

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra jakosti a spolehlivosti strojů**



## **Diplomová práce**

**Kontrola kvality strojů pomocí šíření akustických a  
elektromagnetických vln**

**Bc. Rostislav Mařan**

© 2023 ČZU v Praze

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

Technická fakulta

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Rostislav Mařan

Inženýrství údržby

Název práce

**Kontrola kvality strojů pomocí šíření akustických a elektromagnetických vln**

Název anglicky

**Quality control of machines by propagation of acoustic and electromagnetic waves**

---

## **Cíle práce**

Cílem diplomové práce je porovnat metody NDT ultrazvukovou defektoskopie a defektoskopie pomocí vířivých proudů a na základě tohoto porovnání zvolit optimální metodu NDT pro konkrétní aplikaci v leteckém provozu v prostředí letecké základně Kbely.

## **Metodika**

v rámci výzkumného měření na vybraném objektu s využitím sady různých sond. Výsledky měření budou analyticky zpracovány pomocí statistických nástrojů a vzájemně porovnány.

Osnova práce:

- 1) Úvod
- 2) Rozbor současného stavu (popis metod NDT, popis sledovaných objektů a jejich závad)
- 3) Cíl práce
- 4) Metodika práce
- 5) Výsledky (realizace měření na zvolené součásti letadla, porovnání jednotlivých metod měření, statistické zpracování dat)
- 6) Závěr

**Doporučený rozsah práce**

40-60

**Klíčová slova**

defektoskopie, šíření vln, ultrazvuk, vířivé proudy

**Doporučené zdroje informací**

KOPEC, B. – ČESKÁ SPOLEČNOST PRO NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí : (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.

KREJČA, Josef a KOL. ATG S.R.O., 2015. MT Magnetická metoda přášková stupeň I,II. Praha 9 – Letňany: ATG s.r.o.

LANGENBERG, Karl-Jorg, Rene MARKLEIN a Klaus MAYER, 2012. Ultrasonic nonde-structive testing of materials: theoretical foundations. Boca Raton: Taylor & Francis. ISBN 978-1-4398-5588-1.

Periodika, předpisy a firmení literatura

REGAZZO, Richard a Marcela REGAZZOVÁ, 2013. Ultrazvuk: základy ultrazvukové defektoskopie. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-466-8.

**Předběžný termín obhajoby**

2022/2023 LS – TF

**Vedoucí práce**

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

---

**Elektronicky schváleno dne 7. 1. 2022****doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

**Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2022****doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 08. 10. 2022

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Kontrola kvality strojů pomocí šíření akustických a elektromagnetických vln" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31. 3. 2023

---



## **Poděkování**

Děkuji panu prof. Ing. Martinu Pexovi, Ph.D., za rady a odborný dohled při tvorbě mé diplomové práce. Děkuji panu Ing. Pavlovi Prosovi z firmy R&R NDT za cenné zkušenosti a získané praktické poznatky o ultrazvukové defektoskopii, současně děkuji za získanou praxi u defektoskopického týmu Armády České republiky 24. základny dopravního letectva ve Kbelích.

Dále děkuji za absolvované konzultace a inspiraci panu Tomáši Příbylovi – Kontrolor letadel senior NDT Czech Airlines Technics, a.s., panu Markovi Mančalovi a Lukášovi Tisoňovi z firmy 3Dwiser s.r.o., Vojenskému leteckému historickému ústavu Praha a Leteckým opravnám Malešice – Praha.

# Kontrola kvality strojů pomocí šíření akustických a elektromagnetických vln

## **Abstrakt:**

Na začátku této diplomové práce byla definována fyzikální podstata vybraných metod nedestruktivní defektoskopie. Dále byla nedestruktivní defektoskopie rozčleněna již na metodu ultrazvukovou a metodu vířivých proudů. V této části diplomové práce, byly popsány praktické postupy metody ultrazvukové defektoskopie a metody vířivých proudů, prováděných převážně na letecké technice. Obrazové snímky prováděných metod nedestruktivní defektoskopie a druhy poškození, které jsou v této práci publikované, pochází převážně z nálezů získaných při údržbě vojenské letecké techniky. Následně byl proveden popis a rozbor defektoskopicky zkoumaného objektu, na kterém bylo uskutečněno srovnávací defektoskopické měření. Součástí popisu bylo i provedené laserové skenování tohoto etalonového listu firmou 3D Wiser. Výzkumná část této diplomové práce byla uskutečněna v zázemí 24. základny dopravního letectva ve Kbelích. Součástí výzkumného měření bylo provedeno i doplňkové měření rušivých vlivů působících v průběhu srovnávacího defektoskopického měření. Defektoskopické srovnávací měření bylo uskutečněno na základě získaných praktických zkušeností ve firmě R&R NDT a 24. základny dopravního letectva ve Kbelích.

**Klíčová slova:** Defektoskopie, šíření vln, ultrazvuk, vířivé proudy

# **Quality control of machines by propagation of acoustic and electromagnetic waves**

## **Abstract:**

In the beginning of this thesis the physical nature of selected non-destructive defectoscopy methods was defined. Furthermore, non-destructive defectoscopy was divided into the ultrasonic method and the eddy current method. In this part of thesis the practical procedures of the ultrasonic defectoscopy methods and the eddy currents methods, performed mainly on aircraft technology, were described. The images of non-destructive defectoscopy methods and the types of damage published in this thesis come mainly from findings obtained during the maintenance of military aircraft equipment. Subsequently, description and analysis of the defectoscopy-examined object was carried out, on which a comparative defectoscopy measurement was taken. Part of the description was the laser scanning of this reference standard by 3D Wiser. The research part of this thesis was carried out in the facilities of the 24th Air Force Base in Kbely . As part of the research measurement was also an additional measurement of interferences acting during the comparative defectoscopic measurement. The defectoscopic comparative measurement was carried out on the basis of the practical experience gained in the company R&R NDT and the 24th Air Force Base in Kbely.

**Keywords:** Defectoscopy, wave propagation, ultrasound, eddy currents





# Obsah

<b>Úvod</b> .....	<b>17</b>
<b>1 Rozbor současného stavu</b> .....	<b>18</b>
1.1 Popis metod NDT.....	23
1.1.1 Popis ultrazvukové defektoskopie – praktický příklad využití v letectví.....	23
1.1.2 Popis defektoskopie vířivých proudů – praktický příklad využití v letectví.....	27
1.2 Popis sledovaných objektů a jejich závad.....	29
<b>2 Cíl práce</b> .....	<b>39</b>
<b>3 Metodika práce</b> .....	<b>40</b>
<b>4 Výsledky (realizace měření na zvolené součásti letadla, porovnání jednotlivých metod měření, statistické zpracování dat)</b> .....	<b>41</b>
4.1 Realizace měření na zvolené součásti letadla.....	41
4.1.1 Realizace doplňkového měření hlukové expozice .....	41
4.1.2 Realizace doplňkové měření teplotní závislosti .....	43
4.1.3 Realizace kvalitativního defektoskopického měření vad etalonu pomocí ultrazvukové defektoskopie .....	46
4.1.4 Realizace kvalitativního defektoskopického měření vad etalonu pomocí defektoskopie vířivých proudů .....	56
4.2 Porovnání jednotlivých metod měření.....	67
4.2.1 Metoda ultrazvukové defektoskopie a vířivých proudů.....	67
4.2.2 Statistické zpracování dat.....	70
Vyhodnocení ultrazvukové defektoskopie .....	70
Vyhodnocení vířivoproudé defektoskopie .....	84
Vzájemné porovnání metody vířivých proudů a ultrazvukové defektoskopie .....	94
<b>Závěr</b> .....	<b>97</b>
<b>Seznam použité literatury</b> .....	<b>98</b>
<b>Přílohy</b> .....	<b>101</b>
Příloha 1 – Technická diagnostika prováděná na letecké technice .....	101
Příloha 2 – Obecné rozdělení metod NDT a jejich podmínky realizace.....	112
Příloha 3 – Historický vývoj ultrazvukové defektoskopie, fyzikální podstata a příklady jejího využití.....	113
Příloha 4 – Praktický příklad využití ultrazvukové defektoskopie v letectví .....	114
Příloha 5 – Historický vývoj a fyzikální podstata metody vířivých proudů.....	117
Příloha 6 – Praktická ukázka využití vířivých proudů ke kontrole kolejnic, Státní Správa železnic 119	
Příloha 7 – Praktický příklad využití defektoskopické metody vířivých proudů v letectví..	122
Příloha 8 – Proces laserové metrologie etalonového listu firmou 3D Wiser .....	135
Příloha 9 – Technické parametry magnetického tloušťkoměru laku PCE-CT28 a zdrojová data měřících pokusů .....	142
Příloha 10 – Ovládací prvky Hlukoměru Testo 816–1, důvod snímání hlukové expozice a jeho předpokládaný vliv na průběh defektoskopie .....	143



