výrobu dílů a součástí téměř jakéhokoliv podoby. Nejpoužívanější materiály jsou termoplasty, které je možné tavit a formovat do potřebných tvarů. Samotné termoplasty však postrádají potřebné vlastnosti pro průmyslové aplikace, protože mají nízkou chemickou, tepelnou a mechanickou stabilitu [83], nízký bod tání a nejsou příliš pevné [84]. Pro zlepšení těchto atributů se do termoplastů přidávají plniva, kterými jsou nejčastěji uhlíková vlákna, jež mají vysokou pevnost v tahu, tuhost, chemickou odolnost, teplotní toleranci a nízkou tepelnou roztažnost [83]. Tato vlákna mohou mít dvě základní formy – mohou být nasekaná (přerušovaná) nebo nepřerušovaná. Kompozity s nasekanými vlákny mohou být tištěny standardní metodou FDM (Fused Deposition Modelling)⁸, v případě nepřerušovaných vláken je potřeba speciální metoda zvaná CFF (Continuous Fiber Fabricating)⁹ [84].

Tento typ materiálů nalézá uplatnění převážně v oblasti elektroniky, kde nahrazuje klasické 2D tištěné elektrické obvody na plochem povrchu, protože v reálných aplikacích často potřebujeme vyrobit prototypy složitějších tvarů. V dnešní době proto probíhá snaha o vývoj 3D strukturální elektroniky, pro niž je 3D tisk ideální výrobní technologií. Jedním z příkladů je 3D konektor vyrobený z kompozitu tvořeného fotopolymerem a částicemi stříbra za použití technologie DLP (Digital Light Processing)¹⁰ [86].

⁸ FDM, jinak nazývané také FFF (Fused Filament Fabrication), je díky své nízké ceně a možnosti použití široké škály materiálů nejpoužívanější technikou 3D tisku. Filament, který je nejčastěji vyrobený z termoplastu, je vytlačen skrz nahřátou trysku a nanášen vrstvou po vrstvě na podložku. Tryska se nad podložkou pohybuje pomocí tříosého systému [85].

⁹ Technologie CFF využívá dvě tiskové trysky. Tisk každé vrstvy probíhá ve dvou krocích – nejdříve je vytisknut termoplast sloužící jako matrice a následně je do něj zažehleno uhlíkové vlákno. K tomu jsou potřebné speciální tiskárny. Tato metoda byla vyvinuta společností Markforged [84].

¹⁰ DLP je technika 3D tisku, která pracuje na principu vytvrzování tekuté pryskyřice tím, že je vystavena světlu z digitálního projektoru. Výsledný objekt je tvořen vrstvami, jež jsou vytvrzovány postupně. Tvar jednotlivých vrstev je dán šablonou, která vymezuje oblast, na kterou světlo dopadne [87].

Tištěné vodivé kompozity mohou být také použity pro vytvoření různých senzorů. Pro tyto aplikace byl testován např. vodivý materiál nazývaný „carbomorph“, jenž se skládá z polykaprolaktonové¹¹ matrice vyztužené sazemi. Díky svým poiezorezistivním vlastnostem je vhodný pro výrobu snímačů ohybu a také senzorů kapacity. Jeho výhodou je nízká cena a možnost tisku na běžné 3D tiskárně [88].

2.2 Aplikace kompozitů s funkčními vlastnostmi v elektroizolační technice

2.2.1 Vysokonapětové izolátory

Jednou z potenciálních oblastí pro využití kompozitů s funkčními vlastnostmi jsou systémy „smart grids“ (chytré sítě), které se zaměřují na zlepšení efektivnosti a spolehlivosti dodávky elektrické energie. Pro tyto technologie je potřeba vyvinout nové materiály pro izolátory a kompozity jsou díky svým vlastnostem vhodnou volbou [90]. Přenos a distribuce elektrické energie probíhá převážně na hladinách vysokého a velmi vysokého napětí. Dosud používané porcelánové (keramické) a skleněné izolátory mají dobré mechanické vlastnosti, jejich nevýhodou je ovšem křehkost a vysoká hmotnost. Proto se u vysokonapětových aplikací stále více setkáváme s využitím polymerních izolátorů [91]. Jako nejperspektivnější skupina materiálů se v této oblasti jeví nanokompozity s matricí ze silikonové pryže. Nanočástice rozptýlené v silikonu zlepšují jeho elektrické, mechanické, tepelné a erozivní vlastnosti [92] a přispívají ke zpomalení stárnutí izolace působením vnějších vlivů okolí (kyselý déšť, UV záření, vysoké teploty, mechanické a elektrické namáhání) [91]. Pro provoz ve znečištěném klimatu byla zkoumána aplikace izolátorových jader vyrobených z epoxidové pryskyřice s výplní tvořenou kombinací nano- a mikročástic, jež by měla lépe odolávat opotřebení v kontaminovaném prostředí [93].

Jako perspektivní materiály se v této oblasti mohou jevit také kompozity s nelineárními vodivostními charakteristikami, díky nimž jsou schopny ovlivňovat intenzitu elektrického pole a předcházet tak přetížení v důsledku jeho koncentrace v určitých místech. Příkladem takového materiálu je kompozit se silikonovou matricí, ve které jsou rozptýleny varistory o rozměrech v řádech mikrometrů vyrobené z oxidu zinečnatého (ZnO). Ty zajišťují, že vodivost daného materiálu je závislá na intenzitě elektrického pole [94]. Tyto vlastnosti způsobují snižování intenzity elektrického pole

¹¹ Polykaprolakton (PCL) je biologicky rozložitelný polyester, jehož teplota tání je pouze 60 °C a teplota skelného přechodu -60 °C [89].

v oblastech, kde by za normálních okolností docházelo k jejímu nárůstu (hrany, rohy, hroty), a tím napomáhají ke zpomalení stárnutí dielektrik [95].

2.2.2 Izolační systémy vysokonapěťových zařízení

Další oblastí možného použití kompozitů s funkčními vlastnostmi jsou izolace vysokonapěťových zařízení, jež jsou nedílnou součástí přenosové a distribuční soustavy. Největší množství poruch elektrických přístrojů je spojováno s degradací (stárnutím) dielektrik, a proto je výhodné použití chytrých izolačních systémů schopných monitorovat stav dielektrika a tím předejít poruše. Tyto systémy mohou být implementovány formou nátěru nebo přímo jako součást hmoty polymerní izolace. Pro monitorování stavu bylo zkoumáno použití fluorescenčních prvků (fluoroforů, např. pyren $C_{16}H_{10}$) integrovaných do výplně polymeru. Tyto prvky jsou schopny měnit své vlastnosti působením elektrického pole a mohou tak pomoci detekovat přítomnost elektrického náboje na dielektrickém systému [96]. Významné potenciální využití zde mají také samoléčitelné kompozitní materiály [90]. Schopnost obnovení vlastní struktury je do jisté míry běžnou vlastností kapalin a plynů, u pevných látek však byla všechna poškození dosud považována za trvalá. V dnešní době již sice byly představeny funkční materiály (nejčastěji polymery s plnivý) schopné opravit mechanické poškození ve své struktuře (říznutí, škrábnutí, prasknutí, propíchnutí), v oblasti elektrotechniky zde však narážíme na rozličné problémy. Jedním z nich je odlišnost elektrického poškození od toho mechanického, protože při něm dochází kromě fyzického průrazu (vytvoření hlavního vodivého kanálu) i k jeho rozvětvení a dále k elektrochemické, termochemické a fotochemické degradaci prvku. Další překážkou je také nedostatečná hodnota rezistivity většiny dnes známých samoléčitelných materiálů [97].

3 Experiment

Pro demonstraci chytrého kompozitního materiálu byla zvolena integrace antény do struktury kompozitu provedená vyšíváním vodivou nití přímo na kompozitní prepreg¹². S touto metodou již byly pokusy prováděny dříve a během těchto experimentů vyvstalo několik problémů, které komplikovaly využití tohoto řešení. Největší výzvou se ukázalo být zajištění toho, aby aktivní prvky vydržely vytvrzovací proces, potíže působilo také časté rozlaminování kompozitu v okolí implementovaného obvodu při dlouhodobějším používání [98]. Při pokusu prováděném pro účely této práce byl řešen pouze první z problémů, tedy provozuschopnost antén po vytvrzení, rozlaminování kompozitu by bylo zapotřebí zkoumat v delším časovém horizontu.

Funkčnost návrhu a správnost zvolených materiálů a postupů byla nejdříve ověřena vyšitím na bavlněnou tkaninu, následně pak bylo realizováno vyšití několika zkušebních vzorků kompozitů, na jejichž základě byly upraveny některé detaily návrhu. Tyto vzorky také napomohly optimalizaci výrobního postupu. Nakonec byla provedena samotná výroba finálních vzorků představených v této práci a jejich následné testování.

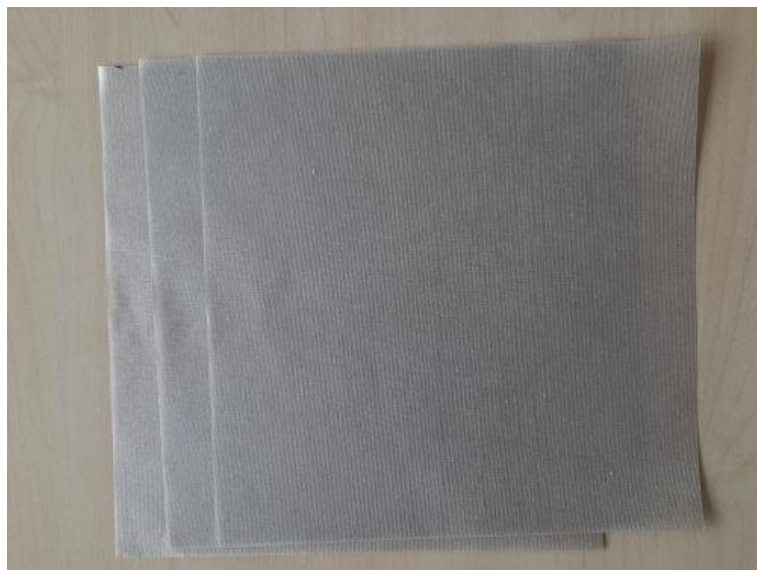
3.1 Použité materiály

3.1.1 Kompozitní prepregy

Experiment byl proveden s prepregy RikamicapregTM G355H (Obr. 1) od japonského výrobce Nippon Rika, jež jsou tvořeny slídovým papírem (kalcinovaný muskovit) a výztuží ze skleněné tkaniny s epoxidovou pryskyřicí plnicí roli pojiva. Dle výrobce je jejich plošná hustota $275 \pm 25 \text{ g/m}^2$ s obsahem slídy $140 \pm 10 \text{ g/m}^2$ a pojiva $107 \pm 15 \text{ g/m}^2$. Udávaná tloušťka materiálu je $0,18 \pm 0,02 \text{ mm}$. Rozměry konkrétních kusů použitých při výrobě vzorků jsou $23 \times 23 \text{ cm}$.

Díky svému složení mají tyto prepregy vysokou teplotní odolnost (max. provozní teplota je $155 \text{ }^\circ\text{C}$), dobré izolační vlastnosti (průrazné napětí dosahuje hodnot vyšších než 4 kV) a značnou flexibilitu umožňující snadnou manipulaci.

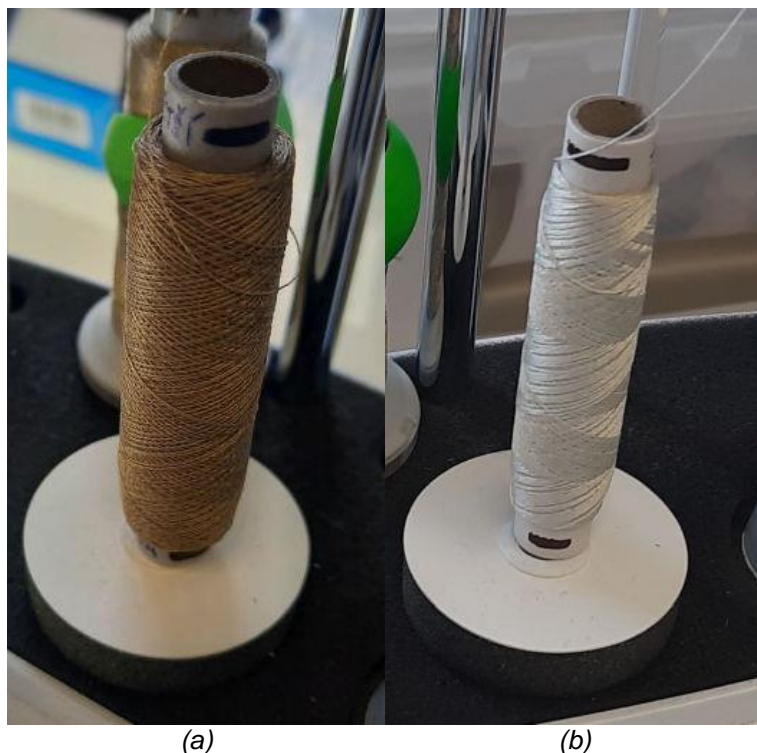
¹²Kompozitním prepregem je myšlena částicová nebo vláknová výplň naimpregnovaná materiálem, který tvoří matici (nejčastěji pryskyřice). V praxi se prepregy používají pro výrobu větších kompozitních struktur [99].



Obr. 1: Kompozitní prepregy Rikamicapreg™ G355H

3.1.2 Vodivé nitě

Na vyšití motivů u prvního vzorku byla použita vodivá hybridní nit č. 25A (Obr. 2a) od firmy VÚB a. s. (prodávána pod obchodní značkou CleverTex®), která se skládá z 30 % z vláken polyesteru (PES), zbylých 70 % pak tvoří mosazné drátky. Její elektrický odpor je $8,9 \Omega/\text{m}$ a optický průměr 0,22 mm. Antény příslušící tomuto vzorku byly dále označeny termínem „mosaz“.



Obr. 2: Vodivé hybridní nitě: (a) č. 25A mosaz a (b) č. 74/Y08 postříbřená měď

Vzorek č. 2 byl také vyšit nití značky CleverTex®, tentokrát se však jednalo o nit č. 74/Y08 (Obr. 2b) tvořenou z 24 % polyesterovými vlákny a ze 76 % postříbřenými měděnými drátky. Elektrický odpor je v tomto případě 2,9 Ω /m a optický průměr 0,24 mm. Antény na tomto vzorku nesou dodatečné označení „stříbro“. Jako spodní nit byla u obou prepregů zvolena polyesterová nit od firmy Amann prodávaná pod názvem ISA nebo ISABOB.

3.2 Použité přístroje

3.2.1 Šicí stroj BERNINA 750 QE

Antény byly vyšity pomocí šicího stroje BERNINA 750 QE (Obr. 3). Tento stroj je součástí série 7 a patří ke speciální edici pro quiltování¹³ (QE = Quilters Edition). Zmíněná edice má oproti standardním strojům tohoto výrobce delší rameno (prostor 254 mm vpravo od jehly) a umožňuje tedy vyšít větší výrobky. Pro tyto účely je také podporováno použití rámců o větších rozměrech, což umožnilo provedení experimentální části pro tuto bakalářskou práci, při níž byl použit právě jeden z těchto větších rámců (rozměry kompozitu nedovolovaly upnout vzorek do rámců standardní velikosti). Maximální rychlost vyšívání tohoto modelu je 1000 stehů za minutu [100]. Zvolena byla jehla Schmetz Gold 130/705 č. 90/14.



Obr. 3: Šicí stroj BERNINA 750 QE (Převzato z [100])

¹³ Quiltování je technika, při níž se ozdobným prošíváním spojí tři vrstvy látky. Nejčastěji se používá při výrobě dek a přehozů a její funkce je převážně dekorativní [102].

3.2.2 Laboratorní lis Carver 2518

K vytvrzení vzorků byl použit hydraulický laboratorní lis od firmy Carver, model 2518 (Obr. 4). Ten obsahuje dvě elektricky vyhřívané plotny o rozměrech 30,5×30,5 cm a dokáže vyvinout přítlačnou sílu o velikosti 22 tun (cca 50000 liber). Elektrické parametry pak jsou: napětí 230 V, frekvence 60 Hz¹⁴, příkon 4 kW a proud 11 A.



