

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ



**Návrh sondy vířivých proudů a její aplikace pro zkoušení
kompozitních leteckých konstrukcí**

**Eddy current probe design and its application on aircraft
composite structures**

Obor: Fyzikální a materiálové inženýrství

Autor: Ing. Marie Boháčová

Školitel: Doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

Oponenti:

Datum obhajoby:

KLÍČOVÁ SLOVA:

Kompozitní materiál, CFRP, vířivé proudy, NDT, návrh snímače, poškození

KEYWORDS:

Composite structure, CFRP, eddy current, NDT, probe design, damage

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství

© Marie Boháčová, 2017

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 STAV SOUČASNÉ KONTROLY UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ POMOCÍ METODY VÍŘIVÝCH PROUDŮ.....	6
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	11
4 NÁVRH SNÍMAČE VÍŘIVÝCH PROUDŮ.....	12
4.1 Základní charakteristika elektrických vlastností uhlíkových kompozitů.....	12
4.2 Návrh vysokofrekvenční sondy vířivých proudů.....	13
5 PREZENTACE VÝSLEDKŮ.....	16
5.1 Výsledné charakteristické parametry sondy vířivých proudů.....	16
5.2 Použité kompozitní vzorky	16
5.3 Výsledky provedených experimentů.....	18
5.4 Stínící kryty a jejich vliv na výslednou odezvu vířivých proudů	22
6 ZÁVĚR.....	25
7 LITERATURA	27
8 PŘEHLED PUBLIKACÍ A ČINNOSTI.....	28
9 ABSTRACT	30

1 ÚVOD

Uhlíkové kompozity vzhledem ke svým specifickým vlastnostem naleznou své uplatnění v různých odvětvích, a to zejména v leteckém průmyslu. V oblasti letectví se nejvíce využívá uhlíkových kompozitů zejména pak tzv. CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic). Mají vynikající mechanické vlastnosti, jako jsou vysoká měrná pevnost a tuhost a představují obrovský potenciál v úspoře hmotnosti. Vzhledem k tomu, že kompozity CFRP mají laminátovou strukturu lze snadno dojít při vnějším zatížení k poškození, zejména pak k delaminaci, která značně snižuje pevnost konstrukce. V současné době se k detekci delaminace využívá zejména ultrazvukové a vizuální metody, které mají ovšem své limity. Kontrola se provádí ve stanovených inspekčních intervalech pro údržbu letounu a většinou je nutná demontáž jednotlivých částí letounu, což představuje obrovské časové náklady. Vzniká tak zájem o rychlou detekci delaminace za provozu letadla. Tuto detekci může zajistit metoda vířivých proudů.

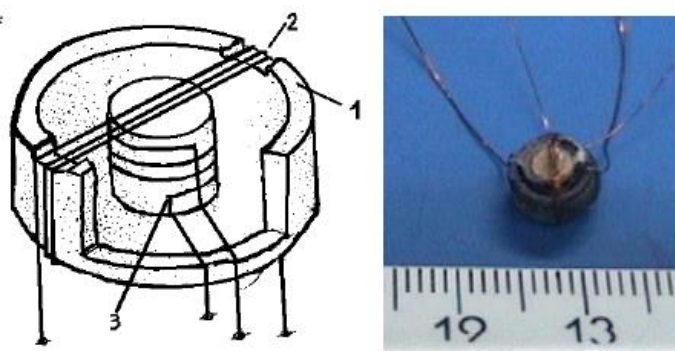
Tato disertační práce se zabývá návrhem snímače vířivých proudů, který umožní nedestruktivní kontrolu leteckých kompozitních konstrukcí, zejména plastů vyztužených uhlíkovými vlákny (CFRP), v oblastech výroby a údržby letadel. Návrh snímače vycházel z analyticko-experimentálního přístupu, přičemž jeho elektrické a mechanické parametry byly optimalizovány k zajištění dobrého poměru užitečného signálu k šumu na šesti kompozitních vzorcích. Tyto vzorky obsahují umělé nespojitosti v podobě různých typů vad, simulující různé druhy poškození leteckých konstrukcí, zejména delaminace či změn tloušťky kompozitních materiálů. Byla realizována experimentální měření, sběr dat a jejich následné vyhodnocení. Výsledkem této práce je funkční snímač vířivých proudů, schopný spolehlivě odhalit poškození uhlíkových kompozitních konstrukcí do hloubky materiálu 3,9 mm.

2 STAV SOUČASNÉ KONTROLY UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ POMOCÍ METODY VÍŘIVÝCH PROUDŮ

V dnešní době se přední letečtí výrobci snaží o přenesení kombinace provozních výhod kompozitních materiálů společně s kovovými materiály. Podílejí se na vývoji a výzkumu ultra lehkých slitin souběžně s kompozity. Stejně jako u kovových materiálů se u kompozitních konstrukcí vyskytují poškození vznikající při nárazovém či únavovém zatížení. Poškození, která se nacházejí uvnitř konstrukce, jsou obtížně sledovatelná, zejména vlivem tvaru, velikosti či přístupu ke konstrukci za provozu a vlivem omezení dané nedestruktivní metody kontroly. Tudíž velikost celého poškození může být podhodnocena. Vývoj pokročilých diagnostických systémů, které jsou schopny jednoduše detekovat a identifikovat degradaci materiálu v uhlíkových kompozitech, tak aby byla zaručena jakost kvality „bez defektu“ při výrobě a spolehlivá kontrola při údržbě letounu, je novou výzvou pro metodu vířivých proudů.

Uhlíkové kompozitní materiály ve srovnání s kovovými materiály vykazují řadu výhod. Použití metody vířivých proudů lze vysvětlit na příkladu využití vlákna Kevlar pro výrobu neprůstřelných bund. Vlákná Kevlar mají schopnost zastavit kulku vypálenou z malé ráže či velké vzdálenosti. Tento náraz s malou energií způsobí, že textura se otevře a vlivem pružnosti vláken tuto nízkou energii střely absorbuje. Ovšem při dopadu střely s vysokou energií, kulka pronikne do první vrstvy, ta se lokálně zahřeje a místní tepelné poškození způsobí změnu v ukládání uhlíku. Tohoto jevu lze pozitivně využít ve prospěch vířivých proudů, které jsou schopné lokální tepelné změny indikovat [1]. Pro zjištění takového poškození byla navržena sonda vířivých proudů těchto následujících parametrů:

- absolutní snímač pracující ve přijímovém/vysílacím režimu při optimální pracovní frekvenci 6 MHz,
- feritové hrníčkové jádro o relativní permeabilitě 12.



Obr. 2.1 Snímač vířivých proudů (1-feritové jádro, 2-přijímací cívka, 3- vysílací cívka) (vlevo), skutečná podoba (vpravo) [1]

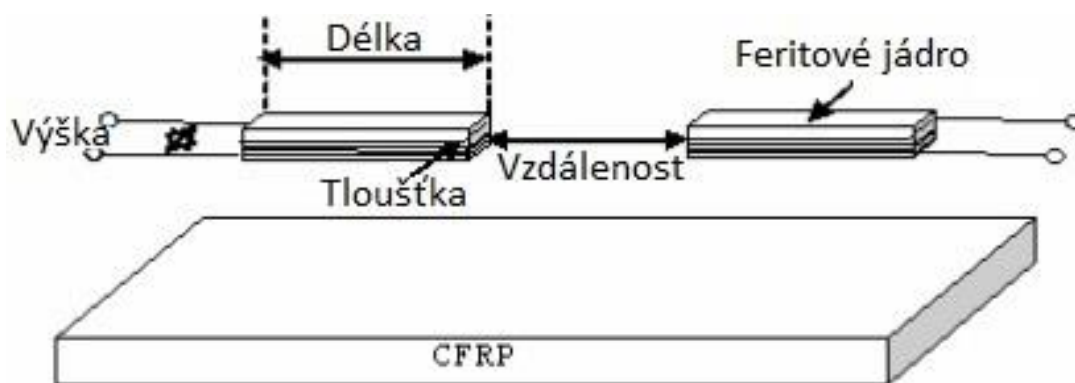
Mezi další uhlíkové kompozity patří již zmiňované polymery vyztužené uhlíkovými vlákny CFRP. U těchto kompozitních materiálů je pozorován vztah

mezi signály z různých typů snímačů a mikrostrukturou vzorků těchto uhlíkových kompozitů [2].

Návrh celého diagnostického systému je založen na základním vztahu vzájemné indukčnosti M , kde cívka představuje indukčnost L_1 a naindukované proudy v materiálu L_2 .

Důležitý parametry jako je elektrická vodivost uhlíkového kompozitního materiálu, resp. její ekvivalentní velikost, lze měřit experimentálně nebo analyticky na základě metody tzv. „Deeds and Dodd’s”, která poskytuje základy pro predikci a detekci lomu vláken a materiálové vady. Vodivost kompozitního materiálu je dána vodivostí jednotlivých vláken a podílem objemu vláken. Experimentálně bylo prokázáno, že odpor CFRP se zvyšuje, pokud dochází k výskytu interních poškození, jako jsou zlomená vlákna a delaminace [2]. K zjišťování ekvivalentní velikosti elektrické vodivosti lze použít kruhovou vzduchovou cívku s 15 závitů.