Příloha 11 – Tepelné podmínky na pracovišti a ovládací prvky na termovizní kameře.....	148
Příloha 12 – Teoretický rozbor a praktické využití defektoskopických metod na uživatelské úrovni, ultrazvukové školení.....	149
Příloha 13 – Obecný popis, ovládací prvky a architektura ultrazvukového defektoskopu Krautkramer Branson USN 52R.....	154
Příloha 14 – Obrázky, schématické uspořádání a obecné parametry použitých ultrazvukových sond	157
Příloha 15 – Typ akustické vazby, stanovení její tloušťky a její aplikování.....	163
Příloha 16 – Obecný postup kalibrace ultrazvukového defektoskopického přístroje pro potřeby kvalitativního měření na etalonovém listu.....	165
Příloha 17 – Obecný popis, ovládací prvky a architektura defektoskopického přístroje Nortec 500D	182
Příloha 18 – Obrázky, schématické uspořádání a obecné parametry vířivoproudých sond	186
Příloha 19 – Obecný postup kalibrace vířivoproudého defektoskopického přístroje pro potřeby kvalitativního měření na etalonovém listu.....	188
Příloha 20 – Zdrojová data defektoskopického měření.....	189
Příloha 3 – Vrtulový disk AV – 72 RU.....	192



## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Odhalení a změření rozměru trhliny nepřímou vizuální NDT pomocí videoskopu .....	18
Obrázek 2 - Zkušební stolice proudového motoru 4. generace.....	19
Obrázek 3 - Vizuální metoda NDT spalovacích prostorů Turbovrtulového motoru po provedené montáži.....	20
Obrázek 4 - Příčiny a následky provozního přetížení strojů .....	22
Obrázek 5 - Obtížně kontrolovatelné a silně namáhané kování závěsu stojiny příďového kola letadla ABC v generačních obměnách .....	25
Obrázek 6 - Zatížení výkovek závěsu stojiny příďového kola .....	26
Obrázek 7 - Etalonový list .....	30
Obrázek 8 - Vrtulový disk typu AV – 72 RU.....	31
Obrázek 9 - Letoun An – 24 V .....	32
Obrázek 10 - Jednotlivé části vrtulového listu .....	33
Obrázek 11 - Laserové skenování etalonového listu .....	34
Obrázek 12 - Magnetický tloušťkoměr laku PCE-CT28 .....	35
Obrázek 13 - Vyhodnocení tlumících účinků nátěru etalonového listu na indukci vířivých proudů sondy typu MP.060-60BL.....	37
Obrázek 14 - Skica ultrazvukově zjištěných rozměrů defektoskopicky zkoumané vady.....	38
Obrázek 15 - Ustanovení Hlukoměru Testo 816-1 .....	42
Obrázek 16 - Měření povrchové teploty vybrané vady etalonu.....	45
Obrázek 17 - Nastavená hodnota odražené teploty .....	46
Obrázek 18 - Datové kabely použitých sond .....	53
Obrázek 19 - Měřicí postup na etalonovém listu .....	54
Obrázek 20 - Ukázka odečítání vad z rastru .....	55
Obrázek 21 - Rušivé vlivy v průběhu kalibrace vířivých proudů na trhlinovém etalonu standard TB-S1 .....	59
Obrázek 22 - Etalon TB-S1 EDM Standard .....	60
Obrázek 23 - Funkce Waterfall sonda vířivých proudů MRL/A /90.5 /6.....	61
Obrázek 24 - Funkce Waterfall sonda vířivých proudů MP.060-60BL .....	62
Obrázek 25 - Funkce Waterfall sonda vířivých proudů M7L9003-60.....	63
Obrázek 26 - Funkce Waterfall sonda vířivých proudů MM7L9003-50.....	64
Obrázek 27 - Funkce Waterfall sonda vířivých proudů M7L905-60 .....	64



## Seznam rovnic

Rovnice 1 - Vlnová rovnice .....	24
Rovnice 2 - Maxwellovy rovnice.....	28

## Seznam grafů

Graf 1 - Korelace účinnosti sondy MSEB4 na teplotě.....	71
Graf 2 - Korelace účinnosti sondy MWB 70 na teplotě.....	71
Graf 3 - Korelace účinnosti sondy MWB 60 na teplotě.....	72
Graf 4 - Korelace účinnosti sondy MWB 45 na teplotě.....	72
Graf 5 - Korelace účinnosti sondy MSW na teplotě.....	73
Graf 6 - Průběh rušivých vlivů při ultrazvukové defektoskopii .....	74
Graf 7 - Korelace účinnosti sondy MSEB4 na hlukové expozici .....	76
Graf 8 - Korelace účinnosti sondy MWB 70 na hlukové expozici .....	76
Graf 9 - Korelace účinnosti sondy MWB 60 na hlukové expozici .....	77
Graf 10 - Korelace účinnosti sondy MWB 45na hlukové expozici.....	77
Graf 11 - Korelace účinnosti sondy MSW na hlukové expozici.....	78
Graf 12 - Znázornění účinnosti sond v průběhu měření .....	83
Graf 13 - Korelace účinnosti sondy M7L9003-60 na teplotě.....	86
Graf 14 - Korelace účinnosti sondy MM7L9003-50 na teplotě.....	86
Graf 15 - Korelace účinnosti sondy M7L9003-60 na hlukové expozici .....	87
Graf 16 - Korelace účinnosti sondy MM7L9003-50 na hlukové expozici .....	87
Graf 17 - Průběh rušivých vlivů při vířivoproudé defektoskopii .....	89
Graf 18 - Grafické znázornění účinnosti vířivoproudých sond v průběhu měření .....	90
Graf 19 - Korelace účinnosti sondy typu M7L905-60 na hlukové expozici .....	91
Graf 20 - Korelace účinnosti sondy typu M7L905-60 na hlukové expozici .....	91
Graf 21 - Korelace účinnosti sondy MP.060-60BL na teplotě .....	92
Graf 22 - Korelace účinnosti sondy MP.060-60BL na hlukové expozici .....	92
Graf 23 - Korelace účinnosti sondy MRL/A /90.5 /6 na teplotě .....	94
Graf 24 - Korelace účinnosti sondy MRL/A /90.5 /6 na hlukové expozici.....	94
Graf 25 - Procentuální srovnání úspěšnosti měřících pokusů jednotlivých vířivoproudých sond .....	96
Graf 26 - Procentuální srovnání úspěšnosti měřících pokusů jednotlivých ultrazvukových sond .....	96





## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Výsledky změřené tloušťky etalonového listu a jeho výrobní parametry .....	36
Tabulka 2 - Technické parametry Hlukoměru Testo 816-1.....	42
Tabulka 3 - Technické parametry Termovizní kamery BOSCH GTC 400 C.....	44
Tabulka 4 - Technické parametry ultrazvukového přístroje USN 52 – R.....	47
Tabulka 5 - Technické parametry – sonda MSEB4 .....	48
Tabulka 6 - Technické parametry – sonda MWB 70-4 .....	48
Tabulka 7 - Technické parametry – sonda MWB 60-4 .....	49
Tabulka 8 - Technické parametry – sonda MWB 45-4 .....	49
Tabulka 9 - Technické parametry – sonda MSW – Quick Change .....	50
Tabulka 10 - Technické parametry akustické vazby – Mogul special SAE 20W-30.....	51
Tabulka 11 - Kalibrace defektoskopického přístroje USN52R .....	52
Tabulka 12 - Technické parametry defektoskopického přístroje Nortec 500D .....	56
Tabulka 13 - Technické parametry – sonda vířivých proudů MP.060-60BL .....	57
Tabulka 14 - Technické parametry – sonda vířivých proudů MRL/A/90.5 /6 .....	57
Tabulka 15 - Technické parametry – sonda vířivých proudů MM7L9003-50.....	58
Tabulka 16 - Technické parametry – sonda vířivých proudů M7L905-60 .....	58
Tabulka 17 - Technické parametry – sonda vířivých M7L9003-60 .....	58
Tabulka 18 - Kalibrace defektoskopického přístroje Nortec 500D pro všechny sondy.....	65
Tabulka 19 - Postup kvalitativní defektoskopie vířivých proudů.....	66
Tabulka 20 - Korelace účinnosti ultrazvukových sond v závislosti na rušivých vlivech prostředí.....	70
Tabulka 21 - Účinnost jednotlivých sond na hodnotě zpětného echa v průběhu měření .....	81
Tabulka 22 - Korelace účinnosti vířivoproudých sond v závislosti na rušivých vlivech prostředí.....	85
Tabulka 23 - Účinnost jednotlivých vířivoproudých sond na hodnotě zpětného echa v průběhu měření .....	93
Tabulka 24 - Počet úspěšně provedených měřících pokusů jednotlivých metod .....	95
Tabulka 25 - Srovnání úspěšné četnosti měřících pokusů jednotlivých ultrazvukových sond .....	95
Tabulka 26 - Srovnání úspěšné četnosti měřících pokusů jednotlivých vířivoproudých sond .....	96



## Seznam použitých zkratk a znaků

$\lambda_v$  – vlnová délka [m]

$d_v$  – tloušťka akustické vazby [m]

$n$  – počet kmitů nebo impulsů

$\alpha$  – hodnota útlumu [dB/m]

$f$  – frekvence (kmitočety) [Hz]

$P_1$  – pokles akustického tlaku [Pa]

$P_0$  – počáteční akustický tlak [Pa]

$l$  – dráha [m]

$\alpha$  – hodnota útlumu [dB/m]

$c_l$  – rychlost podélné ultrazvukové vlny [m/s]

$\rho$  – hustota [kg/m<sup>3</sup>]

$\mu$  – Poissonovo číslo

$E$  – vektor intenzity elektrického pole [-]

$B$  – vektor magnetické indukce [-]

$D$  – vektor elektrické indukce [-]

$H$  – vektor intenzity magnetického pole [-]

$l$  – délka libovolné nehybné uzavřené křivky vůči pozorovací soustavě souřadnic [m]

$S$  – libovolná plocha ohraničená křivkou „l“ [m<sup>2</sup>]

$t$  – časový interval přenesení elektrického náboje [s]

$Q$  – náboj částice v časově proměnném magnetickém poli [C]

$\rho$  – objemová hustota volných nábojů [A m<sup>-2</sup>]

$j$  – hustota volných proudů [A m<sup>-1</sup>]







## Úvod

Práce bude věnována vybraným metodám nedestruktivní defektoskopie, které využívají pro kontrolu technického stavu strojů vybuzené kmity částic a elektronů šířící se hmotovým prostředím. Z fyzikálního hlediska si jsou tyto akustické a elektromagnetické vlny svou podstatou velmi podobné, za předpokladu že se šíří hmotovým prostředím. Tato společná vlastnost šířících se vln vyplývá z vnitřních vlastností látek, které ovlivňují rychlost těchto šířících se vln. Akustické vlny jsou ovlivňovány setrvačností a pružností látek, jejichž hodnotu lze vyjádřit pomocí hustoty a modulem pružnosti dané látky. U elektromagnetických vln ovlivňuje rychlost šíření hmotovým prostředím magnetické pole látek, které nahrazuje podmínku setrvačnosti a podmínka elasticity je nahrazena elektrickým polem.

Svou fyzikální podstatou si jsou tedy metoda ultrazvukové defektoskopie a metoda vířivých proudů velmi podobné, přesto vše je jejich podstata využití v praktické defektoskopii rozdílná. Každá ze zmiňovaných metod má své opodstatněné využití pro defektoskopické kontroly. Při konkrétním porovnání využitelnosti ultrazvukové defektoskopie a defektoskopie vířivých proudů pro diagnostiku letecké techniky, by každá ze zmiňovaných metod měla mít své opodstatněné využití. Toto dokazuje firma Czech Airlines Technics, a.s., která provádí ultrazvukovou a vířivoproudou defektoskopii na letounech B737, A318/319/320/321, ATR42/72, A330, A340, B757, B767, EMBRAER E145. U těchto strojů provádí ultrazvukovou metodu, a to úspěšně v místech, která jsou překryta jinou konstrukcí (výztuhy, držáky, závěsy, podélníky, přepážky apod.), konkrétně tam kde lze k takovému místu šířit příčnou ultrazvukovou vlnu. Jako doplňkovou kontrolu pro ověření indikace využívají vířivé proudy, které ale úspěšně aplikují i jako hlavní kontrolu povrchových trhlin, hloubkovou korozi či kontrolu otvorů pro spojovací prvky (nýty, hi-loky a jiné šrouby a čepy).

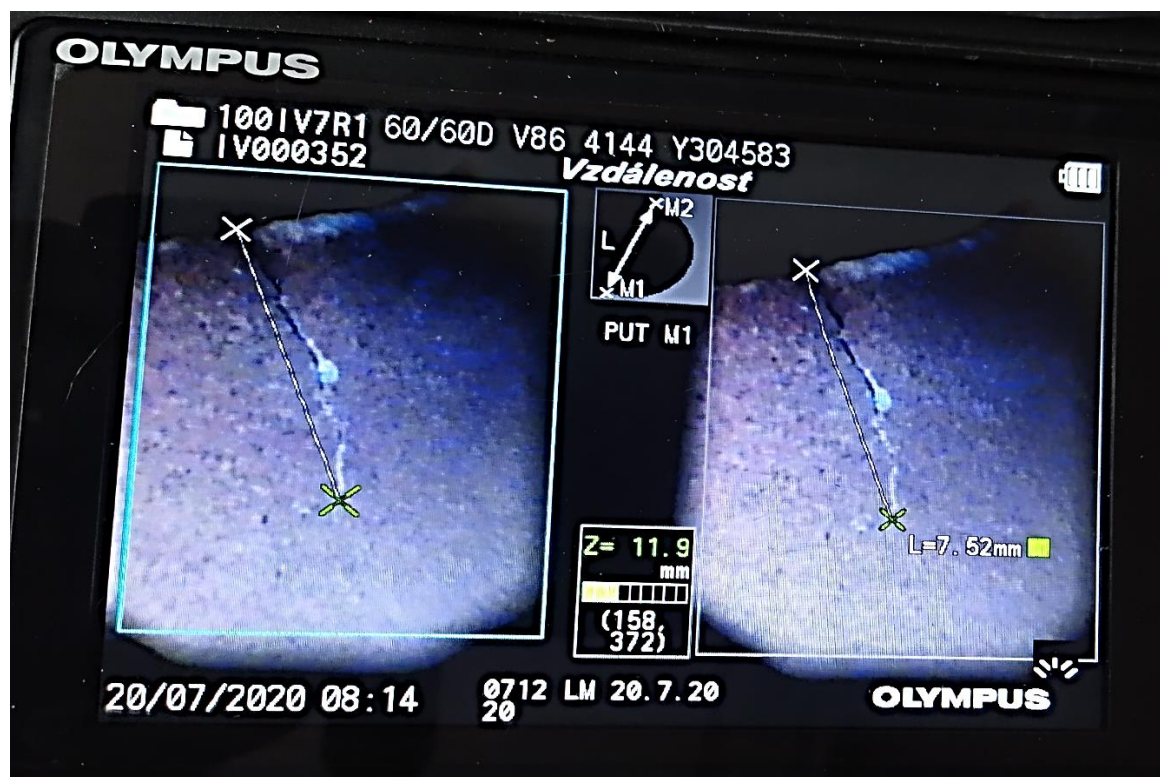
Při srovnání defektoskopických kontrol, které se provádí celorepublikově na vojenských letadlech, dochází k absolutnímu útlumu využití ultrazvukové defektoskopie a to na úkor vířivoproudé defektoskopie.