Obr. 4: Hydraulický laboratorní lis Carver 2518

3.2.3 LRC metr Keysight E4982A

Měření pasivních parametrů antén bylo provedeno pomocí RLC metru E4982A (Obr. 5) od firmy Keysight, který umožňuje nastavení frekvencí v rozsahu 1 MHz – 3 GHz a dokáže měřit impedance od 140 mΩ až do 4,8 kΩ. Také se vyznačuje vysokou rychlostí (0,9 ms, 2,1 ms nebo 3,7 ms v závislosti na použitém módu) a přesností (0,8 %) měření. Tento RLC také poskytuje možnost propojení s počítačem prostřednictvím LAN sítě nebo USB kabelu a také, pro snazší ovládání, připojení klávesnice a myši přes rozhraní Bluetooth. Dále obsahuje několik USB portů pro přímé zapojení přenosných pamětí a disků [101].

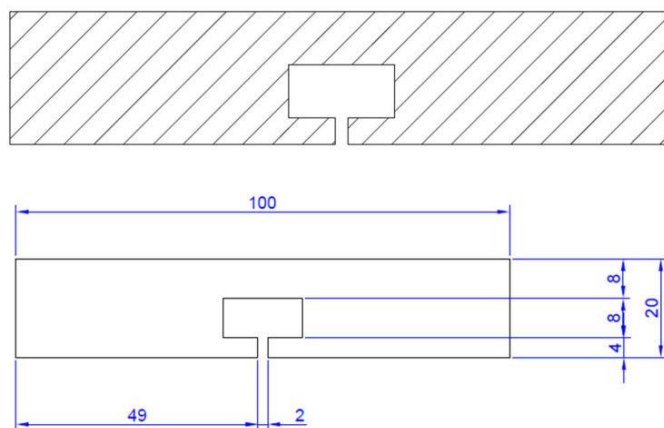
¹⁴ Tato hodnota je uvedena na štítku, protože se jedná o americký výrobek. Ve skutečnosti je lis napájen z českých 50 Hz.



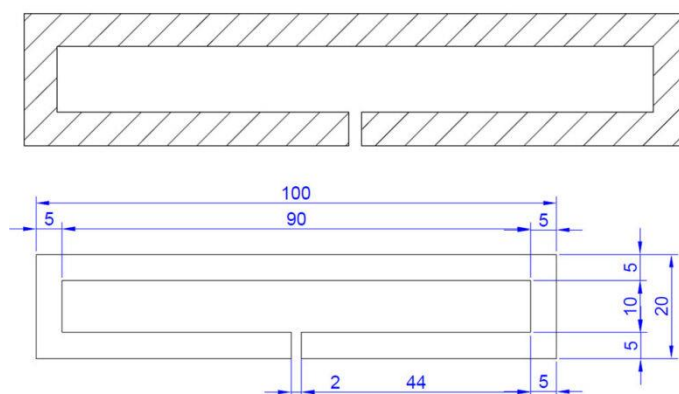
Obr. 5: RLC metr Keysight E4982A (Převzato z [101])

3.3 Návrh

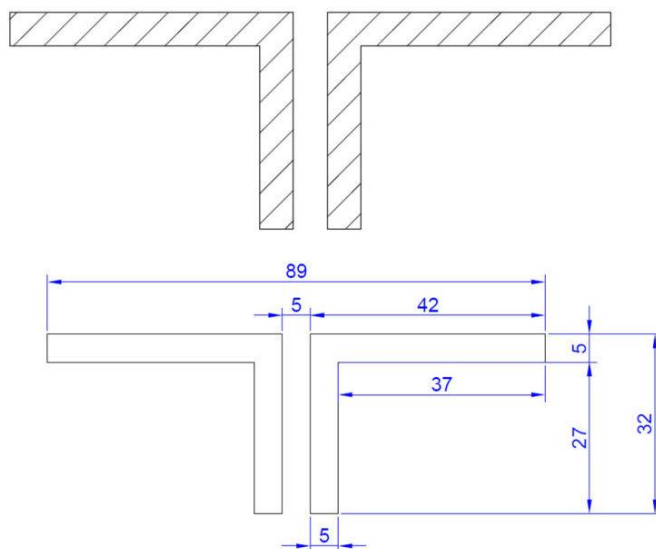
Při návrhu vzorků pro vyšívání byly použity tři různé designy antén (tím se dala alespoň částečně omezit možnost neúspěšnosti experimentu pramenící z nevhodně zvoleného typu antény, kdy by samotná konstrukce antény zapříčinila to, že by její vyšívání bylo složité, nebo dokonce nemožné). Konkrétně byly zvoleny dvě varianty antény typu „C“ (Obr. 6 a 7), každá z nich s jinými rozměry, a jedna anténa dipólová (Obr. 8). Pro účely této práce jsou jednotlivé návrhy antén dále nazývány „c1“, „c2“ a „dipól“.



Obr. 6: Návrh antény typu „c1“ (rozměry uvedeny v mm)

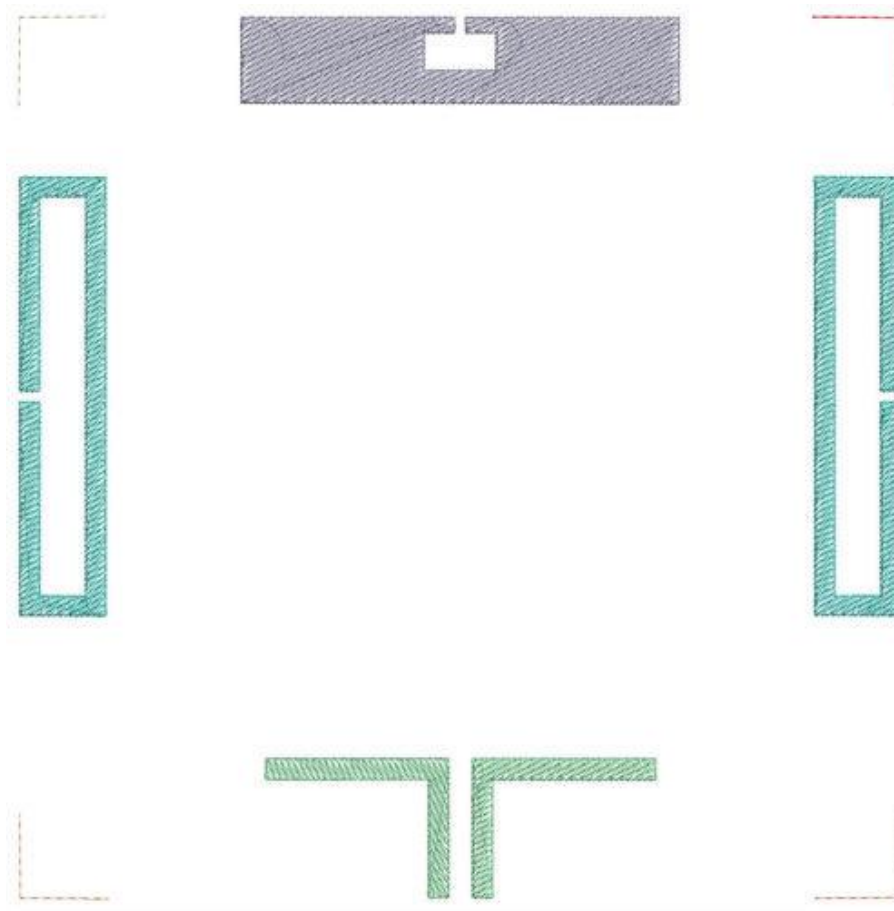


Obr. 7: Návrh antény typu „c2“ (rozměry uvedeny v mm)



Obr. 8: Návrh antény typu „dipól“ (rozměry uvedeny v mm)

Každá anténa byla překreslena v programu InkScape, z něž pak byla exportována do formátu *.pdf. Takto připravené obrázky poté již mohly být importovány do vyšívacího softwaru BERNINA Designer 8 (pracujícího s formátem *.ART70), který je kompatibilní s použitým šicím strojem. Výšivka byla v softwaru vytvořena rozmístěním antén na plochu omezenou rozměry prepregu. Na tuto plochu se bez potíží vešly všechny typy antén, z důvodu maximálního využití dostupného prostoru mohla být dokonce anténa typu „c2“ použita dvakrát (tímto bylo označení „c2“ rozděleno na „c2_1“ a „c2_2“). Po vytvoření zkušební sady bylo upraveno původní nastavení hustoty stehů, která musela být snížena na polovinu, jelikož na okrajích výšivky docházelo k jejímu oddělování od prepregu. Výsledná podoba návrhu vzorku je vidět na obrázku níže (Obr. 9).



Obr. 9: Finální návrh výšivky v softwaru BERNINA Designer 8 (rozložení antén na prepregu)

Jedním z problémů, které bylo během návrhu také třeba vyřešit, bylo kontaktování antén. Vyhodnocením zkušebních vzorků bylo zjištěno, že použití vodivé nitě ke kontaktování je nevhodné, jelikož při lisování dochází k nasáknutí pryskyřice a po vytvrzení k následnému lámání kontaktů. Z tohoto důvodu byla zmíněná varianta nahrazena použitím vodivé pružné stuhy.

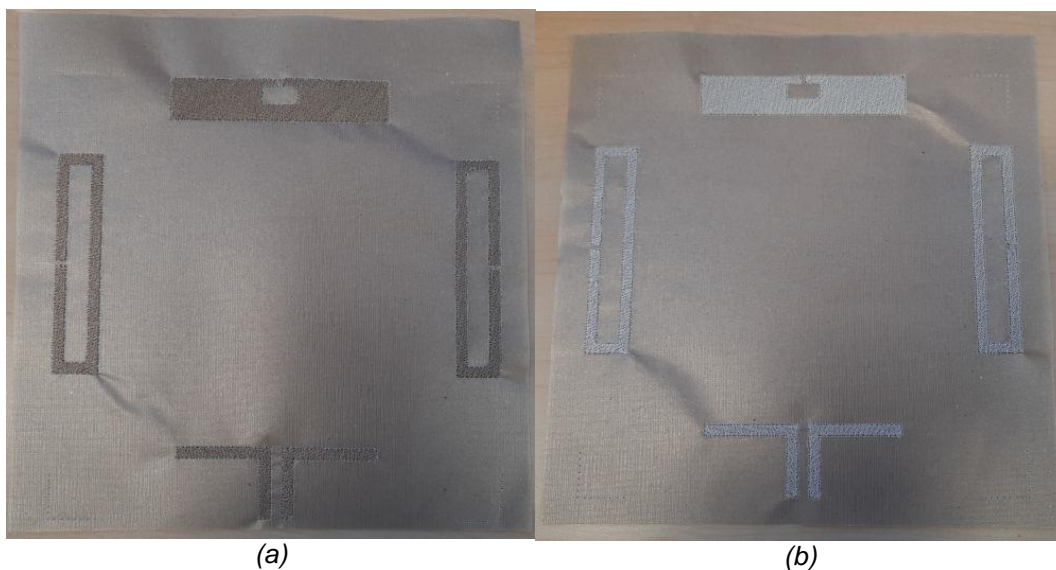
3.4 Výroba

Výrobní fáze funkčního kompozitu sestávala ze tří hlavních kroků – vyšití antén na kompozitní prepreg, následné vyvedení kontaktů pro měření a na závěr vytvrzení vzorku v lisu. Prepregy byly před svým použitím vyjmuty z mrazničky, kde musí být uchovávány, aby se zabránilo jejich samovolnému vytvrzování při pokojové teplotě.

3.4.1 Vyšívání

Před samotným započítím vyšívání bylo nutné design výšivky nahrát ze softwaru do paměti vyšívacího stroje. Následovalo vyšívání rovnou na prepreg, který kvůli svým

rozměrům nemohl být upnut přímo do rámu, byl tedy připevněn na pečicí papír za použití několika stehů v každém rohu. V oblasti výšivky musel být pečicí papír následně odstraněn. Vyšívání probíhalo po směru hodinových ručiček v pořadí „c2_1“, „dipól“, „c2_2“ a „c1“. Výšivka byla naprogramována tak, aby se stroj po vyšití každé antény zastavil, a bylo tak možné zkontrolovat, zda vyšívací proces proběhl v pořádku. Při přechodu z jedné antény na následující bohužel docházelo k odtrhnutí malé části v rohu výšivky od prepregu. Tento jev byl patrnější u mosazné nitě, která je pevnější než nit měděná postříbřená, a nebylo možné mu nijak zabránit. Na výslednou funkčnost antén však neměl žádný vliv.



Obr. 10: Vyšité vzorky: (a) mosaznou nití a (b) měděnou postříbřenou nití



Obr. 11: Detail vyšité antény „c2_1 mosaz“



Obr. 12: Detail vyšité antény „c1 stříbro“

3.4.2 Kontaktování

Po vyšití antén byly prostřednictvím pružné vodivé stuhy vyvedeny kontakty pro měření. U zkušebních vzorků byla stuha k anténám přišita vodivou nití, ukázalo se však, že lepší variantou je použít odporové svařování (viz Obr. 13). Byl změněn i typ stuhy, protože u té původní nevyhovovaly rozteče vodivých drah. Pro připojení k měřicímu přístroji pak byly následně na stuhu připájeny konektory SMA (viz Obr. 15). Po předchozích špatných zkušenostech s pájením konektorů přímo na stuhu, při němž docházelo vlivem zvýšené teploty ke spékání umělých vláken (a konektor navíc nedržel na drátcích vodivých drah), byly na konec stuhy přidány piny (viz Obr. 14), na které již bylo možné pájet bez potíží.



Obr. 13: Odporové přivaření vodivé stuhy k anténě



Obr. 14: Piny připevněné na konci stuhy pro pájení SMA konektorů

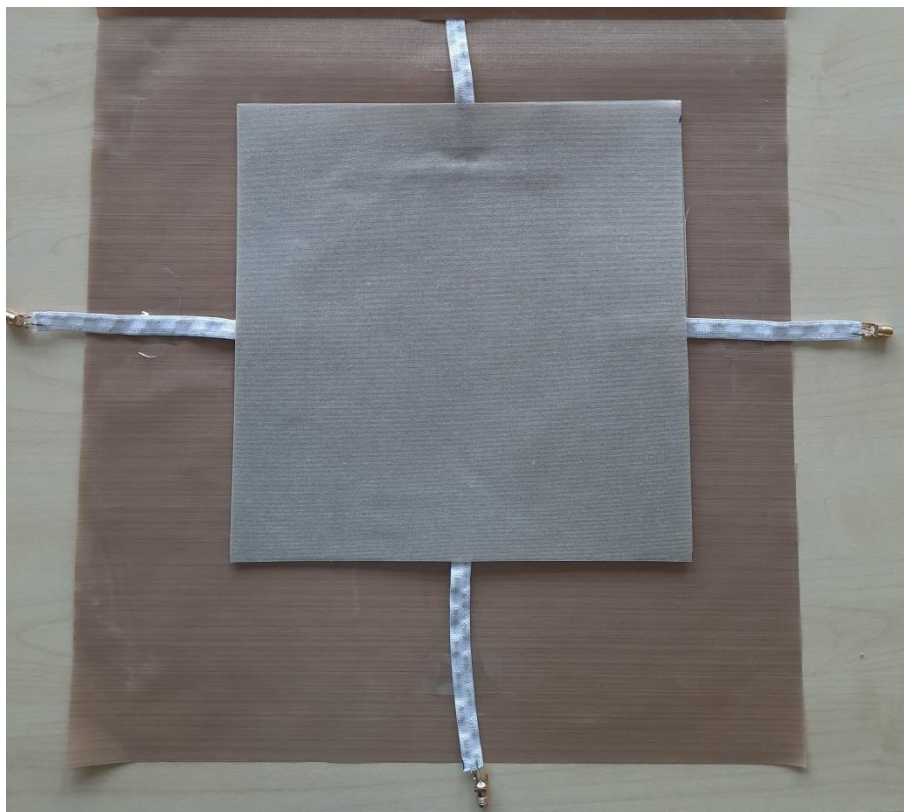


Obr. 15: Připájený SMA konektor

3.4.3 Lisování

Posledním krokem výrobního postupu bylo lisování vzorku, při kterém došlo k vytvrzení pryskyřice, jež probíhalo za zvýšené teploty a tlaku. Každý vzorek byl složen celkem ze čtyř vrstev prepregů (spodní vrstvu tvořil čistý prepreg, na který byl položen prepreg s anténami, jež byl následně zakryt dalšími dvěma prepregy, aby byla výšivka chráněna z obou stran). Přípravou na lisování bylo vložení vzorků mezi teflonové podložky (viz Obr. 16). Tento krok je velmi důležitý, protože se tím zamezí připečení pryskyřice na plotny lisu a zároveň slepení vzorků k sobě. Vodivé stuhy byly ke spodní podložce připevněny lepicí páskou, aby nedošlo k jejich nechtěnému posunu. Oba vzorky byly dány do lisu najednou – vzorek „mosaz“ byl položen na spodní plotnu, na něj byla dále umístěna kovová deska oddělující oba vzorky a na ni byl nakonec přidán vzorek „stříbro“. Vložení

bylo provedeno tak, aby se vyvedené kontakty nedotýkaly ploten lisu ani žádných dalších jeho částí (viz Obr. 17). Výsledná tloušťka vzorku po vytvrzení byla vymezena distančními plíšky umístěnými v rozích teflonové folie.