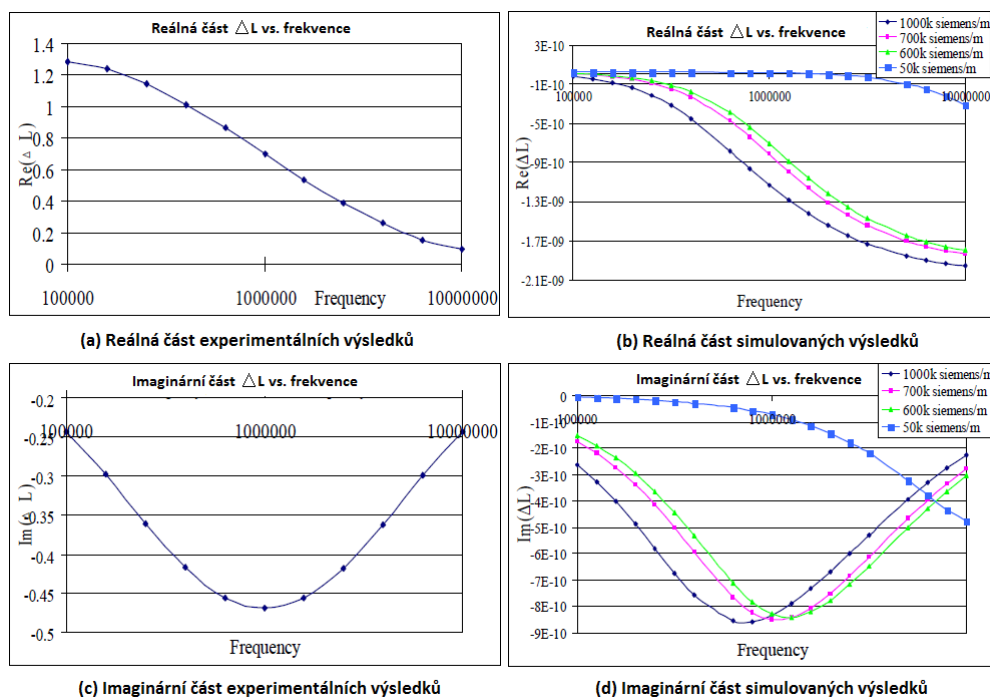
K detekci směru vláken, zejména u jednosměrných kompozitů, je využíváno anisotropie elektrické vodivosti vláken. K této detekci lze využít rotační sondu, která je složena ze dvou totožných obdélníkových cívek s 5 závitů navinutých na feritovém jádře zapojené jako vysílač/přijímač (viz Obr. 2.2). Rozsah frekvenčního spektra se pohybuje v rozmezí od 100 kHz do 10 MHz.



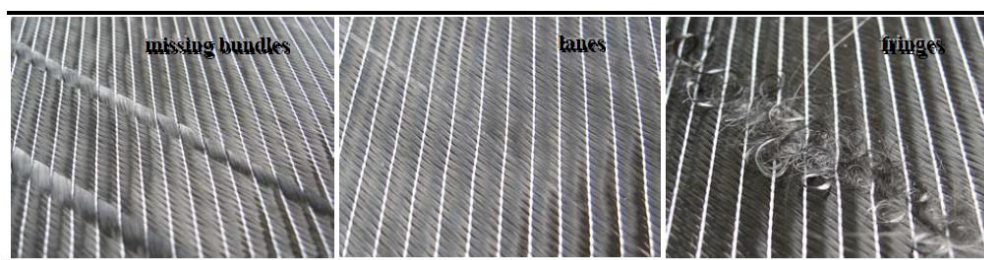
Obr. 2.2 Zobrazení rotační sondy k detekci směru vláken [2]

Celé analytické a experimentální měření lze nasimulovat s cílem prokázat propojení sond a vzorků a také podpořit experimentální metodu. Jak lze pozorovat z Obr. 2.3, oba experimentální a simulační výsledky ukazují dobrou shodu s analytickým řešením „Deeds and Dodd’s”. A navíc, lze jasně pozorovat vliv změny vodivosti vláken na metodu vířivých proudů, která je citlivá na strukturální modifikace jako jsou zlomené vlákno či inter-laminární delaminace.

Skryté vady, které mohou vzniknout během výroby, mohou mít dalekosáhlé důsledky s vysokým rizikem poškození produktu či konstrukce nebo představovat zvýšení nákladů související s likvidací produktu po obrábění. Mezi typické vady patří chybějící svazky, pruhy způsobené překrytím nebo třepením (viz Obr. 2.4).



Obr. 2.3 Výsledky měření vodivosti [2]



Obr. 2.4 Typické nespojitosti v RFC a CFRP kompozitních materiálech [12]

Dle [3] lze k sestavení snímače využít různých typů senzorů, jako jsou absolutní, diferenciální a kompenzační. Jako optimální se jeví absolutní na půl vysílací anizotropní typ s 20 závity tak, jak je zobrazeno na Obr. 2.5. Aby se mohla zvýšit rychlost skenování, byla vytvořena sonda na bázi pole vířivých proudů s 16 páry jednotlivých senzorů (viz Obr. 2.5).

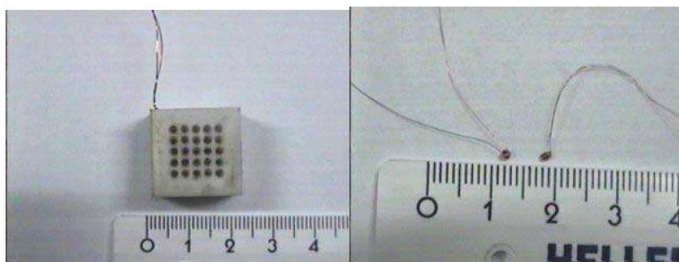


Obr. 2.5 Ukázka anizotropního senzoru (vlevo), 16 párového senzoru (vpravo) [12]

Dle [2] lze senzor na bázi pole vířivých proudů realizovat pomocí vysílací cívky o 100 závitů. Přijímač obsahuje dvě pole o velikosti 5x5 s identickými cívkami,

jejichž vnější průměr je 2 mm a vzdálenost mezi středy cívek je 2,4 mm. Tento snímač lze aplikovat na zkoušení desek z uhlíkových kompozitů impaktovaných nízkou energií. Pro experiment lze použít kompozitní desky obsahující dva typy umělých vad:

1. delaminaci vytvořenou tenkovrstvou teflonovou páskou o rozměrech 2x2x0,1 mm vloženou mezi vrstvy uhlíkových vláken při výrobě desek; a
2. zlomené vlákno, které je nasimulováno příčným uložením uhlíkových vláken. Toto zlomení se může objevit zejména v důsledku působení vysokoenergetického rázu.

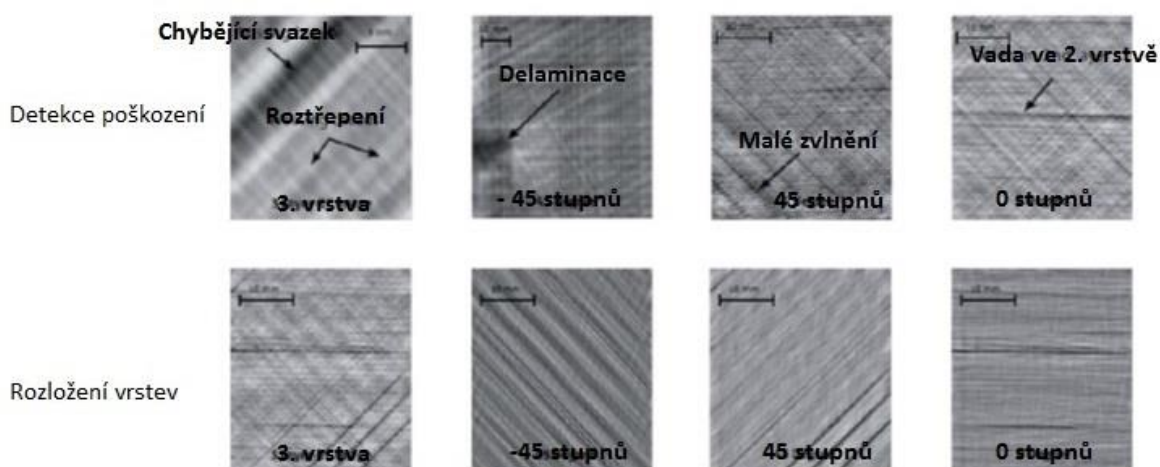


Obr. 2.6 Senzor pole vířivých proudů 5x5 (vpravo), přijímací cívky (vpravo) [2]

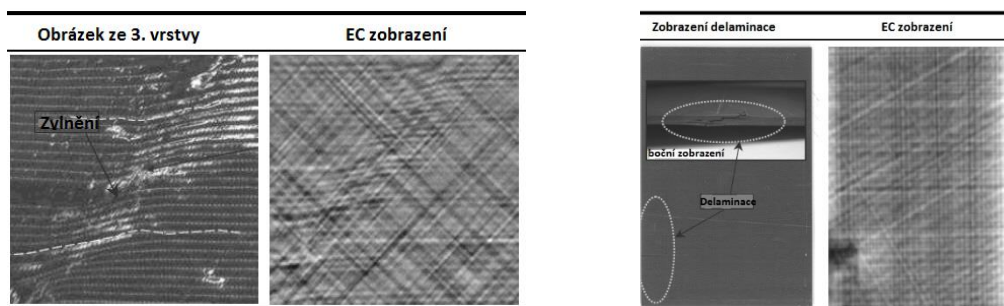
Pro kontrolu RCF a CFRP vzorků se jeví optimální rozsah pracovní frekvence od 2 MHz do 10 MHz. Necelistvosti a charakteristiky, které lze odhalit jsou [3]:

- delaminace,
- zlomení vlákna,
- chybějící svazek,
- třepení,
- orientace vláken,
- impakty,
- různá zvlnění.

Ukázky zobrazení jednotlivých poškození u vzorků RCF jsou zobrazeny na Obr. 2.7 a u vzorků CFRP na Obr. 2.8.