# 1 Rozbor současného stavu

V dnešní době nachází jednotlivé metody nedestruktivní defektoskopie využití v rámci výrobního a provozního procesu strojních zařízení široké uplatnění. Ve výrobním procesu se metody nedestruktivní defektoskopie využívají pro měření užitných vlastností, ke kontrole materiálové homogenity, k měření rozměrů a chemických vlastností daných polotovarů a výrobků. V rámci provozního procesu strojních celků a jejich částí se metody NDT kontroly využívají při preventivní údržbě. Při preventivní údržbě se provádí NDT kontroly, které jsou zaměřené na detekování a lokalizování materiálové vady testované strojní části. Výsledky defektoskopických zkoušek jsou následně vyhodnocovány prostřednictvím stacionárních či mobilních detekčních přístrojů se softwarovou podporou stereoskopického měření a fázového posuvu výsledku vůči trojrozměrnému snímanému objektu (*viz obrázek 1*). (prof. Ing. Štěpánek, DrSc a kolektiv, 1989; RNDr. Dvořák; pplk. MUDr. Truska; Ing. Keller, 2019; The American Society for Nondestructive Testing, Inc., 2012).

Obrázek 1 - Odhalení a změření rozměru trhliny nepřímou vizuální NDT pomocí videoskopu



Zdroj: Vlastní zpracování





Dále se metody NDT v provozním procesu využívají pro analýzu pracovních cyklů celých strojních zařízení či jejich částí (viz obrázek 2). U strojních zařízení se monitorují a vyhodnocují odchylky výkonových a provozních parametrů strojů, které jsou prvním indikátorem při narušení harmonické práce stroje. Tyto odchylky nejsou vždy ukazatelem poruchy strojního zařízení, ale mohou být následkem nevhodně provedeného technologického postupu montáže a ustavování pohonných částí stroje (viz obrázek 3).

**Obrázek 2 - Zkušební stolice proudového motoru 4. generace**

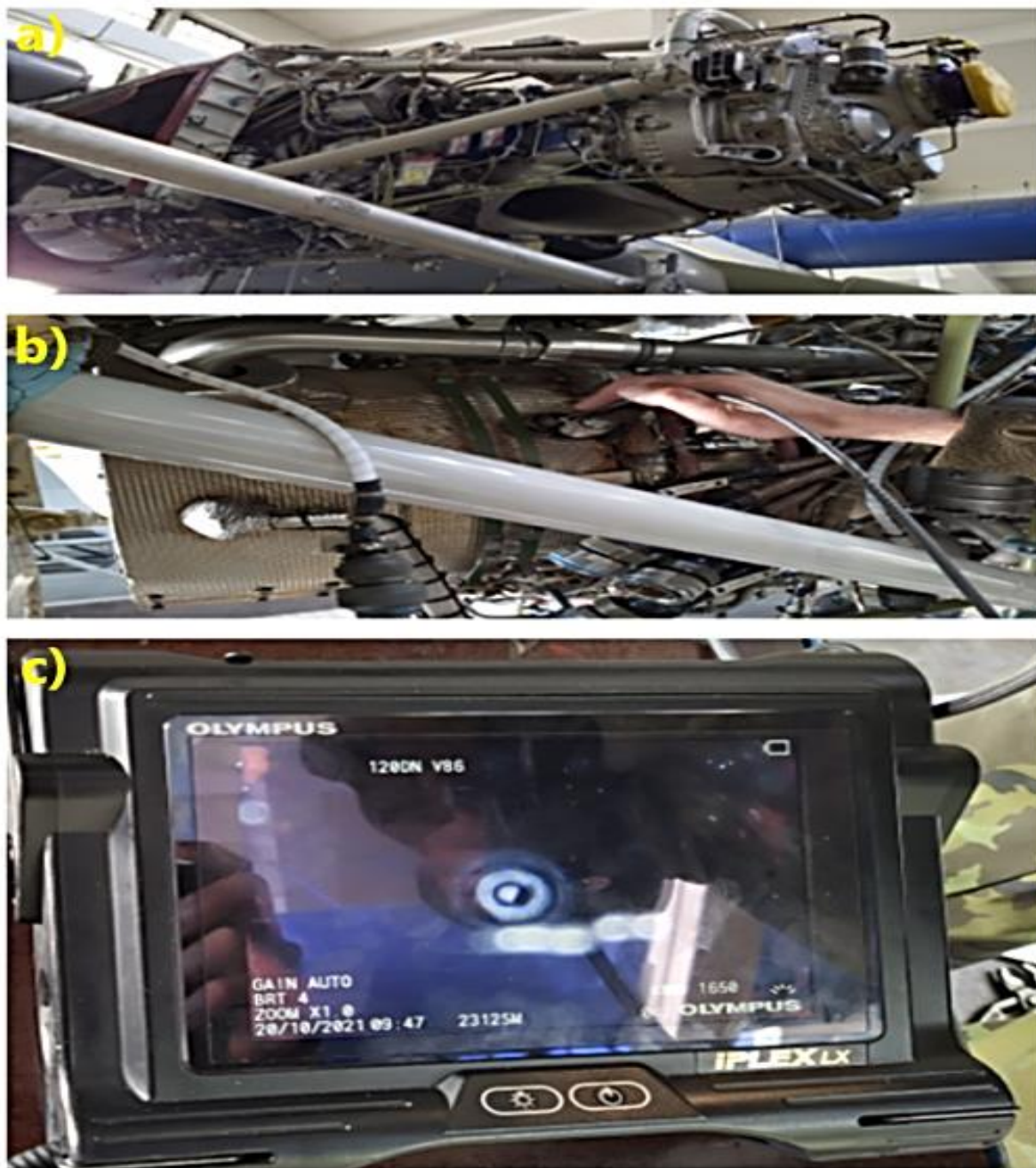


*Poznámka: prováděna technická diagnostika výkonnostních parametrů společně s měřením vibrací, které zatěžují závěsy motorové gondoly. Hodnota vibrací by měla v průběhu zkoušky odpovídat příslušnému výkonu motoru.*

Zdroj: Vlastní zpracování



Obrázek 3 - Vizualní metoda NDT spalovacích prostorů Turbovrtulového motoru po provedené montáži



- a) *Turbovrtulový motor v příhradovém trubkovém zavěšení, po demontáži motorové gondoly*
- b) *Revizní otvor pro sondu videoskopu*
- c) *Snímek z displeje videoskopu při prováděné vizuální kontrole jednotlivých sektorů spalovacích prostorů*