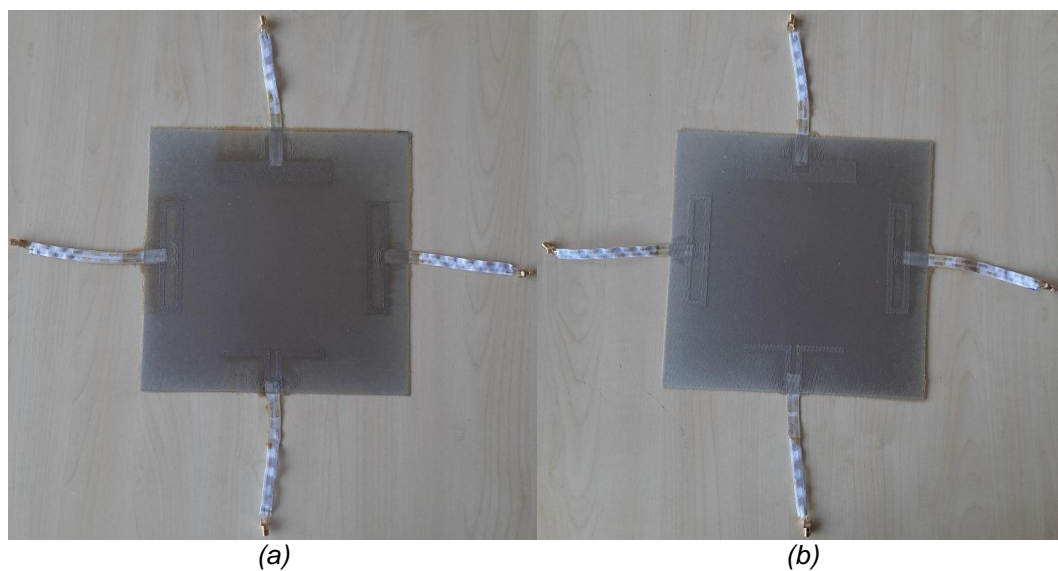


Obr. 16: Připravený vzorek k lisování na teflonové podložce

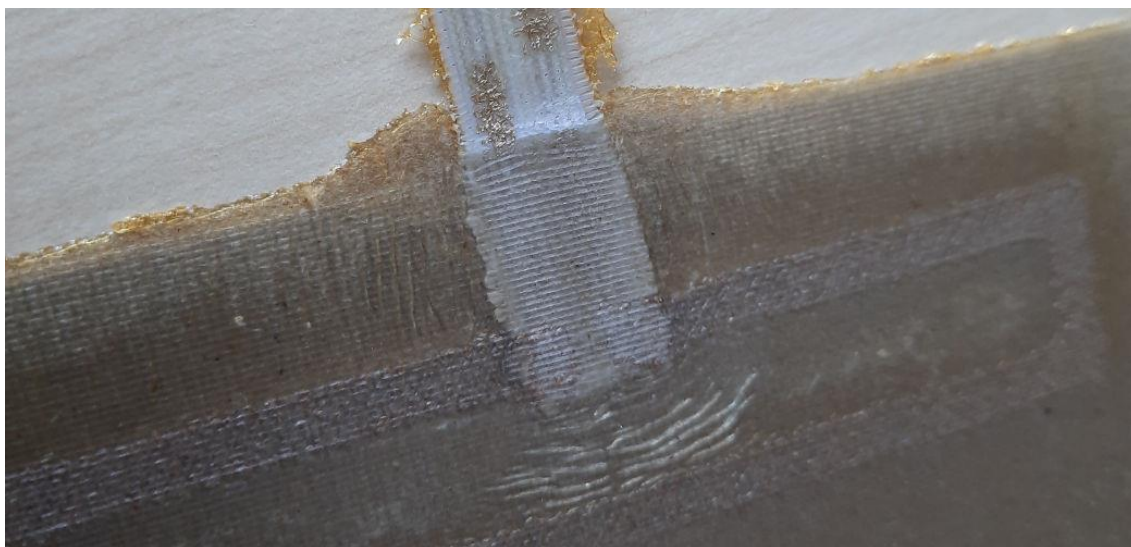
Po zapnutí lisu bylo zkontrolováno dotažení prepouštěcího ventilu a následně byl nastaven předtlak – topné plotny (horní a spodní) k sobě byly přiblíženy tak, aby se dotýkaly vzorků. Následně byly obě plotny zapnuty a byl spuštěn program řízeného ohřevu. Tento program byl nastaven tak, že nejdříve došlo k ohřátí na teplotu 100 °C, na které přístroj vydržel 5 min, a poté započal nárůst na konečnou teplotu vytvrzování 165 °C. Při zahájení topení na vyšší teplotu byl lis dotlakován na hodnotu 13 tun. Při této teplotě lis setrval 3 hodiny, a poté byl ohřev automaticky vypnut a vzorky se přes noc přirozeně zchladily na teplotu okolí. Následující den byly vzorky z lisu vyjmuty a očištěny od přebytečných zbytků pryskyřice.



Obr. 17: Uložení vzorků v lisu



Obr. 18: Vylisované vzorky: (a) vzorek č. 1 (mosaz) a (b) vzorek č. 2 (postříbřená měď)



Obr. 19: Detail spoje anténa/stuha po vytvrzení

3.5 Měření

Pro posouzení funkčnosti vyrobených vzorků bylo původně plánováno provedení měření rozptylových parametrů jednotlivých antén. Protože anténa je jednobran, měřil by se pouze parametr s_{11} , jenž je dán poměrem zpětně odraženého signálu na anténě a vysílaného signálu z měřicího přístroje. Ze závislosti tohoto parametru na frekvenci by bylo možné určit rezonanční frekvence, na kterých antény vysílají (to jsou frekvence, při kterých nedochází ke zpětnému odrazu signálu). Jako měřicí přístroj měl být původně použit síťový analyzátor integrity signálu LeCroy SPARQ 3002E. Porucha daného přístroje však zapříčinila, že toto měření nebylo možné realizovat.

Z tohoto důvodu bylo provedeno porovnání impedance v závislosti na frekvenci jednotlivých antén a určení jejich rezonanční frekvence. Měření bylo provedeno u každého vzorku dvakrát, jednou v nevytvrzeném stavu a podruhé po vytvrzení. Posuzována byla změna RLC parametrů antén před a po lisování. Oba vzorky byly následně porovnány mezi sebou, aby bylo rovněž zjištěno, jak jsou dané parametry závislé na použitém typu nitě.

Před samotným měřením musel být přístroj zkalibrován na požadovaný rozsah frekvencí. Kalibrování také bylo nutné provést při každé změně rozsahu. Vzorky byly následně postupně připojeny k měřicímu zařízení prostřednictvím připájených SMA konektorů. Všechny antény byly nejdříve měřeny v plném rozsahu RLC metru (1 MHz – 3 GHz), toto měření posloužilo k hrubému určení polohy rezonanční frekvence indikované výraznou změnou hodnot impedance. Resonanční frekvence byla velmi dobře patrná u

antén c1 a c2, v případě dipólu byla změna impedance málo patrná (viz naměřené průběhy v příloze B této práce). Na základě prvotních zjištění byly poté dodatečně změřeny průběhy antén typu „C“ v oblasti rezonance, to probíhalo při rozsahu 20 MHz – 600 MHz. Přístroj umožňoval měřené průběhy zobrazovat na obrazovce v reálném čase. Naměřená data byla nakonec vyexportována ve formátu *.csv pro další zpracování.



Obr. 20: Připojení vzorku k měřicímu přístroji Keysight E4982A

4 Vyhodnocení výsledků měření

Získané hodnoty z měření byly zpracovány v softwaru Microsoft Excel, ve formě tabulek a grafů. Z naměřených hodnot je patrné, že všechny měřené antény rezonují na určitých frekvencích po vyšití i po vytvrzení a dá se tedy předpokládat, že plní svoji funkci. Kdyby během výroby (vyšívání nebo vytvrzování) došlo k poškození struktury antén, při měření daných závislostí by k rezonanci nedošlo. Následující tabulka shrnuje hodnoty rezonančních frekvencí všech zkoumaných vzorků před vytvrzením a po vytvrzení.

Tab. 1: Hodnoty rezonančních frekvencí měřených vzorků před a po vytvrzení

f_{rez} (MHz)					
Vzorek č. 1			Vzorek č. 2		
	Před	Po		Před	Po
c1 mosaz	379,088	379,088	c1 stříbro	385,59	379,088
c2_1 mosaz	243,621	243,621	c2_1 stříbro	243,621	235,474
c2_2 mosaz	235,474	243,621	c2_2 stříbro	239,513	243,621
dipól mosaz	69,642	709,969	dipól stříbro	709,969	604,919

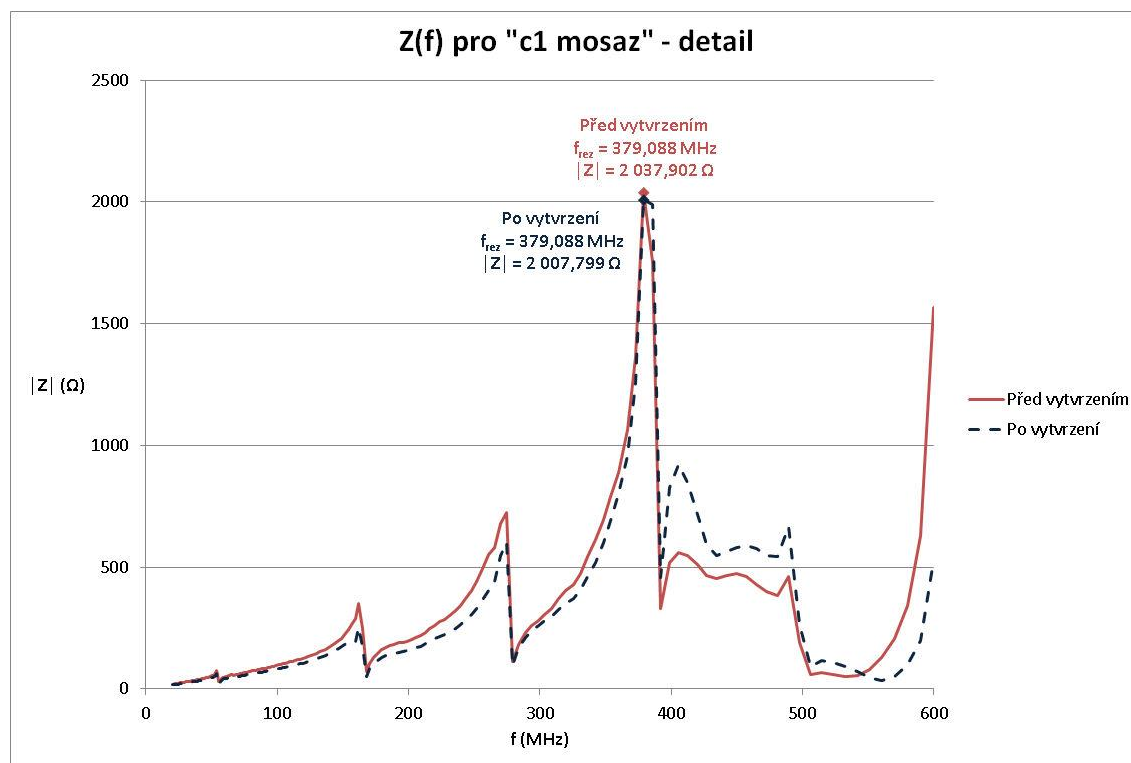
Z tabulky vidíme, že poloha rezonanční frekvence se po lisování vzorku nezměnila a že vytvrzování tedy na tento parametr nemá vliv. Výjimkou je anténa „dipól mosaz“, u níž se rezonanční frekvence zvětšila o celý řád, v tomto případě je však pravděpodobně důvodem to, že během výroby nedošlo k vytvoření kvalitního spoje mezi vyšitou anténou a vodivou stuhou určenou k připevnění SMA konektoru a následnému připojení k měřicímu přístroji. Při lisování poté došlo ke zlepšení tohoto kontaktu a tím i posunutí rezonanční frekvence. Dále vidíme, že hodnota rezonanční frekvence není závislá ani na použité niti. Z následující tabulky, obsahující hodnoty impedance v místě rezonance, je patrné, že na rozdíl od rezonanční frekvence došlo ke změně činitele kvality Q antén, který je daný jejich impedancí.

Tab. 2: Hodnoty impedance při rezonanční frekvenci měřených vzorků před a po vytvrzení

$ Z_{\text{rez}} $ (Ω)					
Vzorek č. 1			Vzorek č. 2		
	Před	Po		Před	Po
c1 mosaz	2037,902	2007,799	c1 stříbro	1967,574	1776,292
c2_1 mosaz	1109,949	1625,464	c2_1 stříbro	1814,472	1261,659
c2_2 mosaz	1151,553	1399,225	c2_2 stříbro	1649,114	1658,969
dipól mosaz	1191,741	2301,728	dipól stříbro	1914,818	1516,358

Jak můžeme vidět v tabulce, u antén „c1 mosaz“ a „c2_2 stříbro“ je rozdíl hodnot nepatrný, u ostatních antén je odchylka výraznější. Důvodem odlišného chování může být to, že činitel kvality je závislý především na činném odporu R antény, který je dán typem nitě a v tomto případě i provedením výšivky. Při vyšší dojde k různému propojení nití a tím i ke vzniku sériovo-paralelních propojení, která ovlivňují výslednou velikost odporu. Během lisování byly antény zality do pryskyřice a podrobeny zvýšenému tlaku, což mohlo způsobit další změnu těchto propojení a tedy i velikosti činného odporu.

Na dalším obrázku je pro ilustraci zobrazen graf průběhu impedance antény „c1 mosaz“ na frekvenci před laminací a po ní. Další grafy naleznete v příloze B.



Obr. 21: Graf závislosti impedance na frekvenci pro anténu „c1 mosaz“ – detail okolí rezonanční frekvence

V grafu vidíme, že v okolí rezonanční frekvence se objevují další dílčí rezonance, které mohou být způsobeny připojením vzorku k měřicímu přístroji (kontakt obsahuje několik spojů – připojení stuhly ke vzorku a připevnění SMA konektoru ke stuzce přes přidané piny).

Závěr

Cílem této práce bylo nejdříve obecně popsat kompozitní materiály, jejich druhy, dělení a použití v elektrotechnice. Důraz je zde kladen na typy kompozitů, které jsou z pohledu elektrotechniky nejzásadnější. Dále jsou charakterizovány materiály označované pojmem kompozity s funkčními vlastnostmi (známé též jako chytré nebo pokročilé kompozity) a na základě aktuálně probíhajících výzkumů po celém světě shrnuty základní poznatky týkající se těchto materiálů. Také jsou zde vyjmenovány jejich možné aplikace v oblasti elektroizolační techniky.

Třetí část je věnovaná popisu návrhu a výroby vlastního izolačního kompozitu s funkčními vlastnostmi. Vyrobeny byly dva vzorky obsahující ve své struktuře integrované antény. K tomuto účelu byla použita metoda vyšívání vodivou nití rovnou do kompozitního prepregu. V rámci této kapitoly jsou objasněny všechny kroky postupu přes návrh, vyšití a kontaktování až po vytvrzení v lisu. Na závěr je popsáno měření parametrů, jež bylo provedeno kvůli ověření, že výroba proběhla v pořádku a nenastal během ní žádný problém, který by znemožňoval funkčnost antén.

V poslední kapitole bylo na základě vyhodnocení výstupů z měření ověřeno, že antény splňují všechny předpoklady k tomu, aby plnily svoji funkci a byly schopny vysílat. Každý ze vzorků tedy obsahuje čtyři funkční antény, které by mohly sloužit k přenosu signálu v komunikační síti. V kombinaci s použitím senzoru na indikaci stavu izolace by takové izolační materiály mohly být použity k posílání informací o aktuálním stavu izolace obsluze zařízení nebo do databáze k jejich zaznamenávání třeba pro účely diagnostiky.