Obr. 2.7 Ukázka zobrazení jednotlivých poškození pomocí zobrazení C-sken [3]



Obr. 2.8 Ukázka zvlnění ve 3. vrstvě (vlevo), delaminace (vpravo) [3]

Výše popsané navržené snímače pro zkoušení uhlíkových kompozitů prokazují způsobilost metody pole vířivých proudů (ECA). Využití těchto sensorových polí společně s rozlišovací procedurou, jako je zpracování signálu, vede ke zlepšení odstupu signálu od šumu.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem této práce je navrhnout a sestavit snímač vířivých proudů, který bude schopen odhalit necelistvosti (zejména delaminaci, zlomení vlákna, trhlinu) ve vodivých kompozitních materiálech, případně zjistit další vlastnosti materiálu, jako je např. orientace vláken v matrici. Mělo by se jednat o rychlou, spolehlivou a nákladově efektivní techniku zkoušení aplikovatelnou v různých provozních i výrobních podmínkách.

Hlavní cíl práce:

- Navrhnout a sestavit snímač vířivých proudů pro kontrolu vodivých kompozitních materiálů (zejména CFRP).
- Snímač navrhnout v klasické koncepci zkoušení s budicí a snímací cívkou tak, aby byla zajištěna přesnost, rozlišitelnost a opakovatelnost zkoušení.

Dílčí cíle práce:

- Optimalizovat elektrické i mechanické parametry navržené cívky.
- Ověřit a stanovit vliv stínících prvků na vlastnosti cívky.
- Zpracovat a vyhodnotit experimentální měření v závislosti na veličinách vstupujících do základních charakteristik systému.
- Zhodnotit na základě experimentů vhodnost využití pole vířivých proudů ECA (zkoušení s elektronicky řízenými cívkami umístěných vedle sebe).

4 NÁVRH SNÍMAČE VÍŘIVÝCH PROUDŮ

4.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ

Při aplikaci metody vířivých proudů na uhlíkové kompozitní materiály musí být zajištěny tyto aspekty:

- Elektrická vodivost výztuhy.
- Potlačení šumu.

Prvním nejdůležitějším aspektem, který je nutný, aby bylo možné použít metodu vířivých proudů, je elektrická vodivost výztuhy kompozitního materiálu. Bez této skutečnosti nelze metodu vířivých proudů použít, jelikož nedojde ve zkoušeném materiálu k naindukování vířivých proudů. Elektrické vlastnosti uhlíkových kompozitních materiálů závisí na typu uhlíkových vláken a jejich objemového podílu v materiálu. Elektrická vodivost v příčném směru se pohybuje mezi 10 až 100 S/m a v podélném směru mezi 5×10^3 až 5×10^4 S/m [4]. Elektrická vodivost kompozitu je tedy dána vodivostí jednotlivých vláken, pořadím skládání vrstev a objemovým podílem vláken v materiálu [5].

Do systému základních charakteristik pro návrh snímače vířivých proudů patří veličiny závislé a nezávislé proměnné. Nezávislé proměnné veličiny, lze kategorizovat z hlediska:

a) Charakteristiky kompozitu:

- Výztuha kompozitu – jaký objemový podíl bude představovat vodivá složka výztuhy. Tento parametr úzce souvisí s vodivostí materiálu, a tudíž s naindukováním vířivých proudů ve zkoušeném materiálu.
- Matrice kompozitu – účelem matrice je spojit výztuhu a chránit ji před vlivy okolí. Důležitými parametry pro zkoušení jsou tloušťka a druh použitého materiálu. Předpokladem je, že matrice bude nevodivá.
- Uspořádání (orientace) vláken – vliv na diagnostiku z hlediska šumu a rozlišovací schopnosti snímače.
- Počet vrstev – vliv na hloubku vniku vířivých proudů. Tento parametr úzce souvisí s použitou frekvencí.

b) Charakteristiky snímače vířivých proudů:

- Počet závitů – vliv na velikost vlastní indukčnosti cívky.
- Cívka s jádrem/bez jádra – vliv na velikost vlastní indukčnosti cívky.
- Činitel zaplnění – tento parametr má vliv na citlivost snímače. Určuje míru magnetické vazby mezi snímačem a zkoušeným předmětem. Má vliv na velikost a rozložení magnetického pole.
- Typ snímače – závisí na tvaru zkoušeného předmětu, přístupu ke zkoušenému předmětu, účelu zkoušení a požadavcích na citlivost, rozlišovací schopnosti.
- Typ módu zapojení cívek – volba mezi zapojením absolutním, diferenčním a typu přijímač-vysílač.

- Provedení snímače – jedná se o volbu mezi koncepcí s budící a snímací cívkou nebo provedení snímače pomocí pole vířivých proudů ECA. Dále, zda snímač bude stíněný nebo nestíněný, aby došlo ke koncentraci pole ve zkoušeném materiálu, a tak se zvýšila citlivost.

Závisle proměnné veličiny lze kategorizovat následovně:

- Elektrická vodivost – závisí na materiálu výztuže a matrice. Změnu vodivosti způsobují nespojitosti přítomné ve zkoušeném materiálu nebo změna struktury materiálu.
- Impedance cívky – je funkcí frekvence a indukčnosti, která souvisí s geometrickými parametry cívky. Změnu impedance způsobují magnetická permeabilita a deformace toku vířivých proudů.
- Oddálení cívky (lift-off) – souvisí se zapojením cívek a činitelem zaplnění.
- Pracovní frekvence – závisí na vodivosti (materiál výztuhy a matrice), hloubce vniku vířivých proudů (tloušťka zkoušeného předmětu, počet vrstev), počtu závitů, cívice s jádrem/bez jádra.

4.2 NÁVRH VYSOKOFREKVENČNÍ SONDY VÍŘIVÝCH PROUDŮ

Pro návrh snímače byl zvolen přímý způsob řešení, ve kterém je návrh snímače vířivých proudů řešen pomocí analyticko-experimentální metody. U experimentální metody je důležitá přítomnost etalonu s umělými vadami, vyrobeného ze zkoušeného materiálu. V tomto experimentálním přístupu je optimalizace elektrických a mechanických parametrů cívky (rozměr cívky či rozsah pracovní kmitočtu) obvykle optimalizován porovnáním detekce citlivosti na uměle nebo přirozeně vytvořených necelistvostí. Tento snímač je pak obvykle laděn přímo na konkrétních vzorcích se známými a neznámými defekty, přičemž výsledky jsou vyhodnoceny a použity pro další úpravu celkové konfigurace snímače vířivých proudů.

Než došlo k samotnému návrhu snímače vířivých proudů pro uhlíkové kompozitní materiály, muselo se v první fázi rozhodnout, jaké frekvenční pásmo se zvolí. Po úplně jednoduchém testu se standardními, na trhu dostupnými nízkofrekvenčními a vysokofrekvenčními sondami (do cca 5 MHz) se standardními konfiguracemi provedení a zapojení cívek bylo zjištěno, že tyto sondy nevyhovují a nejsou schopny zjistit nespojitosti v uhlíkových kompozitních materiálech. Tudíž na základě tohoto poznatku a provedených rešerší na toto téma se došlo k závěru, že se musí jednat o vysokofrekvenční cívku s určitou konfigurací, která bude pracovat ve vyšším rozsahu, než je 5 MHz.

Jednovrstvé cívky představují nejjednodušší formu indukčnosti a používají se právě pro vyšší frekvence. Každá cívka má svojí vlastní indukčnost, jejíž hodnotu lze měnit průměrem cívky, počtem závitů, typem a průměrem drátu vhodného pro vinutí a typem jádra. Nejčastěji se vysokofrekvenční cívky vinou na tělíska s železovým nebo feritovým jádrem závit vedle závitu. Cívky s železovým jádrem

nebo feritovým jádrem mají oproti vzduchovým cívkám tu výhodu, že vlivem silnějšího magnetického pole lze dosáhnout zvětšení vlastní indukčnosti při menších rozměrech cívky s menším počtem závitů. Pro návrh vysokofrekvenční cívky se využije silného magnetického pole feritů. Ferity umožňují tedy značné změny v indukčnosti a zamezují saturaci zkoušeného materiálu. Vzhledem k tomu, že je zapotřebí z hlediska návrhu dosáhnout, co největší vlastní indukčnosti ve velmi širokém rozsahu, byla zvolena cívka navinuta na vhodně zvoleném feritovém jádře, jehož elektrické parametry odpovídají jádrům používaných pro odrušení elektronických systémů [6, 7].

Ovšem, abychom dosáhli, co největší indukčnosti, je potřeba zamezit ztrátám. U cívky se projevuje ztrátový odpor cívky R a vlastní kapacita C_0 . Ztrátový odpor je způsobený odporem vodiče vinutí. Tento odpor je vždy větší než činný odpor vodiče. Nicméně ztráty vznikají navíc vlivem skinefektu, tzv. povrchového jevu. Tento jev lze eliminovat použitím vysokofrekvenčních kablíků. Rozdíl potenciálů, nacházející se mezi různými částmi cívky, vytváří kolem cívky elektrické pole. Rozložená vlastní kapacita mezi vinutím se chová podobně, jako by k cívce byla připojena malá kapacita. Vlastní kapacita je příčinou vzniku rezonancí, které mění činný odpor i reaktanci cívky. Aby došlo k omezení vzrůstu vlastní kapacity C_0 na minimum je vhodné vinout cívky tzv. divoce. Navíc při zvolení feritového jádra lze zmenšit počet závitů, což se projeví i velmi malou vlastní kapacitou C_0 . Pokud se veškeré ztráty omezí na minimum, lze vytvořit velmi jakostní cívku s dobrým činitelem jakosti Q [6, 7].

Při zkoušení materiálu vířivými proudy hraje také významnou roli činitel zaplnění. Tento činitel zaplnění určuje vzdálenost cívky od zkoušeného materiálu. Optimálně se volí hodnota činitele zaplnění 0,2, tj. tělo snímače je z 80 % zaplněno cívkou.