Zdroj: Vlastní zpracování

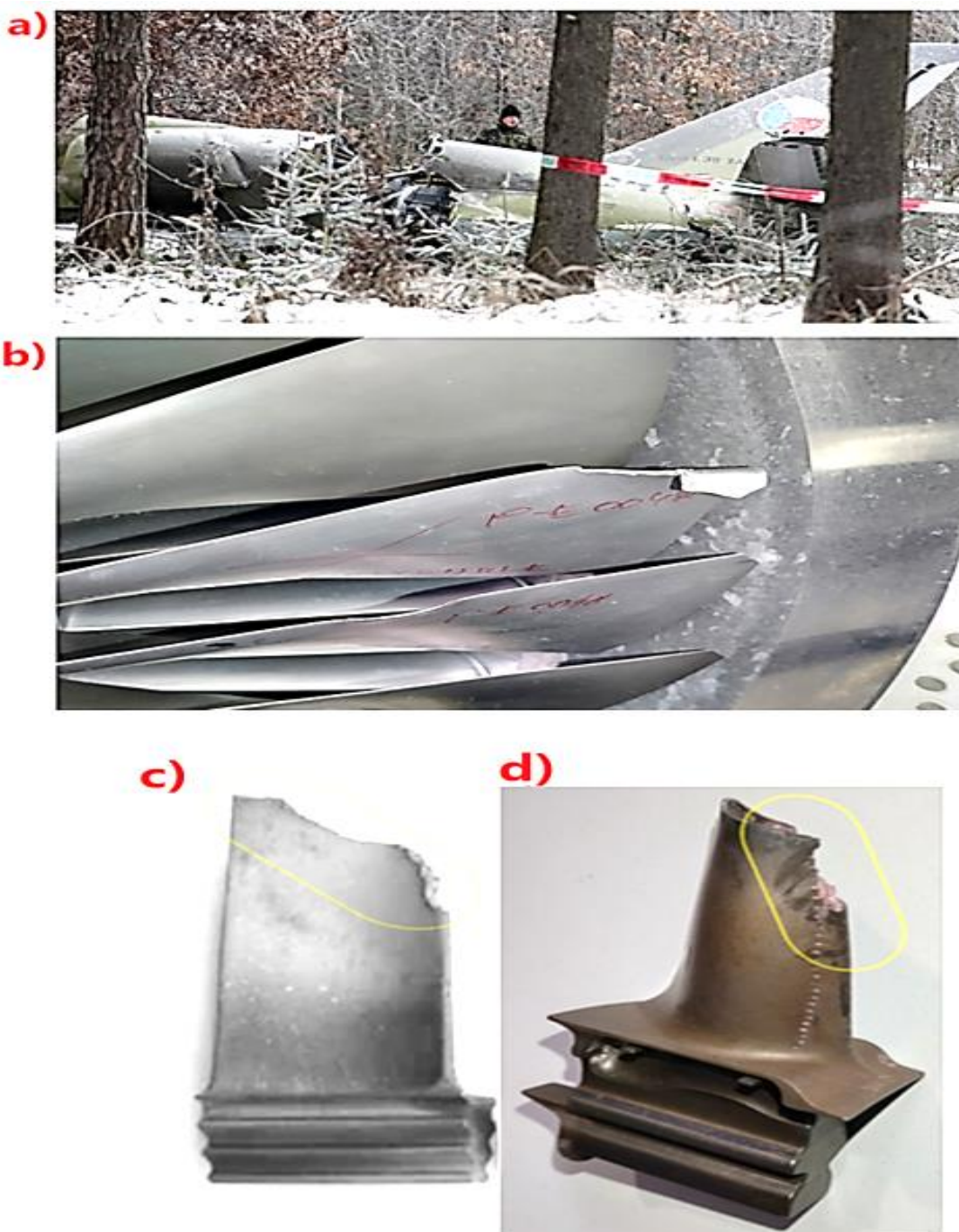




Nejčastějším fyzikálním projevem změny parametrů u strojů vykonávaných rotační a přímočaré pohyby jsou sílící vibrace (*viz obrázek 4a*). Pravidelné monitorování a vyhodnocování vibrací vede ke včasnému odhalení závažných poruch stroje (*viz obrázek 4 b, c, d*), které se v závislosti na čase exponenciálně umocňují a vytváří tak další doprovodné poruchy. Nejčastějšími poruchami jsou torzní kmity hřídelí přenášejí silové momenty vlivem provozního přetížení a poklesu tuhosti soustavy. Na základě vyhodnocení výsledků defektoskopické zkoušky a aktuálního výkonového stavu stroje lze velmi přesně diagnostikovat aktuální technický stav a prognózovat jeho možný budoucí vývoj (*viz Příloha 1 – Technická diagnostika prováděná na letecké technice*) (Doc. Ing. Neštrák, CSc. Ing. Pila Ph.D., 2006; Luis San Andres, 2019; Prof. Eng. Anton Panda, PhD, 2021; Bisgrove, P., 2001; Ing. Viktor Žárský, 2019).



Obrázek 4 - Příčiny a následky provozního přetížení strojů



- a) Pád proudového letounu L-39 Albatros s proudovým motorem typu AI 25 TL. Tento motor byl konstruován pro dopravní letoun Jak – 40, u kterého se neočekává vlivem manévru silné násobky přetížení. Torzní kmity hnané hřídele způsobily u L-39 Albatros přídření rotorového věnce do statoru, což způsobilo titanový požár.
- b) Poškozená kompresorová lopatka nízkotlakého stupně, odhaleno videoskopem



c) *Poškozená kompresorová lopatka vysokotlakého stupně, odhaleno videoskopem*

d) *Poškozená turbínová lopatka vysokotlakého stupně, odhaleno videoskopem*

Zdroj: Vlastní zpracování + [https://www.lidovky.cz/ceska-pozice/kdo-zavinil-pad-cvicneho-bitevniku-l-39.A110627\\_042515\\_pozice\\_21659](https://www.lidovky.cz/ceska-pozice/kdo-zavinil-pad-cvicneho-bitevniku-l-39.A110627_042515_pozice_21659)

## 1.1 Popis metod NDT

Nedestruktivní defektoskopie je interdisciplinární obor, který umožňuje prostřednictvím fyzikálně chemických reakcí jednotlivých defektoskopických zkoušek průkazně odhalit a identifikovat povrchové a podpovrchové vady materiálu. Tyto vady jsou pro pouhé lidské oko nezaznamatelné. Z hlediska bezpečnosti provozu strojního celku, se nedestruktivní defektoskopie především zaměřuje na hledání vad, které snižují pevnost daného tělesa v tahu. Takovéto vady mají významný negativní vrubový účinek a zeslabují tak nosný průřez daného materiálu (*viz Příloha 2 – Obecné rozdělení metod NDT a jejich podmínky realizace*)(Pawel Berczynski, 2014; Václav Legát a kol., 2016; B. Atzori, G. Meneghetti, 2012; Mirco Peron, 2018).

### 1.1.1 Popis ultrazvukové defektoskopie – praktický příklad využití v letectví

Ultrazvuková defektoskopie je metoda nedestruktivního testování kovových a nekovových materiálů, prostřednictvím iniciovaných mechanicky kmitajících částic hmotového prostředí, jejichž frekvence kmitavého pohybu je vyšší nežli 20kHz. Pro ultrazvukovou diagnostiku se využívá ultrazvuk pasivní. Pasivní ultrazvuk na rozdíl od ultrazvuku aktivního, který se využívá v technické praxi pro ultrazvukové čištění a svařování, vykazuje minimální odchylky kmitajících částic s malou amplitudou. Tento harmonický pohyb kmitajících hmotových částic je pospán sinusovým průběhem a vlnovou rovnicí (*viz rovnice 1*) (*viz Příloha 3 – Historický vývoj ultrazvukové defektoskopie, fyzikální podstata a příklady jejího využití*).



## Rovnice 1 - Vlnová rovnice

### Parciální derivace vlnové rovnice

$$\frac{\partial^2 a}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 a}{\partial x^2}$$

*Vlnová rovnice v partikulárním tvaru pro rovinou vlnu harmonického pohybu  
hmotových částic*

$$a = A \sin \omega \left( t - \frac{x}{c} \right)$$

*a* – derivace okamžité výchylky [m]

*c* – rychlost šíření vlny [m s<sup>-1</sup>]

*t* – doba průchodu vlny [s]

*x* – souřadnice polohy (dráhy) [m]

*A* – amplituda výchylky [m]

$\omega = 2\pi f$  – kruhová frekvence [rad s<sup>-1</sup>]