Kompozity jsou obecně perspektivní materiály prakticky ve všech oblastech průmyslu, kompozity s funkčními vlastnostmi však pro nás mají ještě větší význam. Elektroizolační systémy bývají nejporuchovějšími částmi elektrických zařízení a strojů a je potřeba vymýšlet nové způsoby, jak tyto systémy zefektivnit a pokud možno co nejvíce snížit jejich poruchovost. V tomto směru mají chytré kompozity velký potenciál, protože nabízejí vlastnosti, jež by mohly být klíčem ke zlepšení nejen odolnosti elektrických izolačních systémů vůči defektům, ale eventuálně i k jejich prevenci.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] CHAWLA, Krishan K. *Composite Materials: Science and Engineering*. 2. vyd. New York: Springer, 1998. ISBN 0-387-98409-7.
- [2] CLYNE, T. W., HULL, D. *An Introduction to Composite Materials* [online]. 3. vyd. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 346 s [15. 2. 2021]. ISBN 9781139050586. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/9781139050586>.
- [3] MATTHEWS, F. L., RAWLINGS, R. D. *Composite Materials: Engineering and Science*. 1. vyd. Cambridge: Woodhead Publishing, 1999. 480 s. ISBN 978-1855734739.
- [4] DANIEL, Isaac M., ISHAI, Ori. *Engineering Mechanics of Composite Materials*. 2. vyd. New York: Oxford University Press, 2006. 411 s. ISBN 978-0-19-515097-1.
- [5] CARDARELLI, Francois. *Materials Handbook: A Consise Desktop Reference*. 2. vyd. London: Springer, 2008. 1339 s. ISBN 978-1-84628-669-8.
- [6] DRÁPALA, Jaromír. *Materiály pro elektrotechniku*. 1. vyd. Ostrava: VŠB, 2013. 339 s. ISBN 978-80-248-3380-4.
- [7] TAUSIF, M., CASSIDY, T., BUTCHER, I. 3 - Yarn and thread manufacturing methods for high-performance apparel. In: MCLOUGHLIN, John, SABIR, Tasneem. *High-Performance Apparel* [online]. Woodhead Publishing Series in Textiles. 1. vyd. Woodhead Publishing, 2018, s. 33-73 [cit. 16. 2. 2021]. ISBN 9780081009048. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100904-8.00003-1>.
- [8] TIDECKS, Reinhard. Monocrystalline filaments (whiskers). In: *Current-Induced Nonequilibrium Phenomena in Quasi-One-Dimensional Superconductors* [online]. Springer Tracts in Modern Physics, vol. 121. 1. vyd. Berlin: Springer, 1990, s. 4-8 [cit. 16. 2. 2021]. ISBN 978-3-540-46720-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BFb0048851>.
- [9] ASKELAND, Donald R., FULAY, Pradeep P. *Essentials of Materials Science and Engineering*. 2. vyd. Toronto: Cengage Learning, 2008. 624 s. ISBN 978-0495244462.
- [10] CYRIAC, Ajith James. *Metal Matrix Composites: History, Status, Factors and Future*. Oklahoma, 2011. Diplomová práce. Oklahoma State University. Faculty of the Graduated College. Vedoucí práce Jay C. HANAN.
- [11] SINGLA, Manik, RAMAKANT, Rana, SURABHI, Lata. Microstructure and Mechanical Properties of Aluminium Based Metal Matrix Composite – A Review. *International Journal of Advanced Production and Industrial Engineering* [online]. Springer, 2019, vol. 517, s. 107-109 [cit. 18. 2. 2021]. ISSN 2455-8419. Dostupné z:

- https://www.researchgate.net/publication/317441184_Microstructure_and_Mechanical_Properties_of_Aluminium_Based_Metal_Matrix_Composite_-_A_Review.
- [12] STACHOWIAK, Gwindon W., BATCHELOR, Andrew W. *Engineering Tribology*. 2. vyd. Boston: Butterworth-Heinemann, 2001. 750 s. ISBN 978-0750673044.
- [13] CLYNE, T. W. 3.01 - An Introductory Overview of MMC Systems, Types, and Developments. In: KELLY, Anthony, ZWEBEN, Carl. *Comprehensive Composite Materials, Volume 3* [online]. Pergamon, 2006, s. 1-26 [cit. 18. 2. 2021]. ISBN 9780080429939. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B0-08-042993-9/00001-2>.
- [14] BAURI, Ranjit, YADAV, Devinder. *Metal matrix composites by friction stir processing* [online]. 1. vyd. Butterworth-Heinemann, 2017. 138 s. [cit. 18. 2. 2021]. ISBN 9780128137307. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-04019-6>.
- [15] SALEM, J. A., VERRILLI, M. J. Standardization and International Homogenization of Mechanical Testing. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* [online]. Elsevier, 2016 [cit. 21. 2. 2021]. ISBN 978-0-12-803581-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.03427-5>.
- [16] KAMAL, Shagufta, REHMAN, Maryam, REHMAN, Saima, NAZLI, Zill-i-Huma, YAQOOB, Nazia, NOREEN, Razia, IKRAM, Saiqa, MIN, Ho S. 10 – Blends of Algae With Natural Polymers. In: ZIA, K. M., ZUBER, M., ALI, M. *Algae Based polymers, Blends, and Composites: Chemistry, Biotechnology and Materials Science* [online]. 1. vyd. Elsevier, 2017 [cit. 21. 2. 2021]. ISBN 978-0-12-812360-7. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/321384824_Algae_Based_Polymers_Blends_and_Composites.
- [17] CAMPBELL, F. C. *Manufacturing Processes for Advanced Composites*. 1. vyd. Elsevier Science, 2003. 532 s. ISBN 978-1856174152.
- [18] NGUYEN, Hai, ZATAR Wael, MUTSUYOSHI, Hiroshi. 4 - Mechanical properties of hybrid polymer composite. In: THAKUR, Vijay Kumar, THAKUR, Manju Kumari, PAPPU, Asokan. *Hybrid Polymer Composite Materials* [online]. Woodhead Publishing, 2017, s. 83-113 [cit. 21. 2. 2021]. ISBN 9780081007877. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100787-7.00004-4>.
- [19] VARMA, I. K., GUPTA, V. B. 2.01 - Thermosetting Resin—Properties. In: KELLY, Anthony, ZWEBEN, Carl. *Comprehensive Composite Materials, Volume 2* [online]. Pergamon, 2000, s. 1-56 [cit. 21. 2. 2021]. ISBN 9780080429939. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B0-08-042993-9/00177-7>.
- [20] OUARHIM, Wafa, ZARI, Nadia, BOUHFID, Rachid, QAISS, Abou el kacem. 3 - Mechanical performance of natural fibers–based thermosetting composites. In: JAWAID, Mohammad, THARIQ, Mohamed, SABA, Naheed. *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* [online]. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Woodhead Publishing, 2019, s. 43-60 [cit. 2. 3. 2021]. ISBN

9780081022924. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00003-5>.
- [21] ABDELLAOUI, Hind, RAJI, Marya, BOUHFID, Rachid, QAISS, Abou el kacem. 2 - Investigation of the deformation behavior of epoxy-based composite materials. In: JAWAID, Mohammad, THARIQ, Mohamed, SABA, Naheed. *Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* [online]. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Woodhead Publishing, 2019, s. 29-49 [cit. 2. 3. 2021]. ISBN 9780081022931. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102293-1.00002-4>.
- [22] MAXINEASA, Sebastian George, TARANU, Nicolae. 24 - Life cycle analysis of strengthening concrete beams with FRP. In: PACHECO-TORGAL, F., MELCHERS, Robert E., SHI, Xianming, DE BELIE, Nele, VAN TITTELBOOM, Kim, SÁEZ, Andrés. *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures* [online]. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, 2018, s. 673-721 [cit. 2. 3. 2021]. ISBN 9780081021811. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102181-1.00024-1>.
- [23] GOODMAN, Sidney H. *Handbook of Thermoset Plastics*. 2. vyd. Williams Andrew, 1999. 601 s. ISBN 978-0-8155-1421-3.
- [24] ASHCROFT, W. R. Curing agents for epoxy resins. In: ELLIS, Bryan. *Chemistry and Technology of Epoxy Resins* [online]. Dordrecht: Springer, 1993, s. 37-71 [cit. 2. 3. 2021]. ISBN 978-94-011-2932-9. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-94-011-2932-9_2.
- [25] PASSOS, A. C., AROUCHE, M. M., AGUIAR, R. A. A., COSTA, H. R. M., DE BARROS, S., SAMPAIO, E. M. Adhesion of epoxy and polyurethane adhesives in pultruded composite material. *Journal of Advanced Joining Processes* [online]. Elsevier, 2021, vol. 3 [cit. 2. 3. 2021]. ISSN 2666-3309. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2021.100045>.
- [26] OLDRING, Peter K. T. Coatings, Colorants, and Paints. In: MEYERS, Robert A. *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)* [online]. Academic Press, 2003, s. 175-190 [cit. 2. 3. 2021]. ISBN 9780122274107. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00115-0>.
- [27] LUDA, Maria Paola, BALABANOVICH, A. I., ZANETTI, M. Pyrolysis of fire retardant anhydride-cured epoxy resins. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [online]. 2010, vol. 88, no. 1, s. 39-52 [cit. 2. 3. 2021]. ISSN 0165-2370. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.02.008>.
- [28] Unsaturated polyester resin. *Polynt* [online]. ©2016 [cit. 3. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.polynt.com/unsaturated-polyester-resin/>.
- [29] LOOS, Marcio. Chapter 2 - Composites. In: *Carbon Nanotube Reinforced Composites* [online]. William Andrew, 2015, s. 37-72 [cit. 3. 3. 2021]. ISBN 9781455731954. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3195-4.00002->

3.

- [30] DIMIAN, Alexandre C., BILDEA, Costin Sorin, KISS, Anton A. 17 - Polyesters. In: *Applications in Design and Simulation of Sustainable Chemical Processes* [online]. Elsevier, 2019, s. 681-717 [cit. 3. 3. 2021]. ISBN 9780444638762. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63876-2.00017-6>.
- [31] FRADET, Alain, ARLAUD, Patrick. 19 - Unsaturated Polyesters. In: ALLEN, Geoffrey, BEVINGTON, John C. *Comprehensive Polymer Science and Supplements* [online]. Pergamon, 1989, s. 331-344 [cit. 3. 3. 2021]. ISBN 9780080967011. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096701-1.00160-9>.
- [32] CRAWFORD, Roy J., THRONE, James L. 2 - ROTATIONAL MOLDING POLYMERS. In: ALLEN, Geoffrey, BEVINGTON, John C. *Plastics Design Library* [online]. Rotational Molding Technology. William Andrew, 2002, s. 19-68 [cit. 3. 3. 2021]. ISBN 9781884207853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-188420785-3.50004-6>.
- [33] HASEGAWA, M., HORIE, K. Photophysics, photochemistry, and optical properties of polyimides. *Progress in Polymer Science* [online]. Elsevier, 2001, vol. 26, no. 2, s. 259-335 [cit. 4. 3. 2021]. ISSN 0079-6700. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(00\)00042-3](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00042-3).
- [34] MCKEEN, Laurence W. 6 - Polyimides. In: *The Effect of Long Term Thermal Exposure on Plastics and Elastomers* [online]. William Andrew, 2014, s. 117-137 [cit. 4. 3. 2021]. ISBN 9780323221085. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-22108-5.00006-0>.
- [35] MITTAL, Kash L. *Polyimides and Other High Temperature Polymers: Synthesis, Characterization and Applications, volume 2* [online]. 1. vyd. London: CRC Press, 2003. 532 s [cit. 4. 3. 2021]. ISBN 9780429087981. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9789047403302>.
- [36] YANG, Shi-Yong, YUAN, Li-Li. Chapter 1 - Advanced Polyimide Films. In: YANG, Shi-Yong. *Advanced Polyimide Materials* [online]. Elsevier, 2018, s. 1-66 [cit. 4. 3. 2021]. ISBN 9780128126400. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812640-0.00001-9>.
- [37] MELBY, Earl G., CASTRO, Jose M. Glass-reinforced Thermosetting Polyester Molding: Materials and Processing. In: ALLEN, Geoffrey, BEVINGTON, John C. *Comprehensive Polymer Science and Supplements, Volume 7* [online]. Pergamon, 1989, s. 51-109 [cit. 7. 3. 2021]. ISBN 9780080967011. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096701-1.00206-8>.
- [38] CHAND, Navin, FAHIM, Mohammed. 2 - Introduction to tribology of polymer composites. In: *Tribology of Natural Fiber Polymer Composites* [online]. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Woodhead Publishing, 2008, s. 59-83 [cit. 7. 3. 2021]. ISBN 9781845693930. Dostupné z: <https://doi.org/10.1533/9781845695057.59>.

- [39] What is Kevlar®?. *DuPont* [online]. ©2021 [cit. 7. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.dupont.com/what-is-kevlar.html>.
- [40] DERRADJI, Mehdi, WANG, Jun, LIU, Wenbin. 5 - Fiber-Reinforced Phthalonitrile Composites. In: *Phthalonitrile Resins and Composites* [online]. Plastics Design Library. William Andrew Publishing, 2018, s. 241-294 [cit. 7. 3. 2021]. ISBN 9780128129661. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812966-1.00005-6>.
- [41] KENNY, Jose M., NICOLAIS, Luigi. 18 - Science and Technology of Polymer Composites. In: ALLEN, Geoffrey, BEVINGTON, John C. *Plastics Design Library* [online]. Comprehensive Polymer Science and Supplements. Pergamon, 1989, s. 471-525 [cit. 7. 3. 2021]. ISBN 9780080967011. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096701-1.00236-6>.
- [42] FU, Shao-yun, LAUKE, Bernd, MAI, Yiu-wing. Chapter 6 - Elastic modulus of short fibre-reinforced polymers. In: *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering* [online]. Science and Engineering of Short Fibre-Reinforced Polymer Composites. 2. vyd. Woodhead Publishing, 2019, s. 139-188 [cit. 7. 3. 2021]. ISBN ISBN 9780081026236. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102623-6.00006-8>.
- [43] ERDEN, Seçkin, HO, Kingsley. 3 - Fiber reinforced composites. In: SEYDIBEYOĞLU, M. Özgür, MOHANTY, Amar K., MISRA, Manjusri. *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering* [online]. Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites. Woodhead Publishing, 2017, s. 51-79 [cit. 7. 3. 2021]. ISBN 9780081018712. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101871-2.00003-5>.
- [44] DEB, A. 10 - Crashworthiness design issues for lightweight vehicles. In: MALLICK, P. K. *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering* [online]. Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles. Woodhead Publishing, 2010, s. 332-356 [cit. 7. 3. 2021]. ISBN 9781845694630. Dostupné z: <https://doi.org/10.1533/9781845697822.2.332>.
- [45] DOMM, Matthias. Printing of three-dimensional polymer composite structures with continuous fiber reinforcement. In: FRIEDRICH, Klaus, WALTER, Rolf, SOUTIS, Constantinos, ADVANI, Suresh G., FIEDLER, Bodo. *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering* [online]. Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components. Woodhead Publishing, 2020, s. 333-358 [cit. 7. 3. 2021]. ISBN 9780128195352. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819535-2.00011-9>.
- [46] HONG, Hu, ZHANG, Minglonghai, LIU, Yanping. 9 - Auxetic fibre-reinforced composites. In: *The Textile Institute Book Series* [online]. Auxetic Textiles. Woodhead Publishing, 2019, s. 285-335 [cit. 7. 3. 2021]. ISBN 9780081022115. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102211-5.00009-7>.
- [47] SCRIBANTE, Andrea, SFONDRINI, Maria Francesca. 11 - Orthodontic retainers.