Existuje celá řada konfigurací cívek. Navržené cívky uspořádány a zapojeny do režimu přijímač-vysílač. Tento režim má výhodu v dosažení vyšší citlivosti systému a není závislý na elektronice přístroje. Mechanickým uspořádáním cívek je dosaženo diferenčního průběhu signálu.

Počet závitů je navržen tak, aby bylo dosaženo co nejvyšší hodnoty pracovní frekvence. V případě zkoušení uhlíkových kompozitních materiálů lze říci, že se jedná o vysokofrekvenční úzkopásmový snímač, jehož pracovní frekvence se pohybuje v rozmezích od 8 MHz až 12 MHz.

Magnetické pole cívek, zvláště pak vysokofrekvenčních zasahuje daleko do prostoru kolem cívky, má tedy velký rozptyl. V některých případech je nutné tento velký rozptyl potlačit zachycením silových čar z cívky, aby nedocházelo k ovlivnění výsledného magnetického pole dalšími kovovými prvky v letecké kompozitní konstrukci, například nýty. K takovému zachycení silových čar je možné využít různých magnetických i nemagnetických materiálů. Tyto stínící kryty (viz Obr. 4.1) velmi dobře omezí magnetické pole cívek na prostor uvnitř krytu.



Obr. 4.1 Stínící kroužky v pořadí hliník, mosaz, austenitická ocel, slitina železa, ferit



Obr. 4.2 Sondy vířivých proudů pro kontrolu kompozitních uhlíkových materiálů

5 PREZENTACE VÝSLEDKŮ

5.1 VÝSLEDNÉ CHARAKTERISTICKÉ PARAMETRY SONDY VÍŘIVÝCH PROUDŮ

Výsledné vlastnosti navržených sond vířivých proudů pro zkoušení kompozitních materiálů jsou shrnuty do následující Tab. 5.1. Jsou navrženy tři sondy optimalizované na různé pracovní frekvence. Tyto sondy jsou označeny jako:

- COMPROBE 9 MHZ
- COMPROBE 10 MHZ
- COMPROBE 11 MHZ

Veličina	Komentář
Typ a rozměry sondy	Tužková sonda o průměru těla 10 mm a senzoru 6 mm
Rozsah pracovní frekvence	≥ 5 MHz
Cívka s jádrem	Feritové jádro – zvětšení vlastní indukčnosti při menších rozměrech cívky s menším počtem závitů, využití silného magnetického pole feritů, menší ztráty
Styl vinutí	Na divoko – omezení vzrůstu vlastní kapacity C_0 na minimum, cívka s dobrým činitelem jakosti Q
Činitel zaplnění	$k = 0,2$ – nižší mechanické opotřebení cívky a hodnota šumu
Režim zapojení cívky	Vysílač-přijímač – vyšší citlivost systému a nezávislost na elektronice přístroje
Stínění cívek	V podobě nasazovacích kovových kroužků (hliník, mosaz, austenitická ocel, slitina železa, ferit) – lepší fokusace a rozlišitelnost

Tab. 5.1 Výsledné charakteristické vlastnosti navržených sond

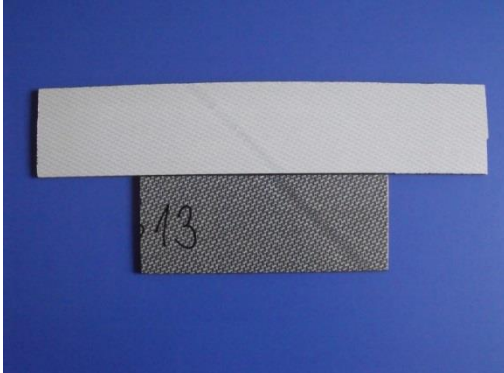
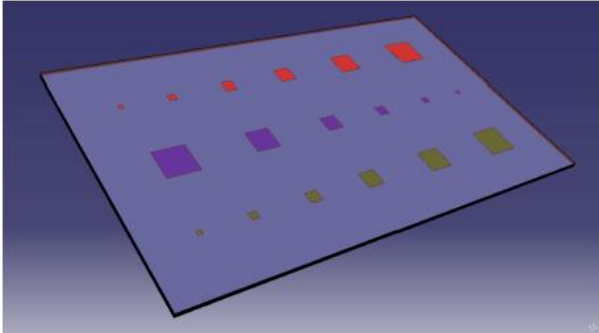
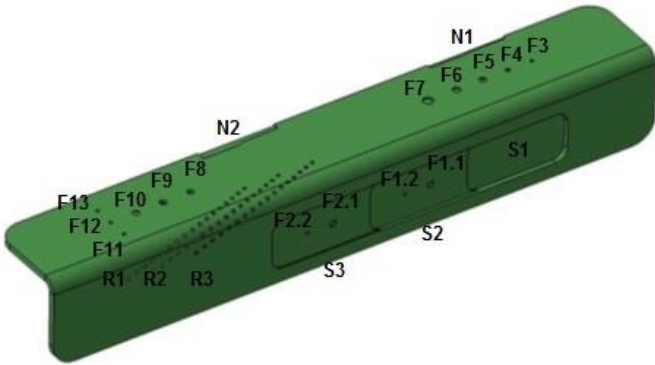
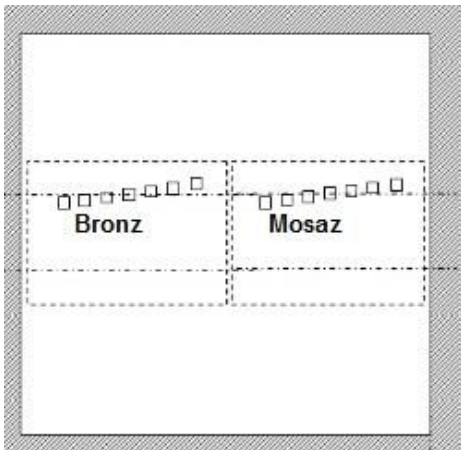
5.2 POUŽITÉ KOMPOZITNÍ VZORKY

K vývoji snímače byly použity tyto konkrétní vzorky uhlíkových kompozitních materiálů:

- Vzorek 1 – uhlíkové tkaniny v epoxidové pryskyřici INDETEC ndt
- Vzorek 2 – INDETEC ndt
- Vzorek 3 – Kalibrační měrka prepreg uhlíkový jednosměrný 8552/33%/134/IM7(12K) VZLÚ
- Vzorek 4 – Schodovitá kalibrační měrka prepreg uhlíkový jednosměrný 8552/33%/134/IM7(12K) VZLÚ

- Vzorek 5 – Kalibrační měrka ABS 5045 laminát Latecoare
- Vzorek 6 – BMS 8-353 laminát Latecoare

Obrazový přehled je zobrazen v následující Tab. 5.2:

Vzorek 1 	Vzorek 2 
Vzorek 3 	Vzorek 4 
Vzorek 5 	Vzorek 6 

Tab. 5.2 Obrazový přehled jednotlivých použitých vzorků

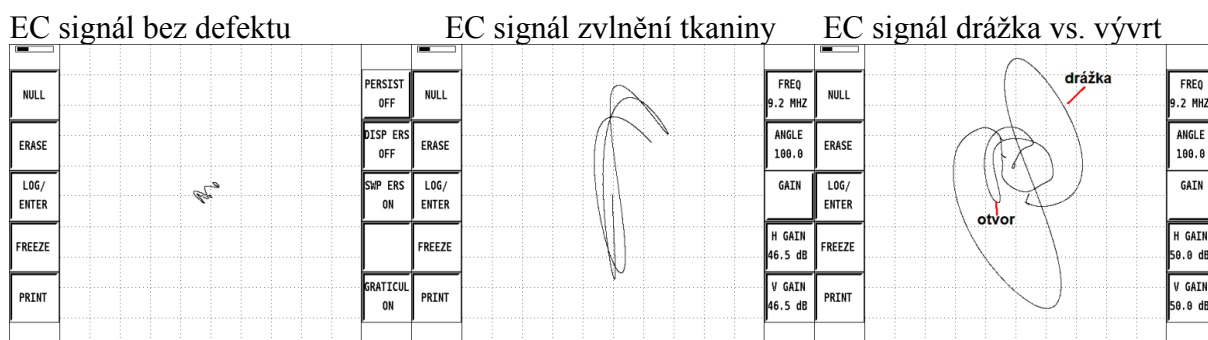
5.3 VÝSLEDKY PROVEDENÝCH EXPERIMENTŮ

Naměřené odezvy vířivých proudů (EC signály) na defekty jednotlivých vzorků jsou zobrazeny na následujících obrázcích.

Parametry nastavení

Rozsah pracovní frekvence: 5 MHz – 12 MHz
 Rozsah zesílení (horizontální/vertikální): 38 dB – 65 dB
 Buzení: Medium, High
 Použitý přístroj: Olympus Nortec 500D (primární)
 Olympus Nortec 600D (doplňkový)

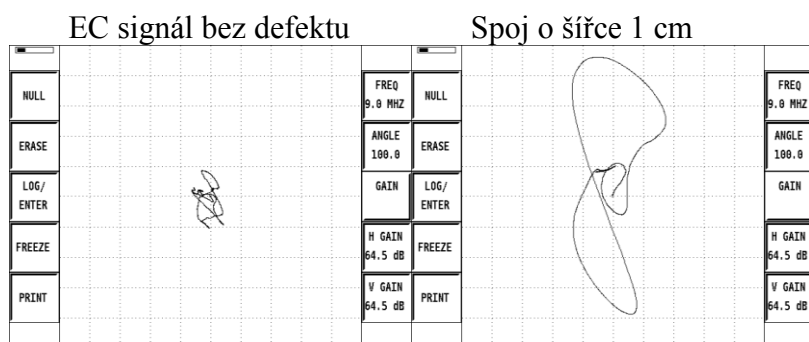
Vzorek 1 – uhlíková tkanina v epoxidové pryskyřici



Obr. 5.1 Ukázka jednotlivých odezví vířivých proudů na poškození u vzorku 1

Při použití všech tří navržených sond byly detekovány poškození, jako jsou zvlnění tkaniny, umělá drážka velikosti 10x1,2x0,5 mm (d x š x h) a vývrt Ø1,5 mm (viz Obr. 5.1).