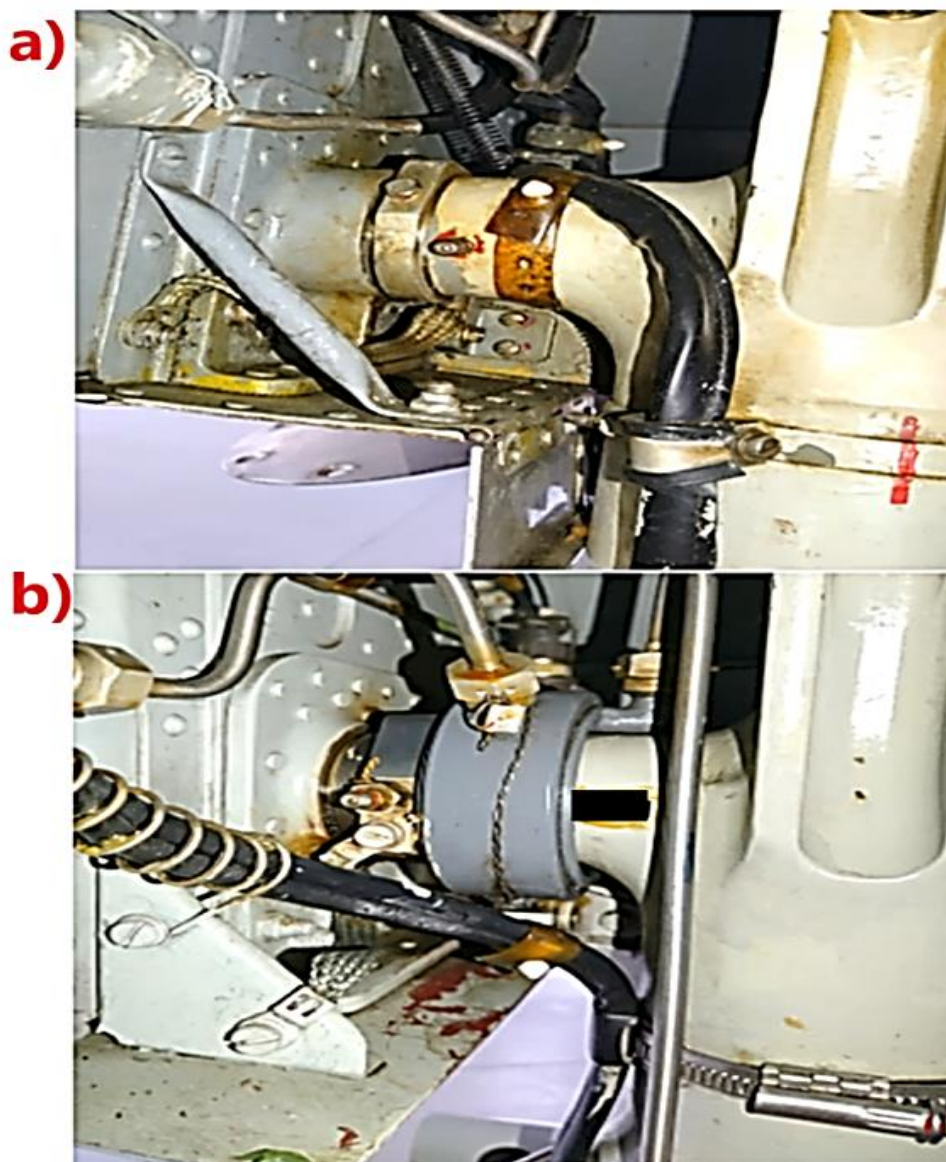
Zdroj: (Obraz, 1984, s. 42)

Při provozní údržbě letecké techniky z vrstvených materiálů, se využívá široká škála defektoskopických zkoušek. Použití vhodné metody nedestruktivní defektoskopie určují příslušné normy a přístupnost daného kontrolovaného dílu letadla. Mnoho metod nedestruktivního testování má víceúčelové fyzikální vlastnosti, ty umožňují s určitou pravděpodobností odhalit defekt kontrolovaného materiálu. Tato pravděpodobnost úspěšné diagnostiky u částí letecké techniky je výrazně potlačena tím, že je letadlo převážně konstruováno z kovových, nekovových a současně kompozitních vrstvených materiálů tvořící jeden celek, jehož povrchová vrstva je ošetřena nátěrovými antistatickými systémy. Ultrazvuková defektoskopie, jako jediná metoda nedestruktivního testování, umožňuje při vhodném nastavení defektoskopického přístroje, provádět defektoskopickou kontrolu všech obtížně přístupných (viz obrázek 5) a silně namáhaných částí letadla (viz obrázek 6). Díky



výrobní či provozní dokumentaci, je defektoskopický pracovník schopný nakonfigurovat ultrazvukový defektoskop na základě známé tloušťky stěny kontrolovaného materiálu a jeho povrchového nátěru. Při ultrazvukové defektoskopii starších strojů se hodnota tloušťky povrchového nátěru upraví na základě změření aktuální tloušťky nátěru pomocí magnetického tloušťkoměru laku (*viz – Příloha 4 – Praktický příklad využití ultrazvukové defektoskopie v letectví*).

**Obrázek 5 - Obtížně kontrolovatelné a silně namáhané kování závěsu stojiny příďového kola letadla ABC v generačních obměnách**



a) *Konstrukční uspořádání stojiny příďového kola letadla ABC 2. generace. Kování v průběhu svého technického životního cyklu nevykazovalo abnormální míru přetížení vlivem provozního užívání*



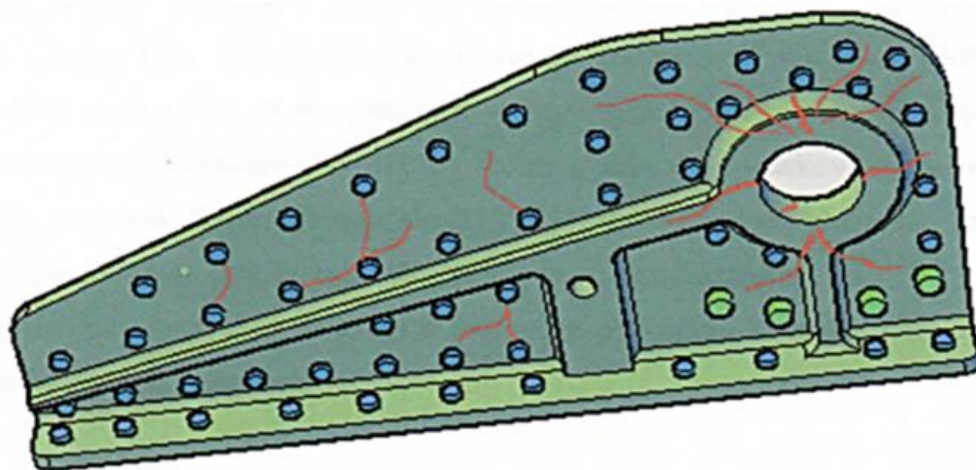


b) Konstrukční uspořádání stojiny předového kola letadla ABC 3. generace. Kování v průběhu svého technického životního cyklu vykazuje abnormální míru přetížení vlivem provozního užívání

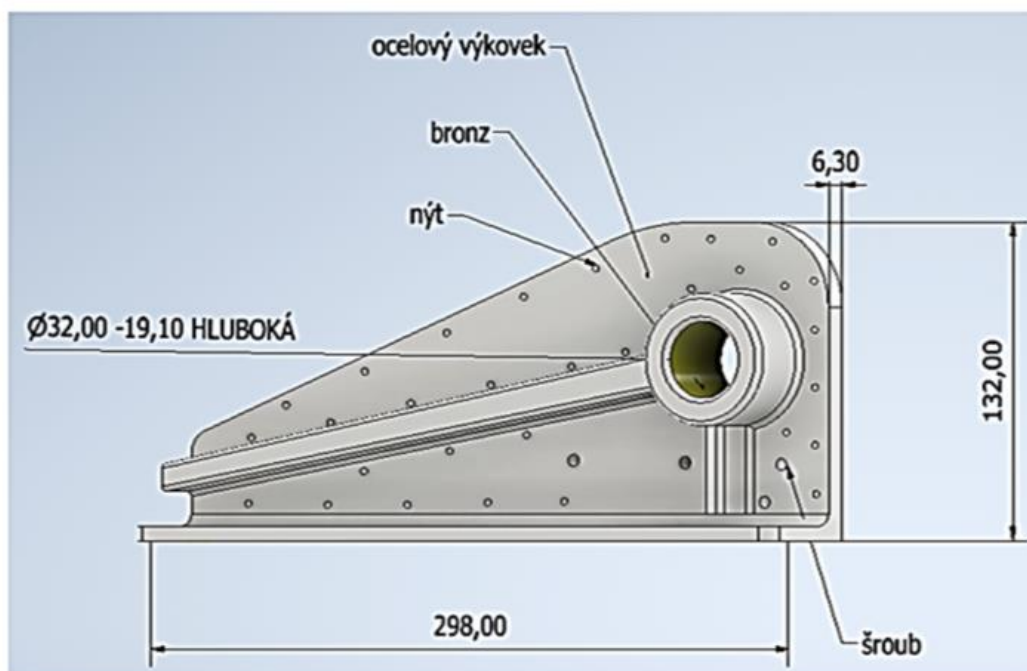
Zdroj: Vlastní zpracování

Obrázek 6 - Zatížení výkovek závěsu stojiny předového kola

a)



b)



a) Obecný orientační model výkovku zpracovaný firmou ABC v CAD programu znázorňuje předpokládaný výskyt defektů