- In: VALLITTU, Pekka, ÖZCAN, Mutlu. *Woodhead Publishing Series in Biomaterials* [online]. A Clinical Guide to Fibre Reinforced Composites (FRCs) in Dentistry. Woodhead Publishing, 2017, s. 182-202 [cit. 7. 3. 2021]. ISBN 9780081006078. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100607-8.00011-3>.
- [48] TANZI, Maria Cristina, FARÈ, Silvia, CANDIANI, Gabriele. Chapter 1 - Organization, Structure, and Properties of Materials. In: *Foundations of Biomaterials Engineering* [online]. Academic Press, 2019, s. 3-103 [cit. 22. 3. 2021]. ISBN 9780081010341. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101034-1.00001-3>.
- [49] BUCEVAC, Dusan. 7 - Heat treatment for strengthening silicon carbide ceramic matrix composites. In: LOW, I. M. *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering* [online]. Advances in Ceramic Matrix Composites. 2. vyd. Woodhead Publishing, 2018, s. 155-176 [cit. 22. 3. 2021]. ISBN 9780081021668. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102166-8.00007-4>.
- [50] CHAWLA, N., ALLISON, J. E. Fatigue of Particle Reinforced Materials. In: BUSCHOW, K. H. Jürgen, CAHN, Robert W., FLEMINGS, Merton C., ILSCHNER, Bernhard, KRAMER, Edward J., MAHAJAN, Subhash, VEYSSIÈRE, Patrick. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* [online]. Elsevier, 2001, s. 2967-2971 [cit. 22. 3. 2021]. ISBN 9780080431529. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00527-1>.
- [51] MARINESCU, Ioan D., ROWE, W. Brian, DIMITROV, Boris, INASAKI, Ichiro. 16 - Processed Materials. In: *Tribology of Abrasive Machining Processes* [online]. William Andrew Publishing, 2004, s. 635-663 [cit. 22. 3. 2021]. ISBN 9780815514909. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-081551490-9.50017-7>.
- [52] STAAB, George H. 1 - INTRODUCTION TO COMPOSITE MATERIALS. In: *Laminar Composites* [online]. Butterworth-Heinemann, 1999, s. 1-16 [cit. 22. 3. 2021]. ISBN 9780750671248. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-075067124-8/50001-1>.
- [53] ROTHON, Roger, DEARMITT, Christopher. Chapter 8 - Fillers (Including Fiber Reinforcements). In: GILBERT, Marianne. *Brydson's Plastics Materials* [online]. 8. vyd. Butterworth-Heinemann, 2017, s. 169-204 [cit. 22. 3. 2021]. ISBN 9780323358248. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00008-6>.
- [54] LANG, B. R., JAARDA M., WANG, R. F. Filler particle size and composite resin classification systems. *Journal of Oral Rehabilitation* [online]. Wiley, 1992, vol. 19, no. 6, s. 569-584 [cit. 30. 3. 2021]. ISSN 1365-2842. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2842.1992.tb01487.x>.
- [55] YU, Z. B., THOMPSON, D. P. 18 - Sialons. In: LOW, I. M. *Ceramic-Matrix Composites* [online]. Woodhead Publishing, 2006, s. 491-513 [cit. 22. 3. 2021]. ISBN 9781855739420. Dostupné z: <https://doi.org/10.1533/9781845691066.5.491>.

- [56] GERMAN, Randall M. *Particulate Composites. Fundamentals and Applications* [online]. 1. vyd. Springer, 2016. 436 s [cit. 22. 3. 2021]. ISBN 978-3-319-29917-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29917-4>.
- [57] CHUNG, D. D. L., ZWEBEN, Carl. 6.38 – Composites for Electronic Packaging and Thermal Management. In: KELLY, Anthony, ZWEBEN, Carl. *Comprehensive Composite Materials, Volume 6* [online]. Pergamon, 2000, s. 701-725 [cit. 2. 4. 2021]. 9780080429939. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B0-08-042993-9/00132-7>.
- [58] TOMÁŠKOVÁ, Tetjana. *Perspektivní kompozity pro elektrotechniku*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská Univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky a ekologie. Vedoucí práce Eva KUČEROVÁ.
- [59] STARÝ, Jiří, KAHLE, Petr. *Plošné spoje a povrchová montáž* [online]. Brno: VUT, 2011. 183 s [cit. 2. 4. 2021]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/2635621-Ing-jiri-stary-ph-d-ing-petr-kahle-plosne-spoje-a-povrchova-montaz.html>.
- [60] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [61] HELGESON, Anders. *Analysis of Dielectric Response Measurement Methods and Dielectric Properties of Resin-Rich Insulation During Processing*. Stockholm, 2000. Disertační práce. Kungl Tekniska Högskolan. Department of Electric Power Engineering. Division Electrotechnical Design.
- [62] STONE, George C., BOULTER, Edward A., CULBERT, Ian, DHIRANI, Hussein. *Electrical Insulation for Rotating Machines. Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. 1. vyd. IEEE Press, 2004. 392 s. ISBN 9780471445067.
- [63] MCNALLY, Tony. *Introducing Functional Composite Materials. Functional Composite Materials* [online]. Springer, 2020, vol. 1, no. 1 [cit. 5. 4. 2021]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s42252-020-00007-9>.
- [64] RADZUAN, Nabilah Afiqah Mohd, SULONG, Abu Bakar, SAHARI, Jaafar. A review of electrical conductivity models for conductive polymer composite. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2017, vol. 42, no. 14, s. 9262-9273 [cit. 5. 4. 2021]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.045>.
- [65] BODKHE, Sampada, VIGO, Lorenzo, ZHU, Shengyun, TESTONI, Oleg, AEGERTER, Nicole, ERMANNI, Paolo. 3D PRINTING TO INTEGRATE ACTUATORS INTO COMPOSITES. *Additive Manufacturing* [online]. Elsevier, 2020, vol. 35 [cit. 5. 4. 2021]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101290>.
- [66] BAUM, T. C., GHORBANI, K., GALEHDAR, A., NICHOLSON, K. J., ZIOLKOWSKI, R. W. Multi-functional composite metamaterial-inspired BEAD antenna for structural applications. In: *2016 International Workshop on Antenna*

- Technology (iWAT)* [online]. Cocoa Beach: IEEE, 2016, s. 144-147 [cit. 5. 4. 2021]. ISBN 978-1-5090-0267-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IWAT.2016.7434826>.
- [67] CATTERSON, V. M., CASTELLON, Jerome, PILGRIM, J. A., SAHA, Tapan Kumar. The impact of smart grid technology on dielectrics and electrical insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. IEEE, 2015, vol. 22, no. 6, s. 3505-3512 [cit. 6. 4. 2021]. ISSN 1558-4135. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.00518>.
- [68] SWAIT, Tim, RAUF, Abdul, GRAINGER, R., BAILEY, P., LAFFERTY, Austin, FLEET, Elliot, HAND, Russell, HAYES, S. Smart composite materials for self-sensing and self-healing. *Plastics, Rubber and Composites* [online]. Taylor and Francis, 2012, vol. 41, no. 4/5, s. 215-224 [cit. 6. 4. 2021]. ISSN 1465-8011. Dostupné z: <https://doi.org/10.1179/1743289811Y.0000000039>.
- [69] BUGGISH, C., GAGANI, A., FIEDLER, B. Capacitance measurements on integrated conductors for detection of matrix cracks in GFRP. *Functional Composite Materials 2* [online]. Springer, 2021, vol. 2, no. 1, s. 215-224 [cit. 6. 4. 2021]. ISSN 2522-5774. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s42252-020-00013-x>.
- [70] MONTAZERIAN, Hossein, RASHIDI, Armin, MILANI, Abbas S., HOORFAR, Mina. Integrated Sensors in Advanced Composites: A Critical Review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences* [online]. Taylor and Francis, 2020, vol. 45, no. 3, s. 187-238 [cit. 14. 4. 2021]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10408436.2019.1588705>.
- [71] NEWNHAM, R. E. Composite Sensors and Actuators. In: GOLDEN, K. M., GRIMMETT G. R., JAMES, R. D., MILTON, G. W., SEN, P. N. *Mathematics of Multiscale Materials*. The IMA Volumes in Mathematics and its Applications, vol 99 [online]. New York: Springer, 1998, s. 209-211 [cit. 14. 4. 2021]. ISBN 978-1-4612-1728-2. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1728-2_12.
- [72] TRESSLER, J. F., ALKOY, S., DOGAN, A., NEWNHAM, R. E. Functional composites for sensors, actuators and transducers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. Elsevier, 1999, vol. 30, no. 4, s. 477-482 [cit. 14. 4. 2021]. ISSN 1359-835X. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(98\)00137-7](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(98)00137-7).
- [73] BOLLER, C. Composites for Sensors and Actuators. In: BUSCHOW, K. H. Jürgen, CAHN, Robert W., FLEMINGS, Merton C., ILSCHNER, Bernhard, KRAMER, Edward J., MAHAJAN, Subhash, VEYSSIÈRE, Patrick. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* [online]. Elsevier, 2001, s. 1376-1382 [cit. 14. 4. 2021]. ISBN 9780080431529. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00256-4>.
- [74] Základy piezokeramické technologie. *CeramTec* [online]. 2003 [cit. 14. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/piezo-ceramics/basics/>.

- [75] PHILLIPS, Lee. 9 - Solar energy. In: LETCHER, Trevor M. *Managing Global Warming. An Interface of Technology and Human Issues* [online]. 1. vyd. London: Academic Press, 2019, s. 317-332 [cit. 14. 4. 2021]. ISBN 9780128141045. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-5.00009-0>.
- [76] MU, Tong, LIU, Liwu, LAN, Xin, LIU, Yanju, LENG, Jinsong. Shape memory polymers for composites. *Composites Science and Technology* [online]. Elsevier, 2017, vol. 160, s. 169-198 [cit. 15. 4. 2021]. ISSN 0266-3538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.03.018>.
- [77] SANTO, Loredana, QUADRINI, Fabrizio, ACCETTURA, Antonio, VILLADEI, Walter. Shape Memory Composites for Self-deployable Structures in Aerospace Applications. *Procedia Engineering* [online]. Elsevier, 2014, vol. 88, s. 42-47 [cit. 15. 4. 2021]. ISSN 1877-7058. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.124>.
- [78] XIN, Xiaozhou, LIU, Livu, LIU, Yanju, LENG, Jinsong. Prediction of effective thermomechanical behavior of shape memory polymer composite with micro-damage interface. *Composites Communications* [online]. Elsevier, 2021, vol. 25 [cit. 15. 4. 2021]. ISSN 2452-2139. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100727>.
- [79] SEN, Mousumi. Nanocomposite Materials. In: *Nanotechnology and the Environment* [online]. IntechOpen, 2020 [cit. 16. 4. 2021]. ISBN 978-1-78985-671-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/intechopen.93047>.
- [80] SCHMIDT, Daniel, SHAH, Deepak, GIANNELIS, Emmanuel P. New advances in polymer/layered silicate nanocomposites. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* [online]. Elsevier, 2002, vol. 6, no. 3, s. 205-212 [cit. 16. 4. 2021]. ISSN 1359-0286. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1359-0286\(02\)00049-9](https://doi.org/10.1016/S1359-0286(02)00049-9).
- [81] HASSANZADEH-AGHDAM, M. K. Evaluating the effective creep properties of graphene-reinforced polymer nanocomposites by a homogenization approach. *Composites Science and Technology* [online]. Elsevier, 2021, vol. 209 [cit. 16. 4. 2021]. ISSN 0266-3538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108791>.
- [82] GODARA, S. S., MAHATO, P. K. Micromechanical technique based prediction of effective properties for hybrid smart nanocomposites. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* [online]. Taylor and Francis, 2020, s. 1-12 [cit. 16. 4. 2021]. ISSN 1537-6494. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1851827>.
- [83] BO, Zhenyu, CHOI, Jia. 3D Printing of Carbon Fiber-Reinforced Composites. In: *Sigma-Aldrich* [online]. [Cit. 17. 4. 2021]. Dostupné z: https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/technology-spotlights/3d-printing-of-carbon-fiber-reinforced-composites.html?gclid=EAIaIQobChMI1YCgg-Lz7wIVFKWyCh0YmACxEAAYAAAEgIEd_D_BwE.

- [84] 3D Printing Carbon Fiber and Other Composites. *Markforged* [online]. ©2021 [cit. 17. 4. 2021]. Dostupné z: <https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-plastics-composites/understanding-3d-printing-strength/3d-printing-carbon-fiber-and-other-composites>.
- [85] PENUMAKALA, Pavan Kumar, SANTO, Jose, THOMAS, Alen. A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites. *Composites Part B: Engineering* [online]. Elsevier, 2020, vol. 201 [cit. 17. 4. 2021]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108336>.
- [86] WANG, Xin, JIANG, Man, ZHOU, Zuowan, GOU, Jihua, HUI, David. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering* [online]. Elsevier, 2017, vol. 110, s. 442-458 [cit. 17. 4. 2021]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.
- [87] SLA vs. DLP: Guide to Resin 3D Printers. *Formlabs* [online]. 2020 [cit. 17. 4. 2021]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>.
- [88] LEIGH, Simon, BRADLEY, Robert, PURSSELL, Christopher, BILLSON, Duncan, HUTCHINS, David. A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors. *PLoS ONE* [online]. Public Library of Science, 2012, vol. 7, no. 10 [cit. 17. 4. 2021]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049365>.
- [89] NAIR, N. R., SEKHAR, V. C., NAMPOOTHIRI, K. N., PANDEY, A. 32 - Biodegradation of Biopolymers. In: PANDEY, Ashok, NEGI, Sangeeta, SOCCOL, Carlos Ricardo. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* [online]. Elsevier, 2017, s. 739-755 [cit. 17. 4. 2021]. ISBN 9780444636621. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63662-1.00032-4>.
- [90] PIGINI, Alberto. "Smart" Insulators for Smart Grids. In: *INMR* [online]. January 2, 2021 [cit. 1. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.inmr.com/smart-insulators-smart-grid/>.
- [91] KHAN, Hidayatullah, AMIN, Muhammad, AHMAD, Ayaz. Characteristics of Silicone Composites for High Voltage Insulations. *Reviews on Advanced Materials Science* [online]. De Gruyter, 2018, vol. 56, no. 1, s. 91-123 [cit. 1. 5. 2021]. ISSN 1605-8127. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/rams-2018-0040>.
- [92] AHMED, Waqar, AMIN, Muhammad, AHMED, Khaleeq, MEHMOOD, Shahid, FAYAZ, A., MUJTABA, M. A., SOUDAGAR, M. E. M., GUL, Mustabshirha. Characteristics investigation of silicone rubber-based RTV/ μ ATH@nSiO₂ micro/nano composites for outdoor high voltage insulation. *Journal of Dispersion Science and Technology* [online]. Taylor and Francis, 2021, vol. 42 [cit. 1. 5. 2021]. ISSN 1532-2351. Dostupné z: DOI [10.1080/01932691.2020.1857262](https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1857262).
- [93] KURUVILLA, S. P., RENUKAPPA, N. M., RAJAN, R. S. Development of Epoxy with Nano and Micro Fillers for Core Insulation of Composite Insulators. In: *2019*