Vzorek 2 – CFRP kompozity Airbus

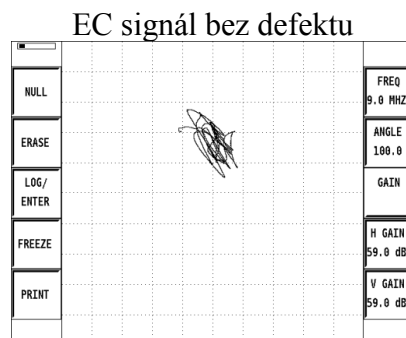


Obr. 5.2 Ukázka jednotlivých odezví vířivých proudů na poškození u vzorku 2

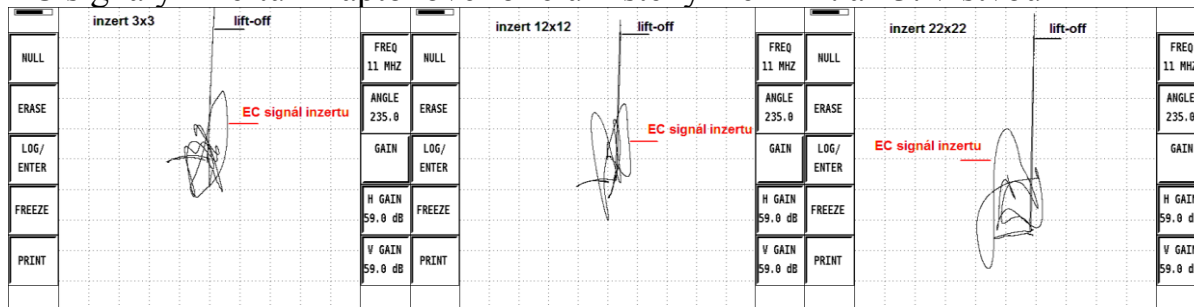
Při použití všech tří navržených sond byla detekována nespojitost v podobě spoje o šířce 1 cm, který vzniká spojením dvou částí již ve výrobě (viz Obr. 5.2).

Vzorek 3 – prepreg uhlíkový jednosměrný

Tento vzorek obsahuje umělé nespojitosti v podobě kaptonových fólií o velikostech (3x3, 5x5, 8x8, 12x12, 17x17 a 22x22) mm simulující delaminaci. Tyto kaptonové fólie jsou umístěny mezi 4. a 5. vrstvou, 8. a 9. vrstvou a 12. a 13. vrstvou.



EC signály inzertů z kaptonové fólie umístěny mezi 12. a 13. vrstvou



Obr. 5.3 Ukázka jednotlivých odezev vířivých proudů na umělé delaminace u vzorku 3

Při tomto zkoušení byly porovnávány sondy COMPROBE 9 MHz při pracovní frekvenci 9 MHz a sondy COMPROBE 11 MHz při pracovní frekvenci 11 MHz.

Delaminace mezi 8. a 9. vrstvou pomocí sondy COMPROBE 9 MHz nelze jednoznačně detekovat. Odhalení delaminace mezi těmito vrstvami nebylo úspěšné. Detekovatelné byly pouze inzerty velkých rozměrů 17x17 mm a 22x22 mm. Tento neúspěch je přisuzován nízkému frekvenčnímu rozsahu snímače. Předpokládá se, že zvýšením pracovní frekvence snímače by mohla být dosažena detekce ostatních velikostí inzertů simulující delaminaci. Tento předpoklad se po použití sondy s vyšší optimální frekvencí 11 MHz potvrdil. Zvýšením pracovní frekvence se dospělo k úspěšné detekci všech velikostí inzertů.

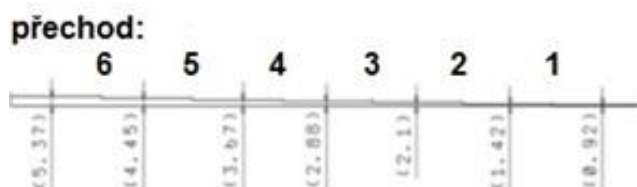
Uspokojivou hodnotu SNR u pracovní frekvence 9 MHz lze pozorovat až od inzertu 12x12 mm. Menší delaminace se ztrácejí v šumu nebo jejich odstup od šumu je malý. U pracovní frekvence 11 MHz lze uspokojivou hodnotu SNR pozorovat u všech velikostí inzertů.

Z naměřených dat na vzorku 3 lze jednoznačně konstatovat, že se zvýšením pracovní frekvence z 9 MHz na 11 MHz došlo ke zlepšení detekce jednotlivých umělých nespojitostí simulující delaminaci. Sonda COMPROBE 11 MHz odhalila všechny velikosti inzertů vložených mezi 4. a 5. vrstvou, mezi 8. a 9. vrstvou a mezi

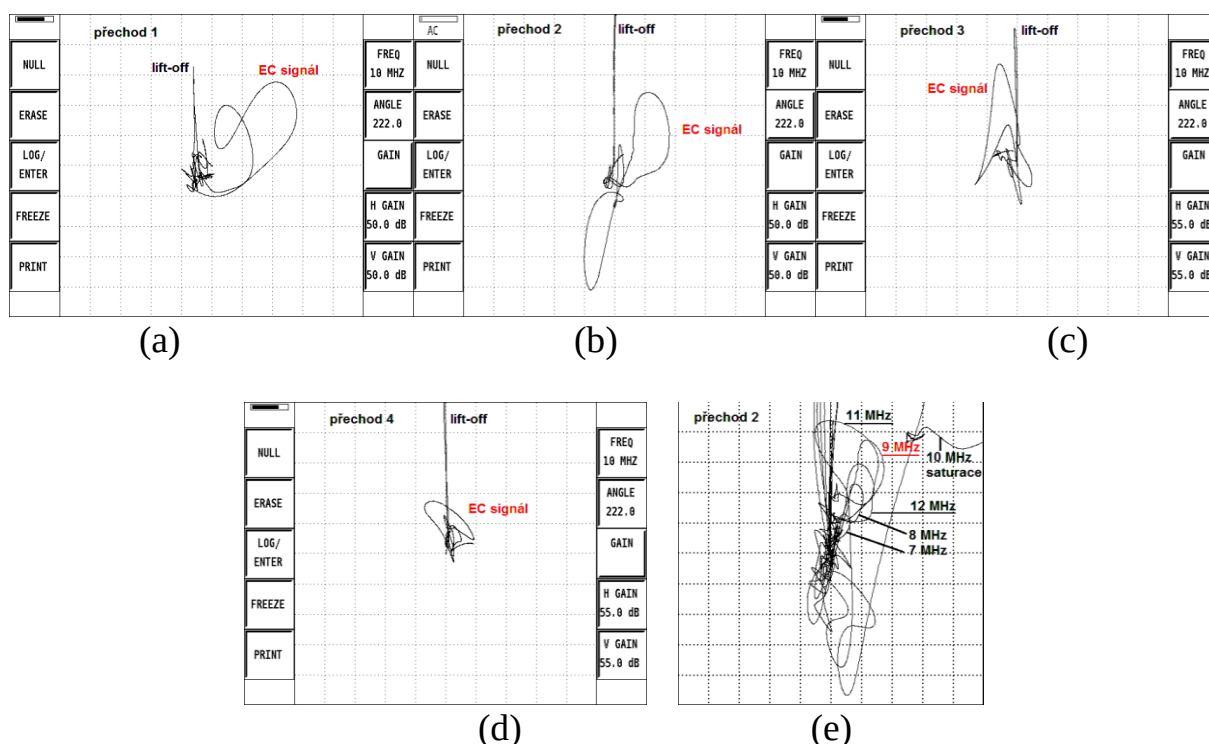
12. a 13. vrstvu (viz Obr. 5.3). Vzorek byl zkoušen z opačné strany, tedy odhadem tyto vrstvy vůči poloze sondy ležely v hloubkách cca 2,4 mm, 2,8 mm a 3,2 mm.

Vzorek 4 – schodovitá měrka prepreg uhlikový jednosměrný

Na Obr. 5.4 jsou číselně označeny jednotlivé přechody tlouštěk na schodovité měrce.



Obr. 5.4 Zobrazení číselného označení přechodů tlouštěk



Obr. 5.5 Odezvy vířivých proudů jednotlivých přechodů pro pracovní frekvenci 10 MHz (a až d), odezvy vířivých proudů v XY zobrazení pro přechod 2 pro pracovní frekvence 7 MHz až 12 MHz (e)

Z jednotlivých záznamů (viz Obr. 5.5 a až e) je patrné, že signály vířivých proudů se tvarově i velikostí impedance liší. Tvary jednotlivých signálů odpovídají tvarům EC signálů při pracovní frekvenci 9 MHz a 11 MHz, liší se pouze ve velikosti impedance jednotlivých signálů. Přechody 5 a 6 nelze detekovat.