Vodorovná rovina zesílené kruhové části – vady začínají z vnitřní strany

Svislá rovina zesílené kruhové části – vady začínají z vnější části



## *Vady kdekoliv v ploše výkovku – únava materiálu*

### b) Model výkovku zpracovaný v Inventoru

*Poznámka autora: vylučuje se jakákoliv podobnost těchto modelů výkovku s reálnou součástí letadla.*

Zdroj: Vlastní zpracování Inventor + Výpočtová zpráva o posouzení namáhání

### **1.1.2 Popis defektoskopie vířivých proudů – praktický příklad využití v letectví**

Metoda nedestruktivní defektoskopie vířivých proudů neboli *Eddy Current Testing* je metoda, jejíž fyzikální podstata je založena na hodnotě elektromagnetické indukce a elektrické vodivosti testovaného materiálu. Konkrétní veličiny ovlivňující hodnotu vířivých proudů jsou Impedance cívky defektoskopické sondy, permitivita a permeabilita testovaného materiálu. *Vlastnosti makroskopického elektromagnetického pole se tak podařilo nakonec shrnout do čtyř obecně platných fyzikálních zákonů. Jsou jimi zákon Gaussův, zákon Ampérův zobecněný na případ celkového, nestacionárního proudu, Faradayův zákon elektromagnetické indukce a zákon o neexistenci magnetických nábojů* (Sedlák, 2012 str.312). Princip vířivých proudů je možné vyjádřit Maxwellovými rovnicemi (*viz rovnice 2*) (Sedlák, 2012).



## Rovnice 2 - Maxwellovy rovnice

*Gaussův zákon hustoty volných nábojů*

$$\oint_S D * dS = Q$$

*Ampérův zákon pro nestacionární magnetické pole*

$$e \oint_l H * dl = I + \int_S \frac{\partial D}{\partial t} * dS$$

*Faradayův zákon elektromagnetické indukce pro nestacionární elektrické pole uzavřené křivky*

$$\oint_l E * dl = - \int_S \frac{\partial B}{\partial t} * dS$$

*Zákon o neexistenci magnetických nábojů ve stacionárním případě*

$$\oint_S B * dS = 0$$

*Druhá série Maxwellovy rovnice pro vlastnost vektoru elektrické indukce*

$$\operatorname{div} D = \rho$$

*Druhá série Maxwellovy rovnice pro vlastnost vektoru intenzity magnetického pole*

$$\operatorname{rot} H = j + \frac{\partial D}{\partial t}$$

*Druhá série Maxwellovy rovnice pro vlastnost vektoru intenzity elektrického pole*

$$\operatorname{rot} E = - \frac{\partial B}{\partial t}$$

*Druhá série Maxwellovy rovnice pro vlastnost vektoru magnetické indukce*

$$\operatorname{div} B = 0$$

*E – vektor intenzity elektrického pole [-]*

*B – vektor magnetické indukce [-]*

*D – vektor elektrické indukce [-]*

*H – vektor intenzity magnetického pole [-]*

*l – délka libovolné nehybné uzavřené křivky vůči pozorovací soustavě souřadnic [m]*





$S$  – libovolná plocha ohraničená křivkou „ $l$ “ [ $m^2$ ]

$t$  – časový interval přenesení elektrického náboje [ $s$ ]

$Q$  – náboj částice v časově proměnném magnetickém poli [ $C$ ]

$\rho$  – objemová hustota volných nábojů [ $A\ m^{-2}$ ]

$j$  – hustota volných proudů [ $A\ m^{-1}$ ]

Zdroj:(Sedlák, 2012)

Metoda vířivoproudé defektoskopie nevyžaduje přímý bezprostřední dotyk vysílací plochy sondy s testovaným materiálem. Vířivé proudy, jejichž principem vzniku je elektromagnetická indukce generovaná střídavým proudem budící cívky, umožňují provádět v porovnání s ostatními metodami nedestruktivní defektoskopie vysokorychlostní bezkontaktní kontrolu zkoušeného materiálu (*viz Příloha 5 – Historický vývoj a fyzikální podstata metody vířivých proudů*). Metoda ndt vířivých proudů se v závislosti na frekvenci vířivých proudů a druhu testovaného materiálu, využívá pro kontrolu povrchových a lehce podpovrchových vad (*viz Příloha 6 – Praktická ukázka využití vířivých proudů ke kontrole kolejnic, Státní Správa železnic*), pro strukturoskopii testovaných materiálů na základě jejich elektrické permitivity a magnetické permeability. Ve výrobním procesu je metoda vířivých proudů využívána, jako mezioperační kontrola pro testování vnitřního pnutí tepelně ovlivněných částí odlitků a svařenců. Negativní vnitřní pnutí svařenců a odlitků je způsobené neusměrněným chladnutím jejich tepelně ovlivněných oblastí. V provozu se metoda vířivých proudů využívá především pro defektoskopické kontroly povrchových trhlin namáhaných částí stroje (*viz Příloha 7 – Praktický příklad využití defektoskopické metody vířivých proudů v letectví*).

## 1.2 Popis sledovaných objektů a jejich závad

Objektem pro porovnávací měření ultrazvukové defektoskopie a defektoskopie vířivých proudů, byl zvolen vrtulový list (*viz obrázek 7*) z levotočivého vrtulového disku (*viz obrázek 8*) turbovrtulového letounu An – 24 V (*viz obrázek 9*). Letoun An – 24 V je produktem ruské letecké společnosti Aeroflot, který byl vyroben v základní



verzi s označení An – 24 v roce 1959. Tento letoun byl vyroben na základě specifických požadavků firmy Aerofolt, ta kladla velký důraz na spolehlivost a robustnost tohoto dopravního letadla, které mělo být schopné zajišťovat leteckou přepravu nákladu pod taktickým námětem. Letoun byl osazený dvěma propulzními jednotkami motoru Ivčenko Al – 24 T s výkonem jednoho motoru 2 103 kW. Hmotnost nenaloženého letadla je 14 060 kg a jeho maximální dovolená vzletová hmotnost s nákladem činí 21 800 kg (npor. Ing. Suchý a kpt. Ing. Tuček, 1984).