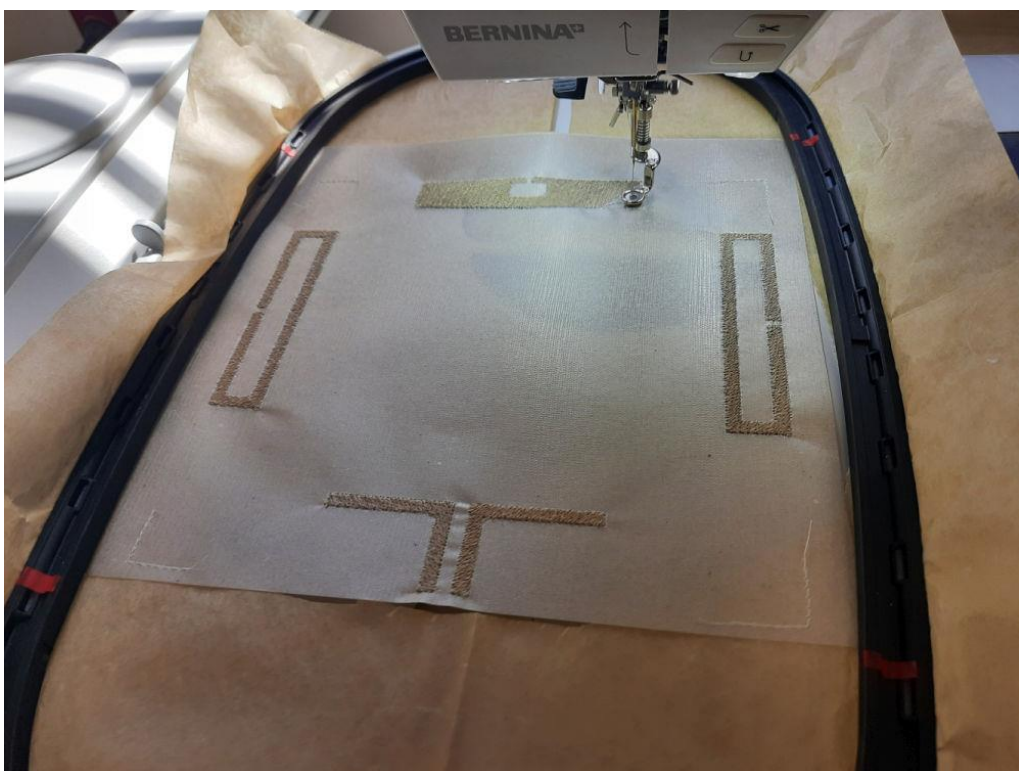
- International Conference on High Voltage Engineering and Technology (ICHVET)*[online]. Hyderabad: IEEE, 2019, s. 1-5 [cit. 1. 5. 2021]. ISBN 978-1-5386-7576-2. Dostupné z: DOI [10.1109/ICHVET.2019.8724139](https://doi.org/10.1109/ICHVET.2019.8724139).
- [94] YANG, Xiao, ZHAO, Xiaolei, HU, Jun, HE, Jinliang. Grading electric field in high voltage insulation using composite materials. *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. IEEE, 2018, vol. 34, no. 1, s. 15-25 [cit. 1. 5. 2021]. ISSN 1558-4402. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/MEI.2018.8246118>.
- [95] YANG, Xiao, HU, Jun, CHEN, Shuiming, HE, Jinliang. Understanding the Percolation Characteristics of Nonlinear Composite Dielectrics. *Scientific Reports* [online]. Springer Nature, 2016, vol. 6, no. 30597 [cit. 1. 5. 2021]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/srep30597>.
- [96] HOLT, A. F., TOPLEY, A. C., BROWN, Richard, LEWIN, Paul, VAUGHAN, Alun, LANG, P. Towards Intelligent Insulation Technologies. In: *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, ICSD 2010* [online]. Potsdam: IEEE, 2010, s. 818-821 [cit. 1. 5. 2021]. ISBN 978-1-4244-7944-3. Dostupné z: [10.1109/ICSD.2010.5568243](https://doi.org/10.1109/ICSD.2010.5568243).
- [97] YANG, Yang, DANG, Zhi-Min, LI, Qi, HE, Jinliang. Self-Healing of Electrical Damage in Polymers. *Advanced Science* [online]. Wiley, 2020, vol. 7, no. 21 [cit. 1. 5. 2021]. ISSN 2198-3844. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/adv.202002131>.
- [98] BAUM, Thomas C., ZIOLKOWSKI, Richard W., GHORBANI, Kamran, NICHOLSON, Kelvin J. Embroidered Active Microwave Composite Preimpregnated Electronics—Pregtronics. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* [online]. IEEE, 2016, vol. 64, no. 10, s. 3175-3186 [cit. 2. 5. 2021]. ISSN 1557-9670. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2600369>.
- [99] VASHISTH, Aniruddh, HEALEY, Reagan E., POSPISIL, Martin J., OH, Ju Hyun, GREEN, Micah J. Continuous processing of pre-pregs using radio frequency heating. *Composites Science and Technology* [online]. Elsevier, 2020, vol. 195 [cit. 2. 5. 2021]. ISSN 0266-3538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108211>.
- [100] BERNINA 750 QE with the BERNINA Stitch Regulator – simply magnificent quilting. *BERNINA* [online]. 2014 [cit. 3. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.bernina.com/cs-CZ/Stroje-CZ/Prehled-rad/BERNINA-rada-7/BERNINA-750-QE>.
- [101] E4982A LCR Meter, 1 MHz To 300 MHz / 500 MHz / 1 GHz / 3 GHz. *Keysight* [online]. ©2000-2021 [cit. 3. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/zz/en/product/E4982A/lcr-meter-1-mhz-300-mhz-500-mhz-1-ghz-3-ghz.html>.
- [102] KOLEJOVÁ, Monika. Quiltování, quilting, prošívání. In: Vyšívání [online]. [Cit. 15. 5. 2021]. Dostupné z: <https://vysivani.nej-sici-stroje.cz/clanek/quiltovani-quilting-prosivani/42/>.

Přílohy

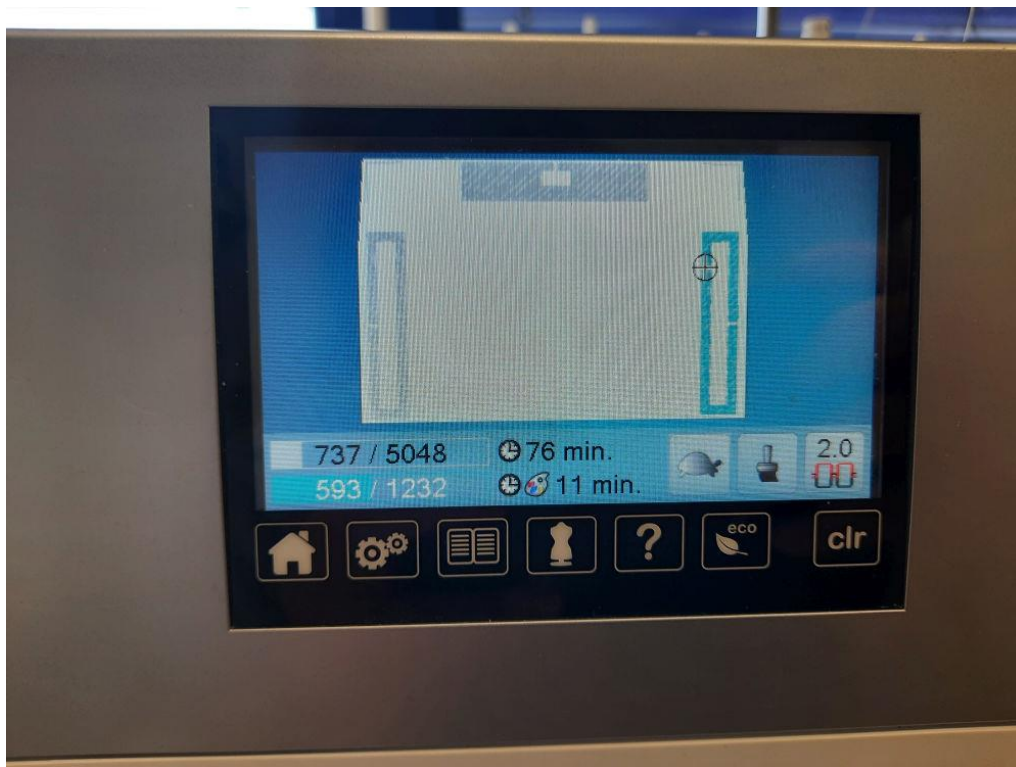
Příloha A – Fotodokumentace výroby a měření