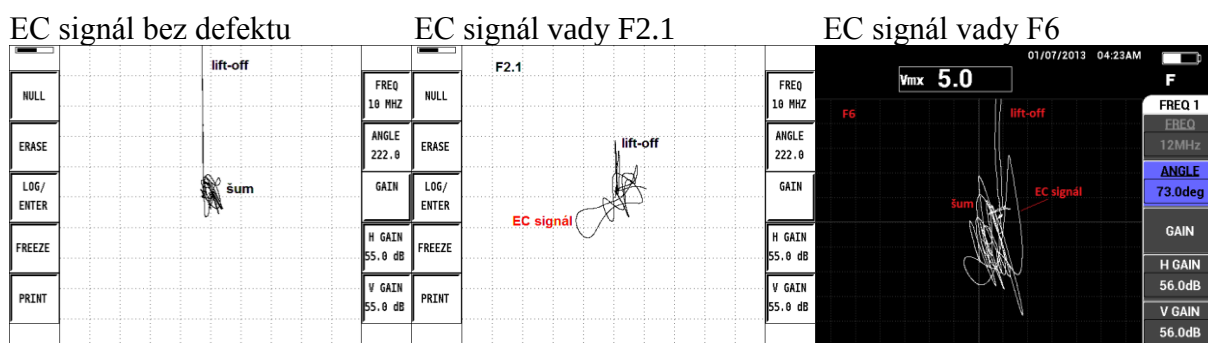
Tloušťka i fyzický charakter přechodu 2 je optimální pro demonstraci elektrických i mechanických parametrů snímače. Ve frekvenčním rozsahu od 5 MHz do 12 MHz v kroku 1 MHz byly zaznamenány jednotlivé odezvy na tvarovou nespojitost. Z jednotlivých EC signálů je patrné, že při nízkých frekvencích 5 MHz až 8 MHz je velikost amplitudy signálu pro danou nespojitost velmi malá. Při vyšších frekvencích od 11 MHz se naopak cívka dostává do saturace. Signál dosahuje

maximální amplitudy a se zvyšující frekvencí amplituda signálu klesá. Jako optimální pro zkoušení v provozu se jeví pracovní frekvence 10 MHz. Při této frekvenci sonda vykazuje čistý a stabilní signál.

Z naměřených záznamů vyplývá, že se zvýšením pracovní frekvence dojde ke zvýšení citlivosti sondy na danou tvarovou nespojitost. Lze pozorovat rezonanční kmitočty jednotlivých navržených sond. Z hlediska kontroly lze spolehlivě detekovat tvarové indikace do hloubky cca 3 mm.

Vzorek 5 – kalibrační měrka ABS 5045 laminát

Při zkoušení tohoto vzorku byly odhaleny téměř všechny umělé nespojitosti. Opět byl potvrzen předpoklad, že zvýšením pracovní frekvence dojde ke zvýšení citlivosti sondy na danou nespojitost. Při použití vyšší frekvence než 9 MHz byly odhaleny nespojitosti označené jako F2.1 a F6, které před zvýšením pracovní frekvence nebyly detekovány. Dále byly ověřeny další parametry zkoušení jako je rozlišitelnost, přenositelnost a opakovatelnost dat pomocí použití dvou přístrojů Nortec 500D a 600D.



Obr. 5.6 Ukázka odezev vířivých proudů na vady F2.1 a F6 u vzorku 5

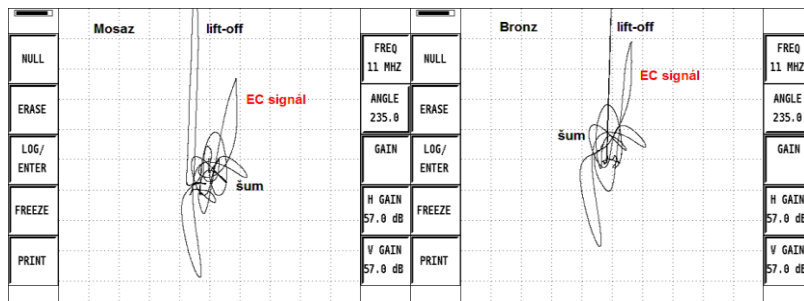
Na Obr. 5.7 jsou zobrazeny EC signály detekované umělé nespojitosti F11 pomocí obou přístrojů. Je patrné, že zvýšením frekvence dochází ke zvýšení citlivosti, tedy amplitudy signálů, a to při nižších nebo téměř stejných hodnotách zesílení.



Obr. 5.7 EC signály vady F11 při použití stejné sondy, ale dvou odlišných přístrojů

Vzorek 6 – vzorek BMS 8-353 laminát

Odezvy vířivých proudů na umělé vady v podobě tkanin z mosaze a bronzu byly při použití sond COMPROBE 9 MHz a COMPROBE 11 MHz v obou případech spolehlivě odhaleny (viz Obr. 5.8). Při porovnání signálu opět dochází se zvyšující frekvencí ke zvýšení citlivosti sondy.



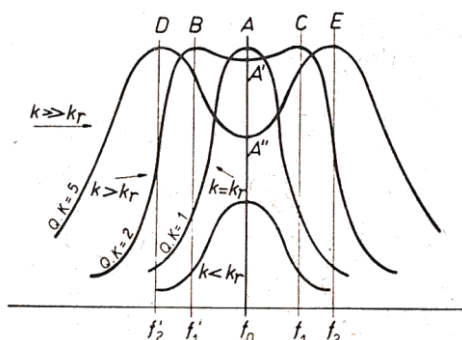
Obr. 5.8 Ukázka odezev vířivých proudů na umělé vady v podobě tkanin z mosaze a bronzu u vzorku 6

5.4 STÍNÍCÍ KRYTY A JEJICH VLIV NA VÝSLEDNOU ODEZVU VÍŘIVÝCH PROUDŮ

Při zkoušení pomocí přístroje nižší řady Nortec 500D bylo na vzorku 4 u tvarové nespojitosti, nazývané jako přechod 2 při použití sondy COMPROBE 9 MHz zjištěno, že při této pracovní frekvenci 9 MHz se sonda s použitím feritového kroužku dostává do rezonance a dochází ke zvětšení amplitudy, tedy vlastní indukčnosti cívky. Tento stav by se mohl zdát žádoucí, ovšem tomu tak není. U dvou vázaných rezonančních obvodů, naladěných na stejnou frekvenci, závisí chování takové soustavy značně na činiteli vazby, značeným k . Teoreticky může dosáhnout hodnoty 1, což ovšem není v praxi možné, jelikož by se přenos energie z jedné cívky do druhé uskutečnil bez ztrát. Činitel vazby je dle [30] definován vztahem:

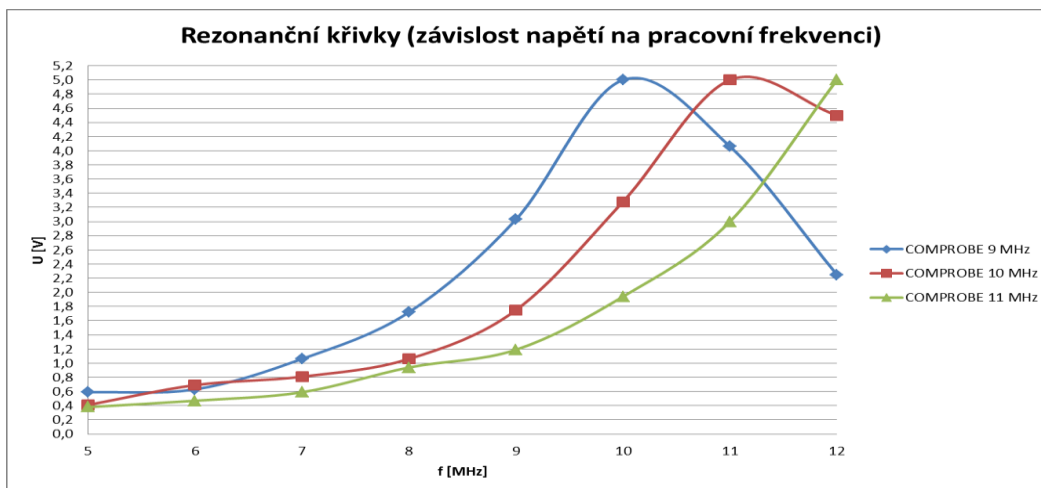
$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} [-]$$

a vyjadřuje poměr vzájemné indukčnosti M ke střední indukčnosti obou cívek L_1 a L_2 . Stupeň induktivní vazby se řídí vzájemnou vzdáleností cívek. U vysokofrekvenčních obvodů dochází k přenosu energie i při malém stupni vazby. Při tzv. kritickém činiteli vazby, označovaného jako k_r dochází k maximálnímu stupni přenosu energie. Tvar rezonanční křivky je zobrazen na Obr. 5.9.

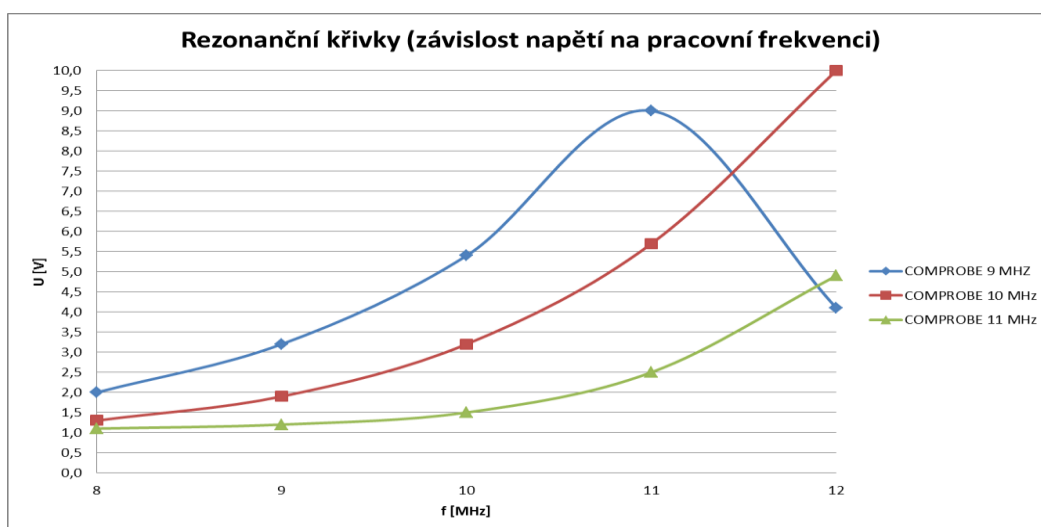


Obr. 5.9 Tvar rezonanční křivky pro různé stupně vazby [30]

Při kritické vazbě dosahuje napětí na základní frekvenci maximální amplitudy (viz Obr. 5.5 e). Na tomto záznamu je patrné, kdy se sonda bez stínících krytů dostává do rezonance. U každé navržené sondy se rezonanční frekvence liší v závislosti na odlišných počtech závitů a také použitých přístrojů vířivých proudů (viz Obr. 5.5e, Graf 5.1 a Graf 5.2). Z jednotlivých grafů lze tuto závislost projevu rezonance na výše zmíněných faktorech pozorovat. Frekvenční rozsah přístrojů se nachází v rozmezí 50 Hz (Nortec 500D)/10 Hz (Nortec 600D) až 12 MHz. Je patrné, že jednotlivé sondy se při použití různých přístrojů dostávají do oblasti nasycení při odlišných pracovních frekvencích. V případě sondy COMPROBE 9 MHz se sonda dostává do saturace při $f = 10$ MHz (Nortec 500D) a při $f = 11$ MHz (Nortec 600D). Tento rozdíl lze přiřadit k faktům, že jednotlivé přístroje obsahují odlišné elektronické obvody a po diagnostické stránce se zkoušení provádí na mezních pracovních frekvencích přístroje, kde nemusí být úplně zaručena stabilita signálů, přenositelnost a opakovatelnost dat. Nicméně z grafů rezonančních křivek je patrné, že nedochází k využití celého frekvenčního rozsahu sond COMPROBE 10 MHz a COMPROBE 11 MHz.



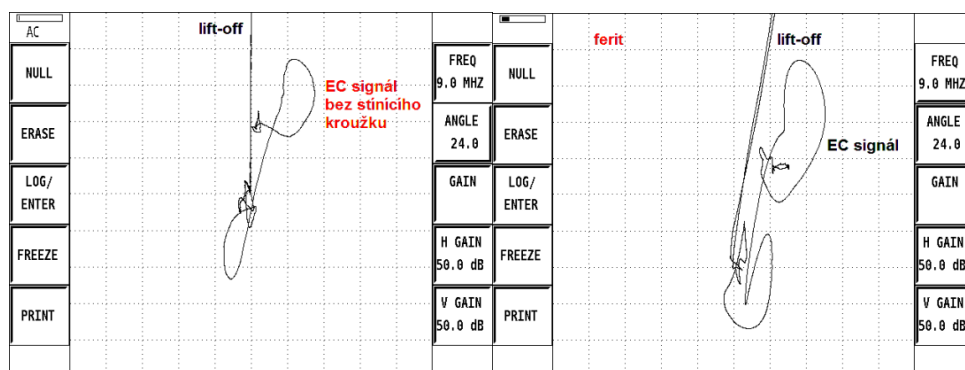
Graf 5.1 Rezonanční křivky jednotlivých sond při použití přístroje Nortec 500D



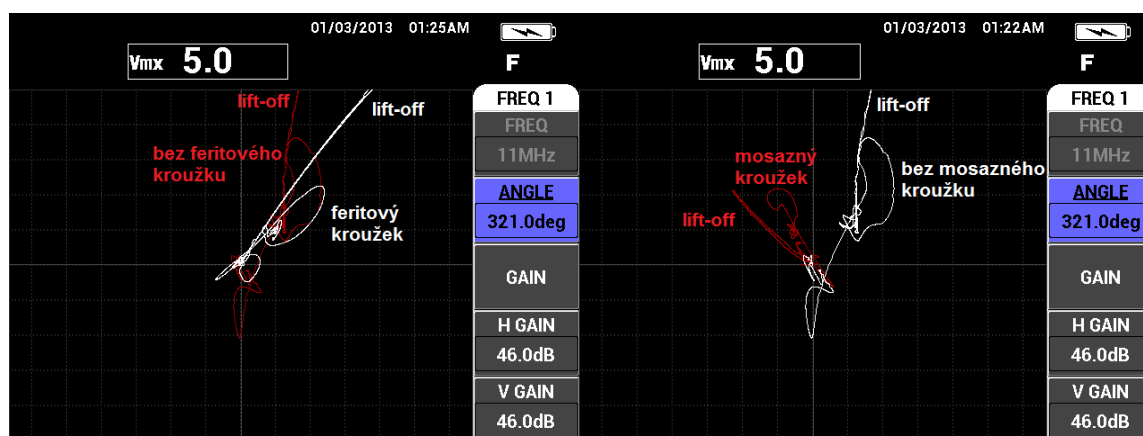
Graf 5.2 Rezonanční křivky jednotlivých sond při použití přístroje Nortec 600D

Projevy rezonance lze využít pro korektní nastavení pracovní frekvence a zamezit tak nestabilnímu zkoušení na mezních parametrech přístroje. Jak se ukázalo, tak důležitou roli v oblasti zkoušení a rezonance hrají také stínící kroužky. Na Obr. 5.10 je ukázán jev, který dokazuje, že přesto, že sonda COMPROBE 9 MHz (při použití Nortec 500D) se bez použití stínícího kroužku dostává do rezonance až při frekvenci 10 MHz, tak při použití feritového kroužku se sonda dostane do oblasti nasycení mnohem dříve. Je to dáno tím, že feromagnetický materiál mění vlastní indukčnost cívky, tudíž je to jako by došlo ke zvýšení počtu závitů. Navíc se v podstatě zkoušení pohybuje „těsně“ před rezonancí a je nutné takovéto fyzikální projevy uvážit před nastavením zkušebních parametrů.

Při použití Nortec 600D se tento projev rezonance u feritového stínícího krytu neuskutečnil. Použitím feritového kroužku nedošlo k úplnému nasycení, došlo korektně ke zmenšení amplitudy a minimálnímu rozdílu fáze signálu a lift-off (viz Obr. 5.11). Lze tedy pozorovat korektní odezvu použitelnou pro zkoušení. Při použití mosazného stínícího krytu dochází opět ke zmenšení amplitudy a rozevření fázového úhlu mezi signálem nespojitosti a signálem oddálení.



Obr. 5.10 EC signál při $f = 9$ MHz bez použití stínícího kroužku (vlevo), saturace sondy při $f = 9$ MHz při použití feritového kroužku (vpravo) (přístroj Nortec 500D)



Obr. 5.11 EC signály jednotlivých stínících kroužků (přístroj Nortec 600D)

6 ZÁVĚR

Hlavním cílem této disertační práce bylo navrhnout snímač vířivých proudů pro kontrolu uhlíkových kompozitních materiálů, zejména CFRP. Při návrhu prototypu snímače se vycházelo ze zkušeností, provedených experimentů a poznatků ostatních provedených experimentů.

Ze zkušeností získaných v oblasti návrhu snímačů neexistují žádné přesné analytické metody, které by zaručily, že snímač bude navržen správně. Při postupu návrhu se často jednalo o metodu „pokus/omyl“, tudíž bylo nezbytné potřebné kroky v návrhu opakovat, dokud nebylo dosaženo optimálního návrhu. Pro optimalizaci všech elektrických a mechanických parametrů cívky byly k dispozici kompozitní vzorky obsahující umělé nespojitosti simulující různé typy poškození. Vzhledem k plošnému tvaru a přístupu ke zkoušené součásti bylo zvoleno tužkové provedení sondy o průměru těla sondy cca 10 mm a senzoru 6 mm.

Vzhledem k tomu, že se zkoušení pohybuje na mezních kmitočtech přístrojů nelze plně zaručit opakovatelnost měření. Porovnáním experimentálních dat z obou přístrojů Nortec 500D a Nortec 600D bylo zjištěno, že přenositelnost dat není bez nastavení zkušebních parametrů pro dosažení požadované citlivosti možná i přesto, že se jedná o stejného výrobce.

Na základě experimentálního měření, které bylo provedeno na vzorcích využívaných v letectví, byly získány nové poznatky, které rozšířily oblast vývoje o následující:

- ✓ Byly navrženy tři sondy, ze kterých nejlépe vykazuje optimální parametry pro zkoušení sonda označená jako INDETEC COMPROBE 10 MHz v klasické koncepci s vysílací a přijímací cívkou, fungující na vysokých kmitočtech se standardní dostupnou měřicí technikou.
- ✓ Byl stanoven vliv stínících krytů různých materiálů na fázový posuv mezi užitečným signálem a signálem oddálení, kdy neferomagnetické materiály sice zmenšují citlivost sondy, ale na rozdíl od feromagnetických velice výrazně zvětšují rozdíl fáze mezi signálem vířivých proudů nespojitosti a signálem lift-off (oddálení). Bylo zjištěno, že stínící kryty zásadně zlepšují rozlišitelnost jednotlivých EC signálů.
- ✓ Byl posouzen vliv použití různých přístrojů vířivých proudů na přenositelnost a opakovatelnost dat.
- ✓ Byly ověřeny dostupné informace ohledně využití vířivých proudů pro kontrolu kompozitních materiálů CFRP.
- ✓ Experimentálně bylo zjištěno, že se zvyšující pracovní frekvencí se zvyšuje citlivost sondy na nespojitosti a zvyšuje se hloubka vniku vířivých proudů, což se liší od fyzikální definice standardní hloubky vířivých proudů u kovů.