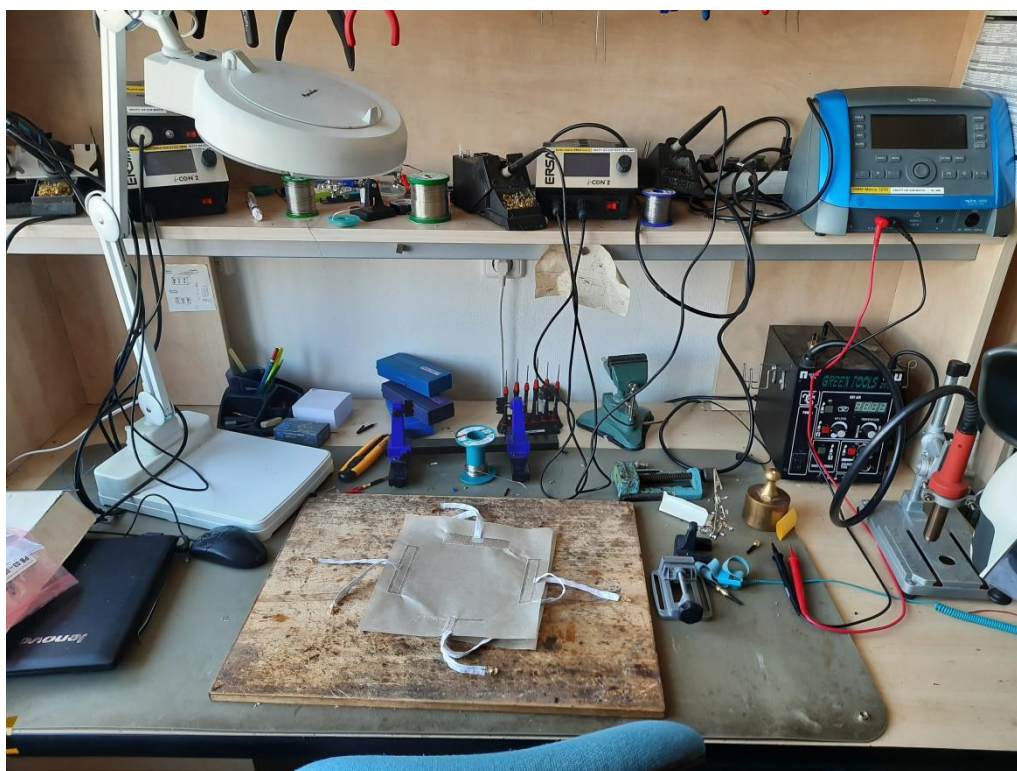
Obr. A1: Vyšívací stanoviště



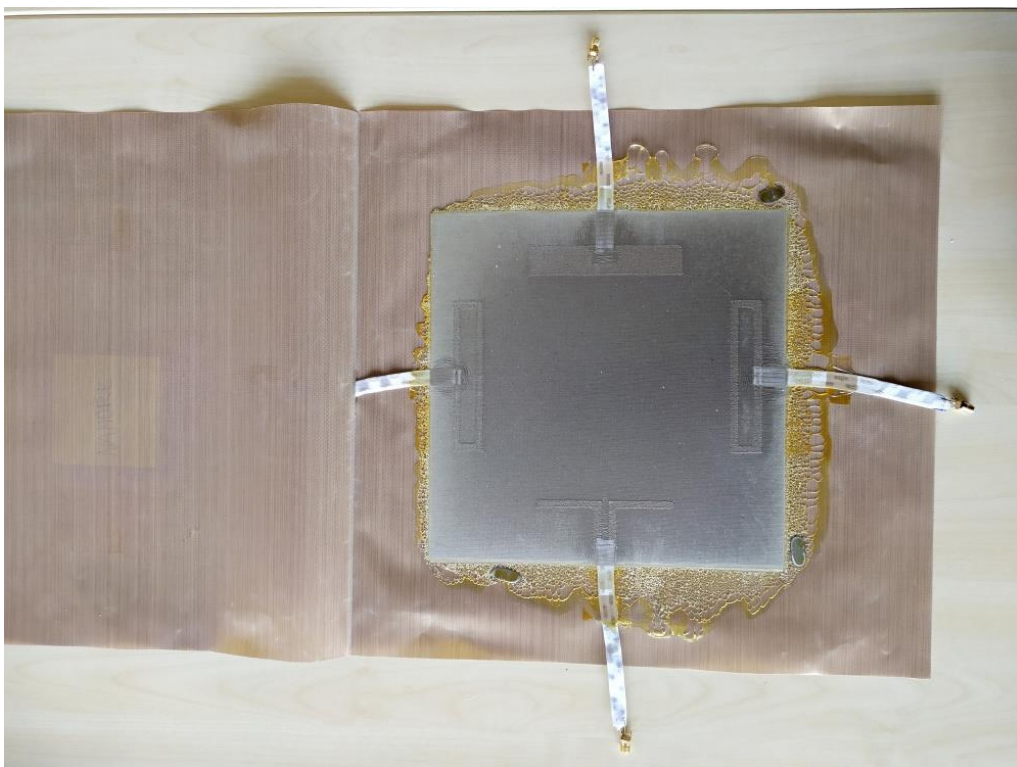
Obr. A2: Průběh vyšívání



Obr. A3: Zobrazení výšivky na displeji šicího stroje v průběhu vyšívání



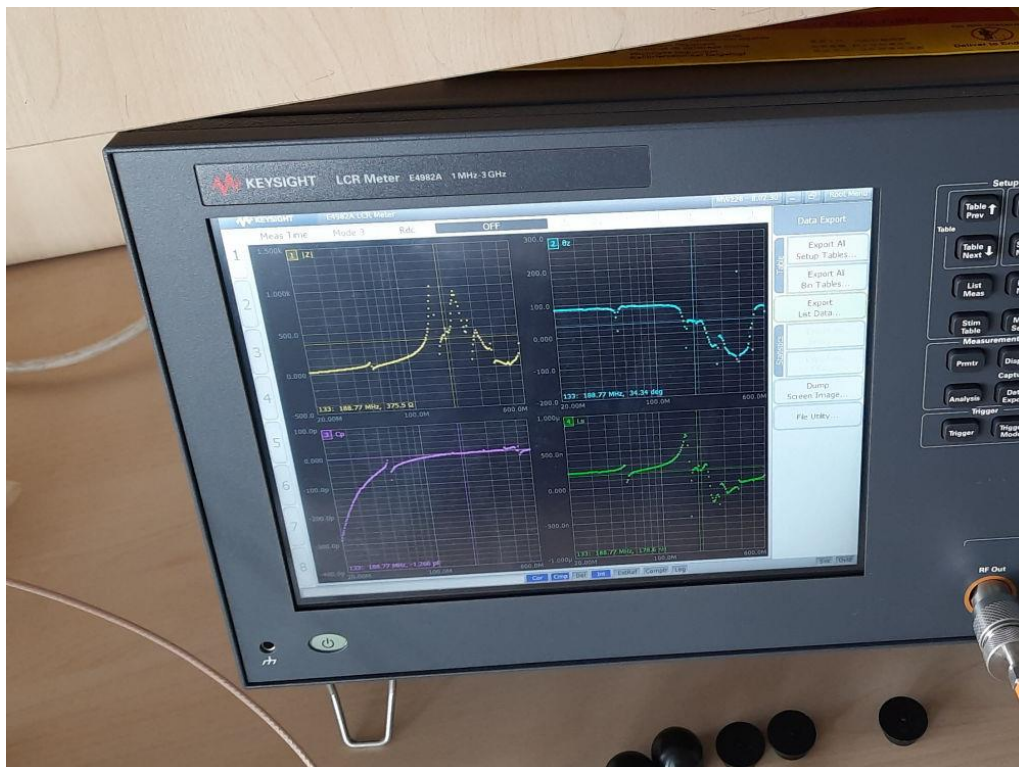
Obr. A4: Kontaktovací stanoviště



Obr. A5: Neočištěný vzorek vyndaný z lisu



Obr. A6: Měřicí stanoviště

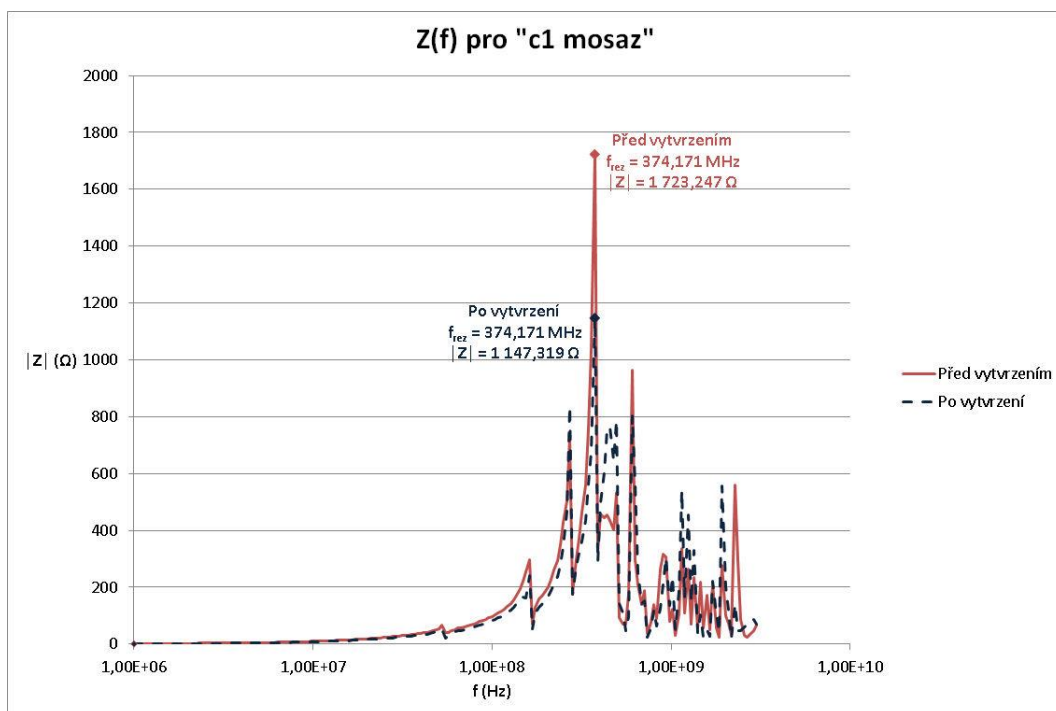


Obr. A7: Zobrazení měřených průběhů na obrazovce RLC metru

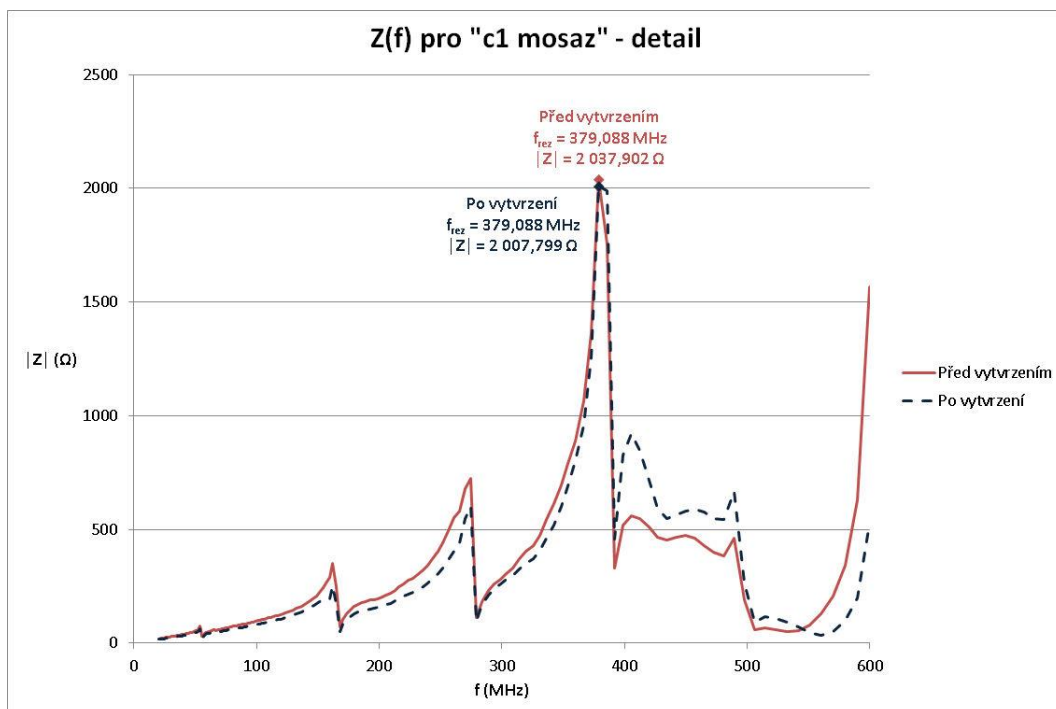


Obr. A8: Kalibrační sada měřicího přístroje Keysight E4982A

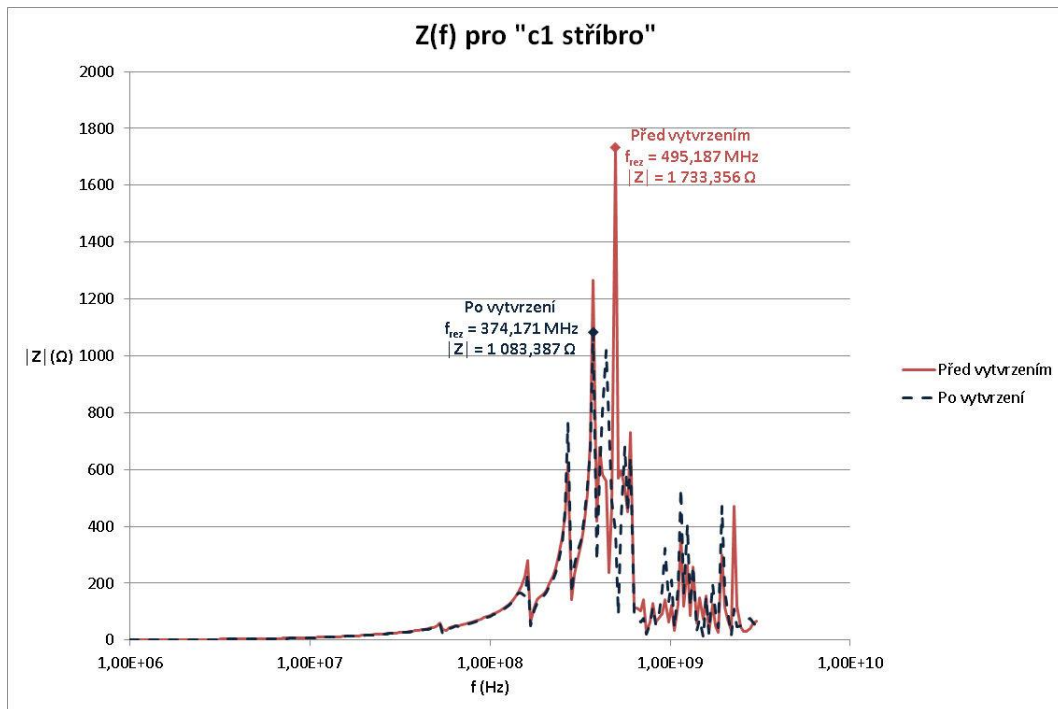
Příloha B – Grafy průběhů měřených parametrů jednotlivých antén



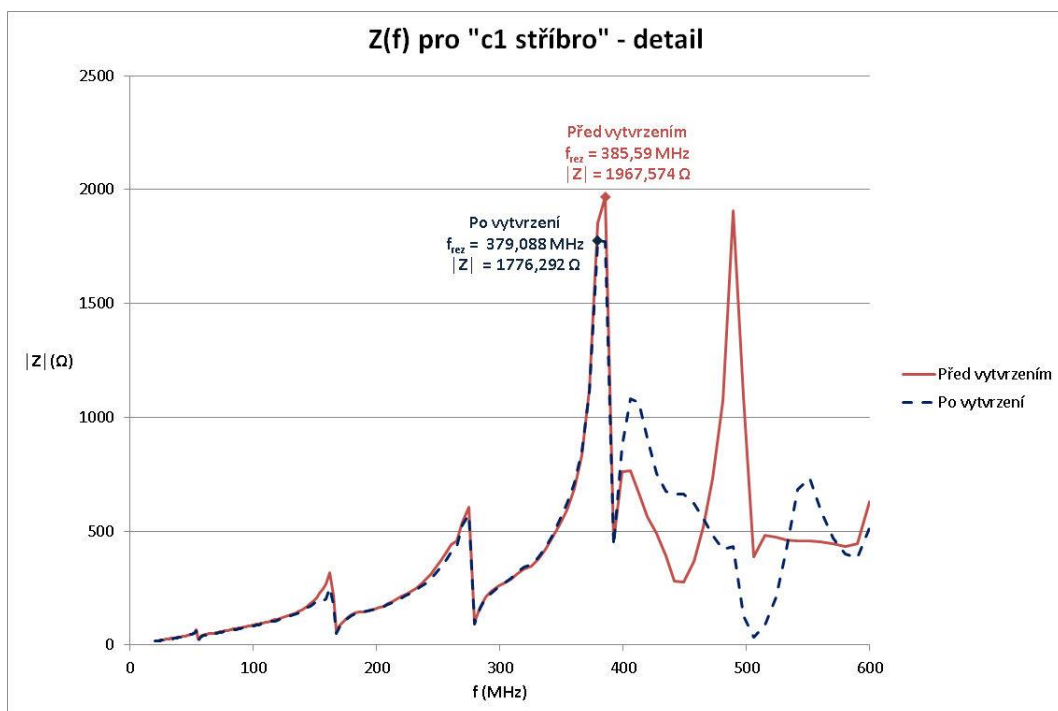
Obr. B1: Graf závislosti impedance na frekvenci pro anténu „c1 mosaz“ – měřeno v celém rozsahu přístroje



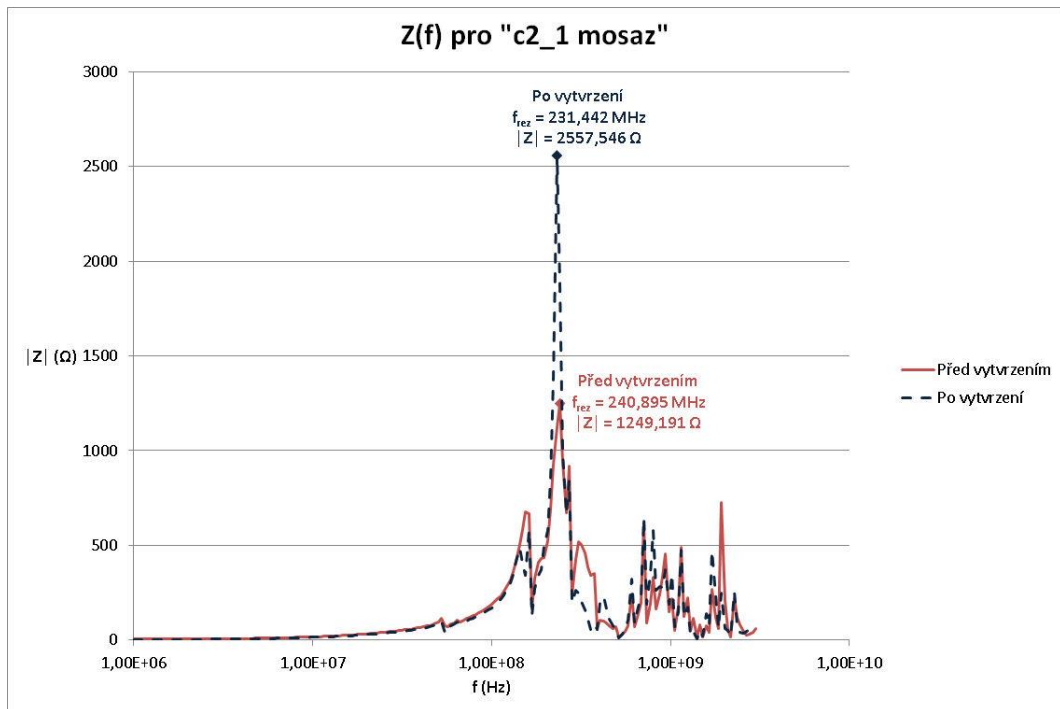
Obr. B2: Graf závislosti impedance na frekvenci pro anténu „c1 mosaz“ – detail okolí rezonanční frekvence



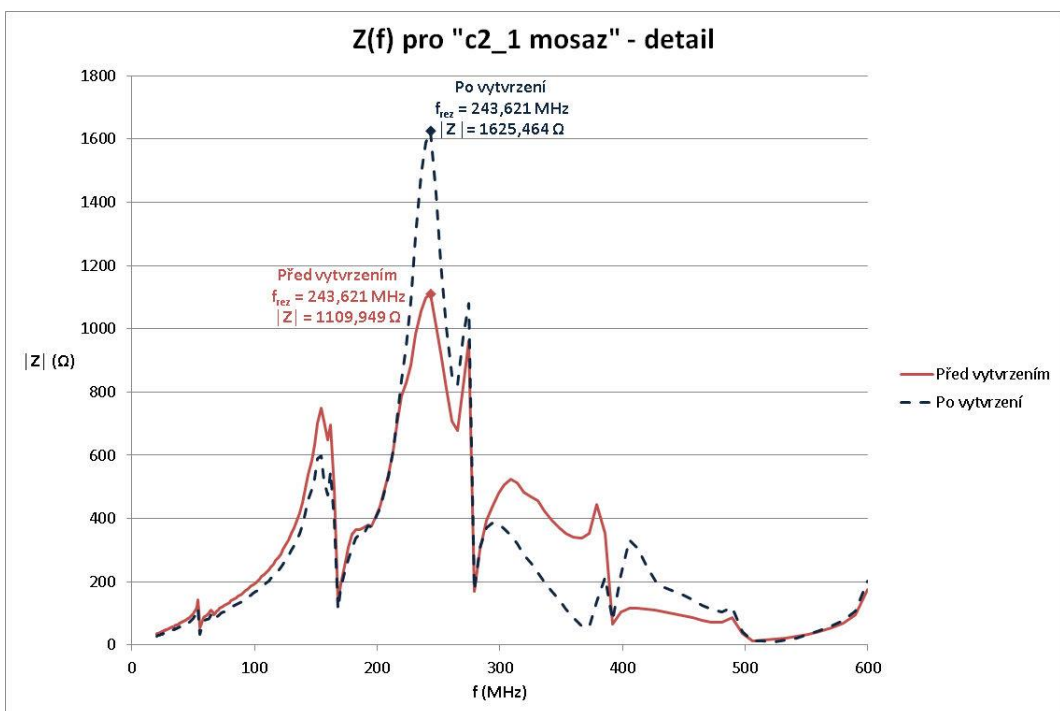
Obr. B3: Graf závislosti impedance na frekvenci pro anténu „c1 stříbro“ – měřeno v celém rozsahu přístroje



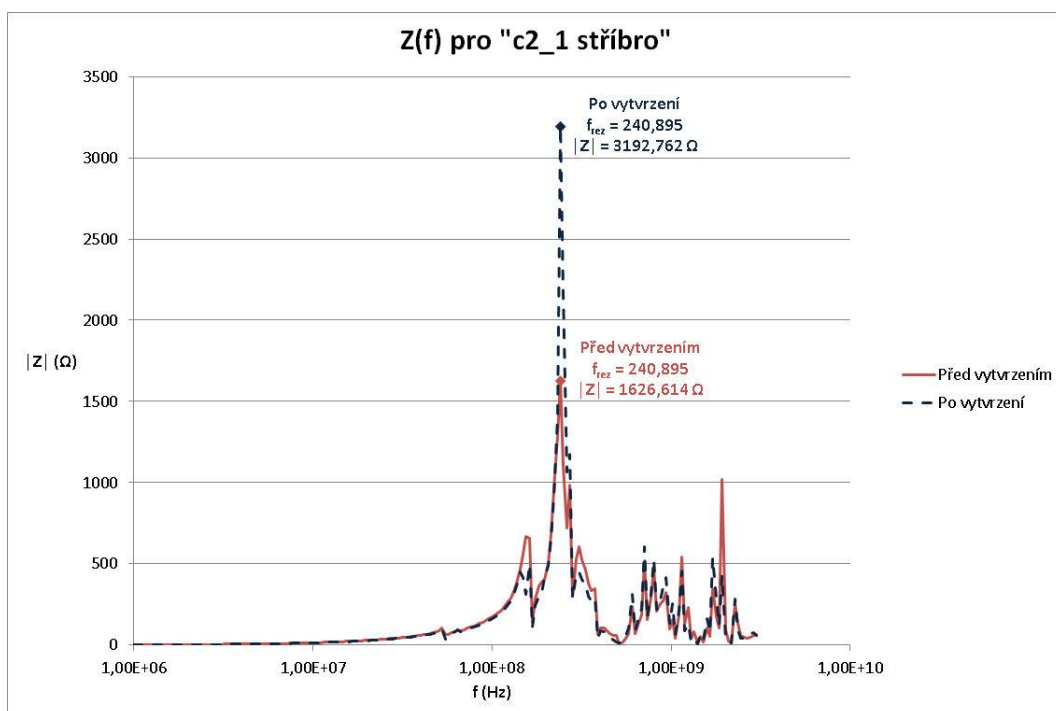
Obr. B4: Graf závislosti impedance na frekvenci pro anténu „c1 mosaz“ – detail okolí rezonanční frekvence



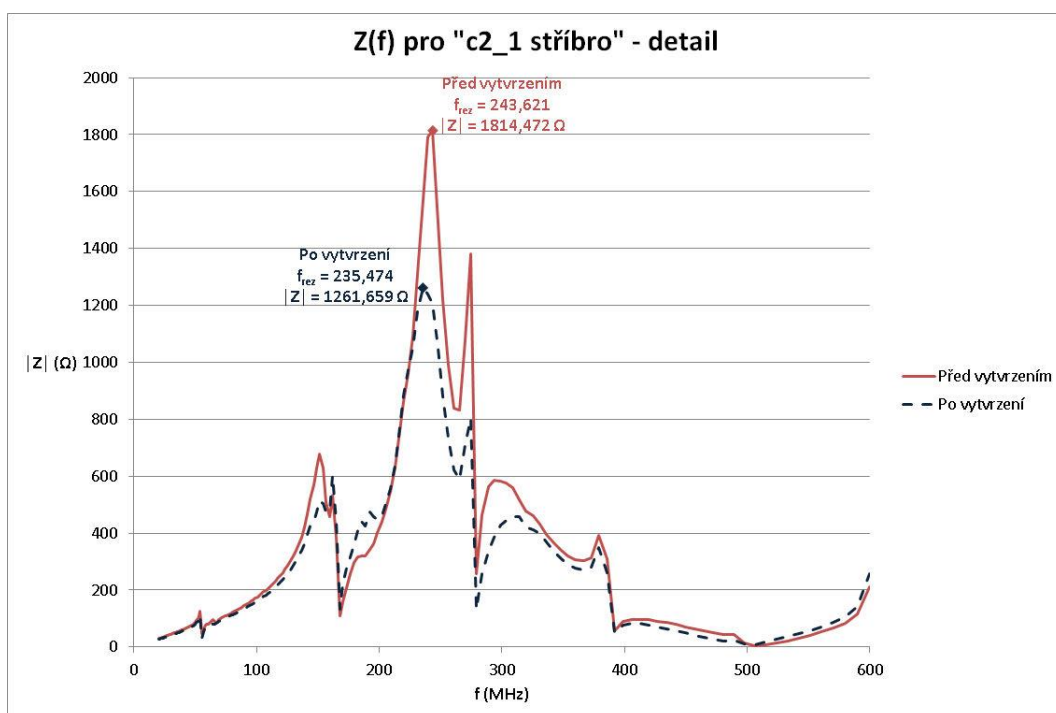
Obr. B5: Graf závislosti impedance na frekvenci pro anténu „c2_1 mosaz“ – měřeno v celém rozsahu přístroje



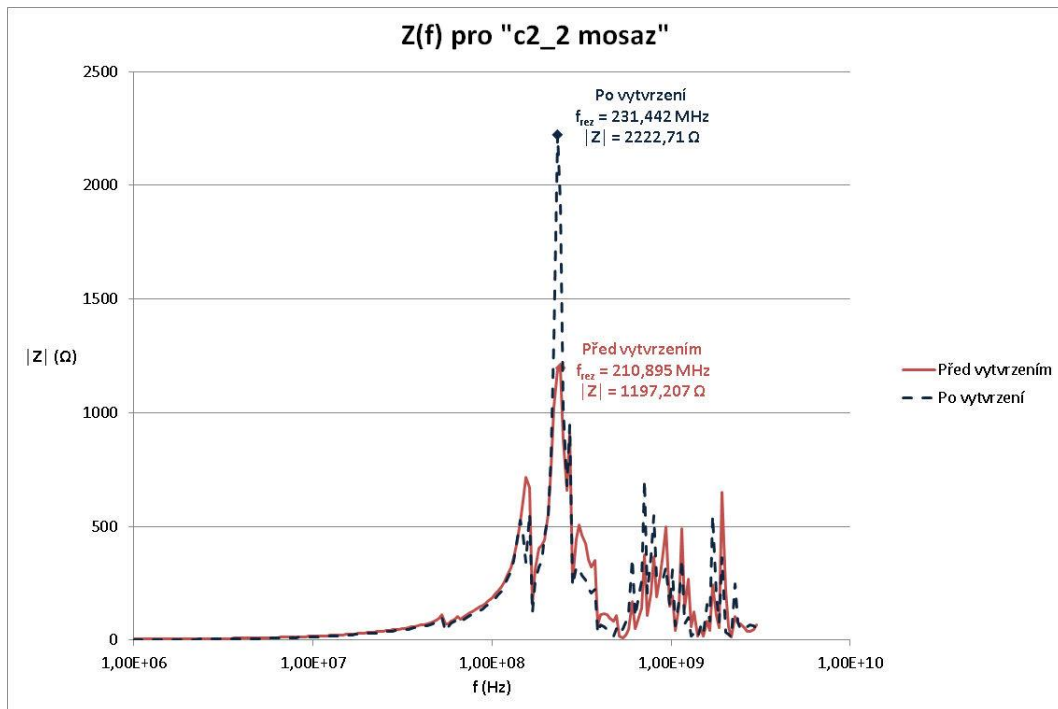
Obr. B6: Graf závislosti impedance na frekvenci pro anténu „c2_1 mosaz“ – detail okolí rezonanční frekvence



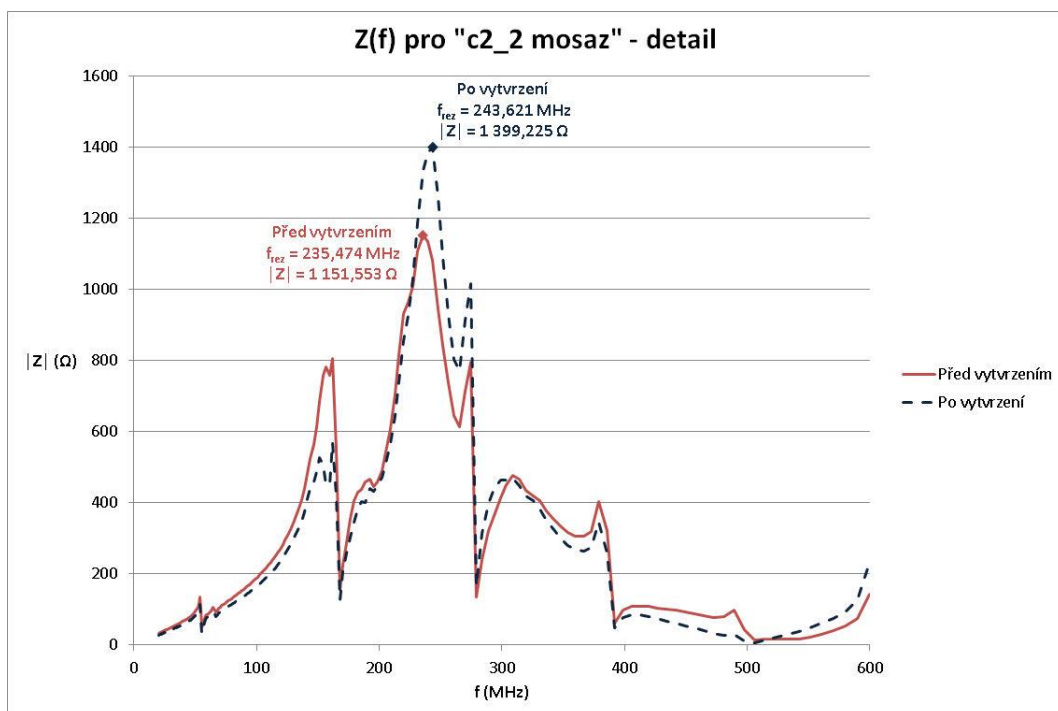
Obr. B7: Graf závislosti impedance na frekvenci pro anténu „c2_1 stříbro“ – měřeno v celém rozsahu přístroje



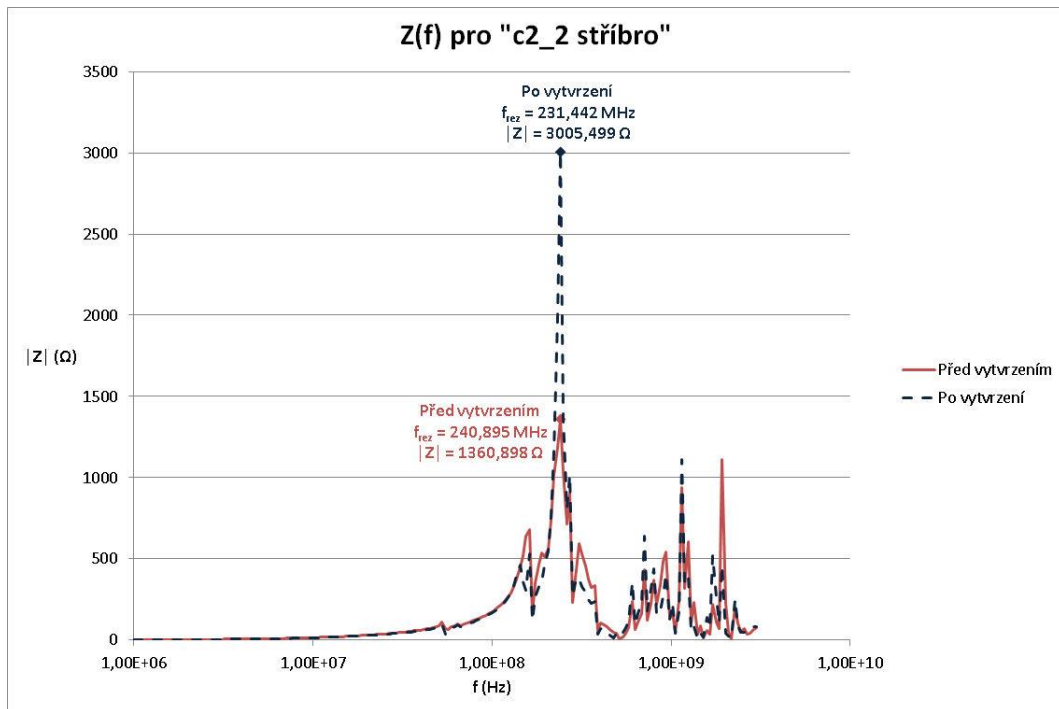
Obr. B8: Graf závislosti impedance na frekvenci pro anténu „c2_1 stříbro“ – detail okolí rezonanční frekvence



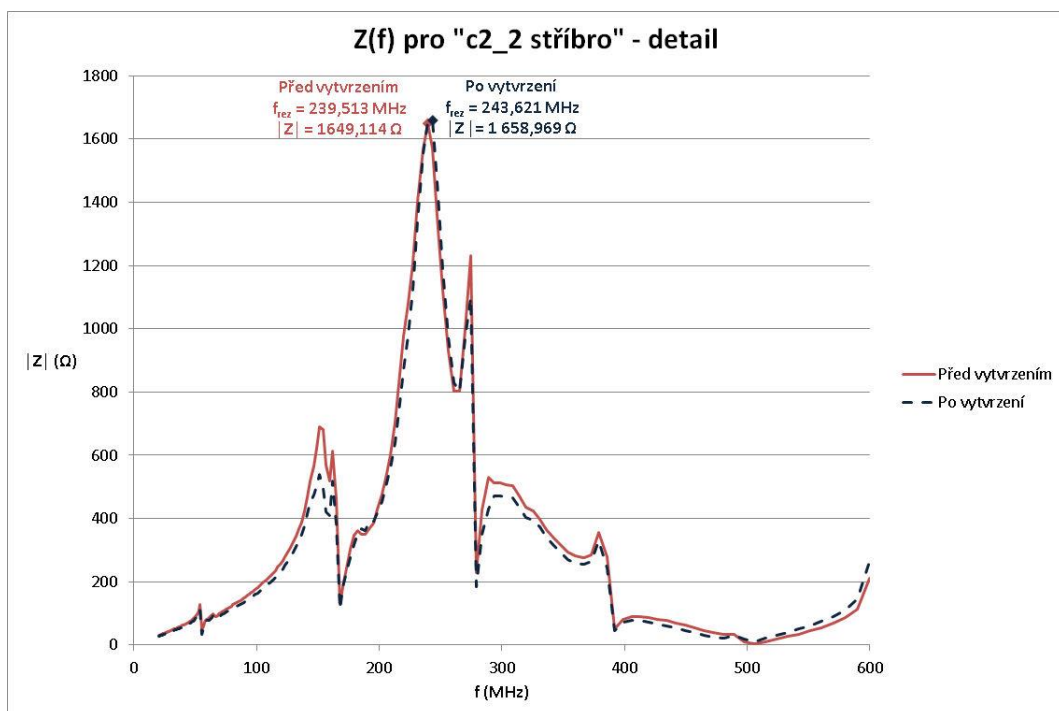
Obr. B9: Graf závislosti impedance na frekvenci pro anténu „c2_2 mosaz“ – měřeno v celém rozsahu přístroje



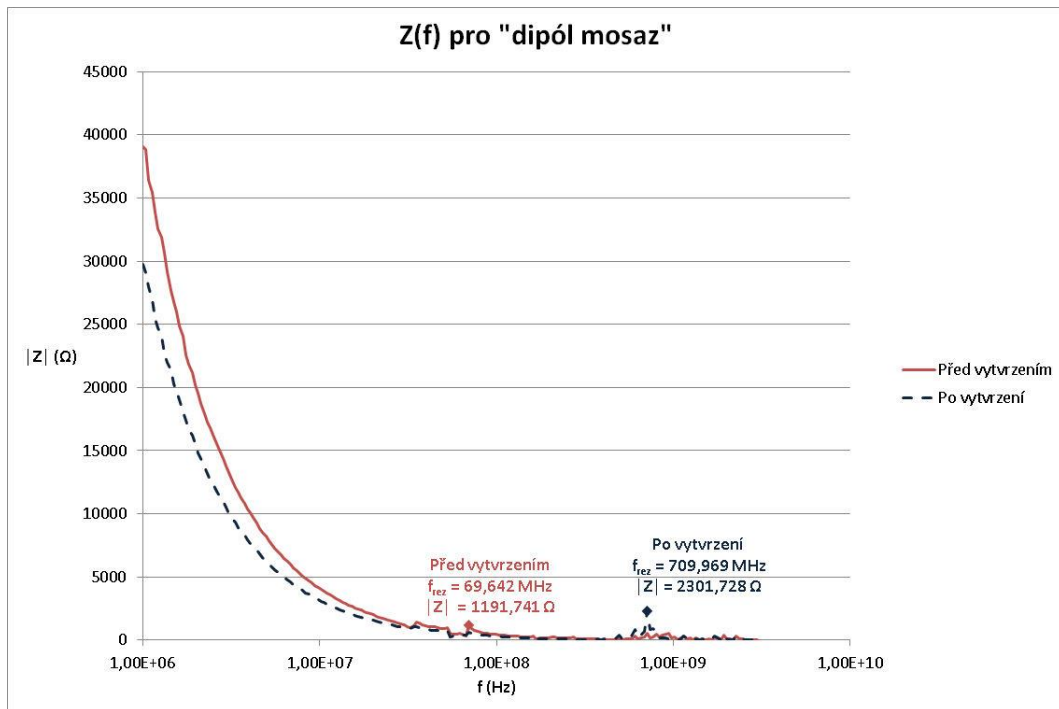
Obr. B10: Graf závislosti impedance na frekvenci pro anténu „c2_2 mosaz“ – detail okolí rezonanční frekvence



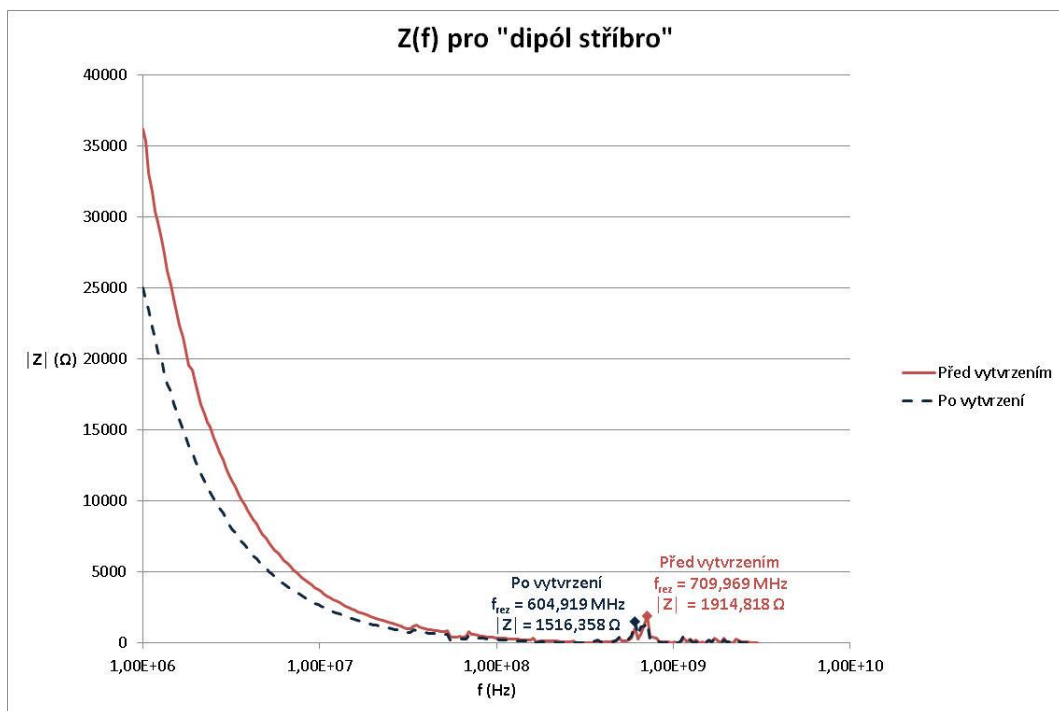
Obr. B11: Graf závislosti impedance na frekvenci pro anténu „c2_2 stříbro“ – měřeno v celém rozsahu přístroje



Obr. B12: Graf závislosti impedance na frekvenci pro anténu „c2_2 stříbro“ – detail okolí rezonanční frekvence



Obr. B13: Graf závislosti impedance na frekvenci pro anténu „dipól mosaz“



Obr. B14: Graf závislosti impedance na frekvenci pro anténu „dipól stříbro“