Jedním z úkolů bylo také posoudit na základě experimentů vhodnost využití pole vířivých proudů ECA. Z hlediska plošné kontroly rozlehlých oblastí draku letadla i z hlediska interpretace dat by použití této techniky bylo přínosné. Výzkum nebyl

zaměřen na nýtové a vícevrstvé uhlíkové kompozitní konstrukce, které se draku letadla vyskytují. Proto techniku ECA, vývoj sondy pro kontrolu nýtových spojů a sestavení jednotky vířivých proudů, která bude schopna generovat vyšší hodnoty budící frekvence, než je 12 MHz a konečně simulaci vzájemné interakce mezi sondou a uhlíkovým kompozitem lze zařadit do námětů pro budoucí výzkum a vývoj v oblasti využití vířivých proudů pro kompozitní uhlíkové materiály.

Sonda byla navržena zejména pro kontroly leteckých konstrukcí a lze ji využít:

- ✓ pro kontrolu plošných částí,
- ✓ pro detekci povrchových i podpovrchových nespojitostí ve výrobě pro zaručení jakosti výrobku, v provozu při údržbě letadla a při vývoji nových leteckých konstrukcí,
- ✓ jako primární nebo doplňkovou metodu zkoušení (například k ultrazvukové metodě)
- ✓ pro ruční i automatizované zkoušení.

7 LITERATURA

- [1] GRIMBERG, R., SAVIN, A., STEIGMANN, R., BRUMA, A. Eddy current examination of carbon fibres in carbon-epoxy composites and kevlar. In: Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering. Slovenia, 2005, s. 5. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/ndt-slovenia2005/PAPERS/26-NDTP05-19.pdf>
- [2] LI, Xin, W YIN, Ze LIU, Philip J. WITHERS and A J PEYTON. Characterization of Carbon Fibre Reinforced Composite by Means of Non-Destructive Eddy Current Testing and FEM Modeling. In: 17th World Conference on Nondestructive Testing. 2008. vyd. Shanghai, China. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/toc.htm>
- [3] HEUER, H., SCHULZE, M. H., MEYENDORF, N. High Resolution Inspection of Carbon Fiber Materials by Eddy Current Techniques. In: 2nd International Symposium on NDT in Aerospace 2010. Germany, 2010. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/aero2010/papers/mo2a3.pdf>
- [4] SAVIN, A., STEIGMANN, R., IFTIMIE, N., BRUMA, A., GRIMBERG, R. Eddy current sensor array. Application to nondestructive evaluation of carbon-epoxy composites. NDT for Safety. 2007. Dostupné z: http://www.ndt.net/article/ENDTdays2007/nde_for_safety/26.pdf
- [5] Kompozitní materiály [online]. [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/files/6_kompozitni-materialy.pdf
- [6] DONÁT, Kamil. *Příručka pro konstruktéry radioamatéry: určeno radioamatérům, konstruktérům a laborantům v průmyslu a vývoji*. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961. Řada elektrotechnické literatury.
- [7] NOVÁK, Karel a Josef KOZLER. *Amatérské součástky a stavba tranzistorových přijímačů: určeno pro radioamatéry*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Populární radiotechnika.

8 PŘEHLED PUBLIKACÍ A ČINNOSTI

Vzdělání:

Doba (od – do)	3. září 2001 – 26. června 2006
Název školy	VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Obor	Elektrotechnická výroba a management
Titul	Inženýr

NDT kvalifikace:

Zkoušení vířivými proudy – Stupeň III dle EN 9712, platnost od 01/2011

Ultrazvukové zkoušení – Stupeň III dle EN 9712, platnost od 01/2011

Pracovní zkušenosti:

Doba (od – do)	1. srpna 2006 – 31. července 2008
Název společnosti	INDETEC ndt, s.r.o.
Pozice	Zkušební technik NDT
Doba (od – do)	1. srpna 2008 – 30. duben 2017
Název společnosti	Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s.
Pozice	Samostatný pracovník výzkumu a vývoje
Doba (od – do)	1. května 2017 – dosud
Název společnosti	ÚJV Řež, a.s.
Pozice	Technolog NDT – ET

Články a odborné příspěvky:

KAFKA, V., BOHÁČOVÁ, M. Korekce pohybu a import dat v softwaru systému ARAMIS HS. *Czech Aerospace Proceedings*. 2009, roč. 2009, č. 1, s. 4. DOI: 1211-877X.

BOHÁČOVÁ, M., ŠEDEK, J., PAVLAS, J. Probability of Detection and Prediction of Fatigue Crack Growth in Aircraft Structures. *Czech Aerospace Proceedings*. 2010, roč. 2010, č. 3, s. 3. DOI: 1211-877X.

BOHÁČOVÁ, M. Postup Teardown analýzy draku letounu. In *NDE for Safety / Defektoskopie 2011*. 1. Ostrava, VUT v Brně. 2011. p. 17 - 22. ISBN 978-80-214-4358-7.

BOHÁČOVÁ, M. Rešerše NDT metod používaných v letectví. *NDT Welding Bulletin*. 2011. 21(3). p. 11 - 18. ISSN 1213-3825.

BOHÁČOVÁ, M., RŮŽEK, R. NDI aspects of aircraft lifetime extension in according to damage tolerance philosophy. *Proceedings of 14th International Conference on Mesomechanics*. Budapest, Hungary: Hungarian Academy of Science Centre for Energy Research, 2012, 151-160. ISBN 978-963-508-622-1.

BOHÁČOVÁ, M. Nové techniky kontroly a software v metodě vířivých proudů. NDT Welding Bulletin, 2012, roč. 21, č. 4, s. 38-41. ISSN: 1213-3825.

BOHÁČOVÁ, M. Methodology of short fatigue crack detection by the eddy current method in a multi-layered metal aircraft structure. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2013, vol. 35, s. 597-608 [cit. 2014-09-11]. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.06.009.

Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350630713002094>

BOHÁČOVÁ, M. Detection of imperfections on internal surface of super-duplex stainless steel tubes designated for oil and gas exploration by means of eddy current method. In: 11th European Conference on NDT. Říjen 2014.

NOVÁKOVÁ, L., BOHÁČOVÁ, M. a HOMOLA, P. Application of material analysis and eddy current conductivity tests to aircraft accident investigation. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2015, 56, 422-428 [cit. 2017-05-23]. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.12.011. ISSN 13506307. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350630714003744>

BOHÁČOVÁ, M., KOPEC, B. Zkoušení vířivými proudy. Studijní monografie. Překlad a odborná korektura, VUT v Brně a ČNDT, Brno 2017, 170 s., ISBN 978-80-214-5509-2 .

BOHÁČOVÁ, M. *Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení vířivými proudy – Všeobecné zásady*. ČSN EN ISO 15549.2011, překlad normy, Praha, ÚNMZ Praha. 2011. p. 1 - 12.

Přednášková činnost:

„Damage tolerance, Teardown analýza, Pravděpodobnost detekce. Kurz Damage Tolerance – metody, aplikace“. Praha: Česká společnost pro mechaniku, ČVUT, Fakulta strojní, Březen 2011.

Dostupné z www: http://www.practic.com/CZ_DTMA.php

„Základy vířivých proudů a vizuální metody a jejich aplikace na draky letounů. Kurz Damage Tolerance – metody, aplikace“. Praha: Česká společnost pro mechaniku, ČVUT, Fakulta strojní, Březen 2011. Dostupné z www: http://www.practic.com/CZ_DTMA.php

„1. NDT obecně, vizuální kontrola, vířivé proudy“. AERO Vodochody AEROSPACE a.s., Praha, Říjen 2014.

„Nedestruktivní kontrola uhlíkových kompozitů metodou vířivých proudů“ na odborném semináři VZLÚ - „Nové poznatky a výsledky v oblasti materiálů, technologií, zkoušek a aplikací kompozitů v leteckém průmyslu ČR“. VZLÚ, a.s., Praha, 13. duben 2017.

„Kontrola uhlíkových kompozitních materiálů pomocí metody vířivých proudů“ na semináři Olympus – „Nedestruktivní testování a nepřímá vizuální kontrola v letectví“, Olympus Czech Group, Praha, 25. květen 2017.

9 ABSTRACT

Carbon composites due to their specific properties will find their use in various industries, especially in the aircraft industry. In the field of aerospace, carbon composites are the most used, especially CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic). CFRP composites have excellent mechanical properties such as high specific strength and stiffness, and represent a huge potential for weight-saving. Since CFRP composites have a laminate structure, it is easy to damage by the external load. Consequently, the delamination is created which greatly reduces the strength of the structure. At present, ultrasonic and visual methods are used to detect delamination, but they have their limits. Non-destructive inspection is performed at specified inspection intervals for aircraft maintenance and removal of individual parts of the aircraft is usually required, what means a huge time expense. There is an interest in quick detection of especially delamination and other discontinuities during aircraft operation. This detection can be provided by the eddy current testing.

This thesis deals with design of an eddy current transducer which enables non-destructive inspection of composite aircraft structures primarily carbon fiber reinforced plastic (CFRP) in areas of manufacture and maintenance. The design of the transducer is based on analytical-experimental approach and its electrical and mechanical parameters were optimized to ensure a good signal to noise ratio at the six composite samples. These samples contain artificial discontinuities in the form of various types of defects. These defects are simulating the various types of damage created in the aircraft structure, especially delamination or thickness changes of composite materials. The experimental measurements, data collection and non-destructive evaluation were performed during the period. The result of this work is functional eddy current probe, which is reliably able to detect some damage of the carbon composite structures to the depth of 3,9 mm.