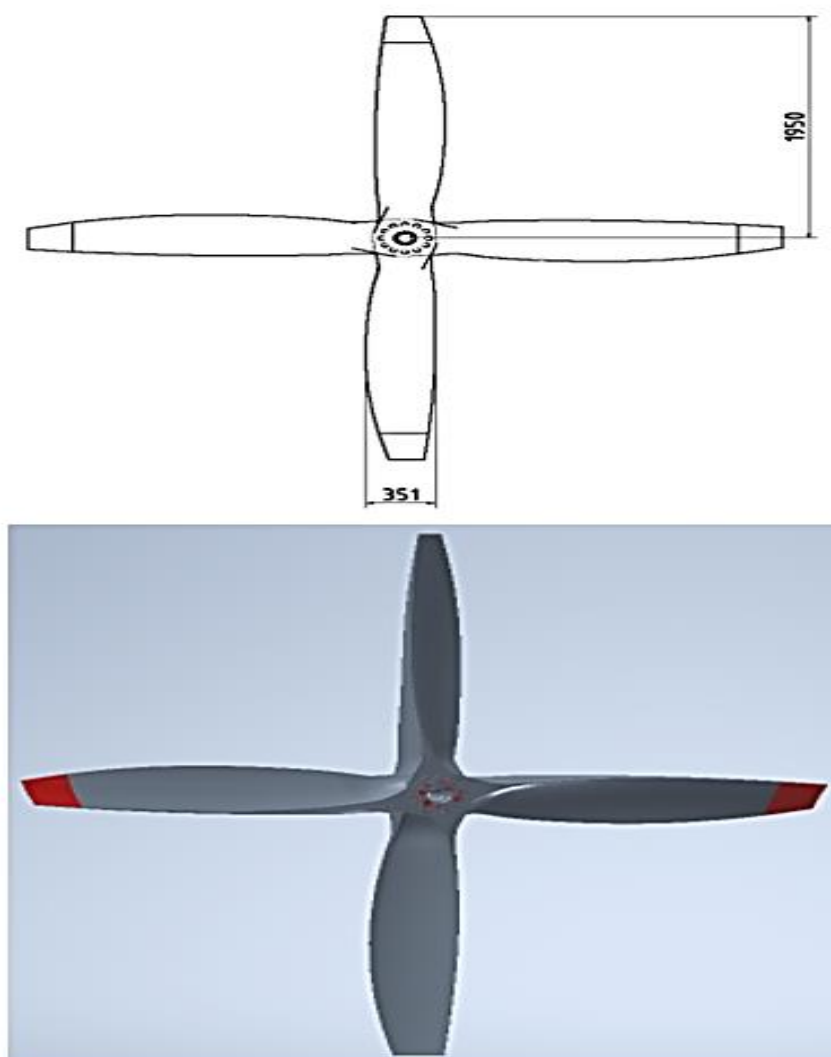
Obrázek 7 - Etalonový list



Zdroj: Vlastní zpracování



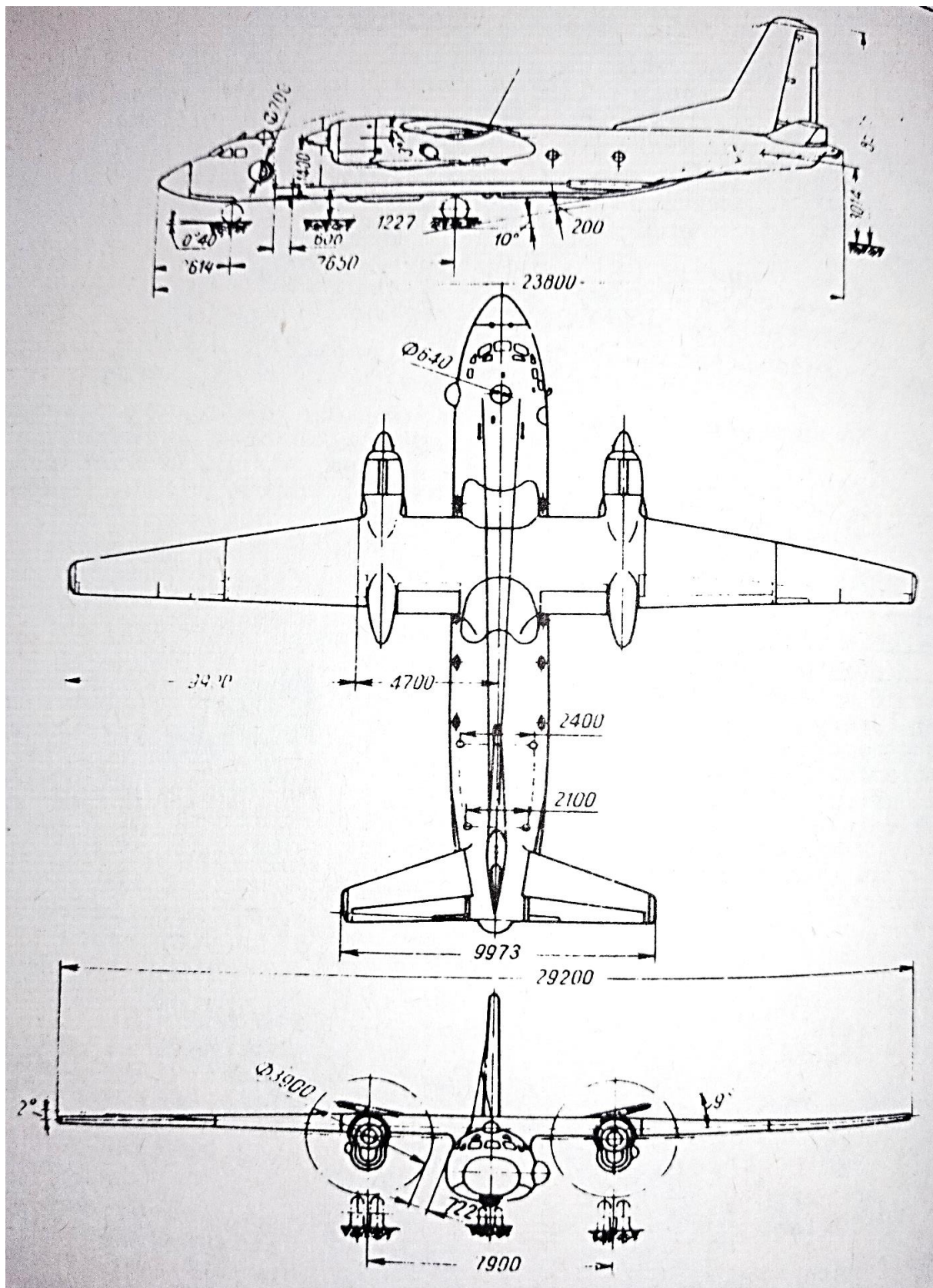
Obrázek 8 - Vrtulový disk typu AV - 72 RU



Zdroj: Vlastní zpracování Inventor



Obrázek 9 - Letoun An - 24 V

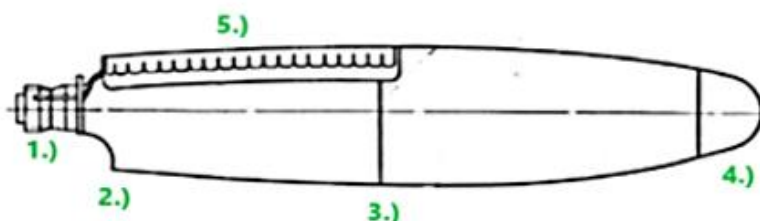


Zdroj: (npor. Ing. Suchý a kpt. Ing. Tuček, 1984)



Z důvodu velkého provozního namáhání vrtulových listů vrtule AV – 72 RU (viz obrázek 10), byl vytvořen na žádost Vzdušných sil kontrolní etalon tohoto vrtulového listu. Ten sloužil jako učební pomůcka pro defektoskopické týmy leteckého personálu a pro ideální kalibraci ultrazvukového defektoskopu pro kontrolu vrtule AV – 72 RU letadla Antonov An – 24 V/ 26. Etalon vrtulového listu byl vyroben třískovým oddělením špičky a střední části listu od jeho kořenové části v místě před odmrazovacím odporovým systémem. Následně byl na povrchu v kořenové části vrtulového listu vytvořen panem Ing. Richardem Regazzem, CSc. soubor umělých vad. Oblast umělých vad kořenové části vrtulového listu byla následně podstoupena sériím ultrazvukového testování a měření. Z výsledků defektoskopických zkoušek byla vytvořena panem Regazzo průvodní zpráva o umělých vadách etalonu. Bohužel, po vyřazení posledního letadla Antonov An – 24V v roce 2005, byla tato zpráva o umělých vadách na etalonu vrtulového listu armádou účelně zničena (CCCP, 1975).

Obrázek 10 - Jednotlivé části vrtulového listu



- 1.) Šroubovitě uložení vrtulového listu
- 2.) Kořenová část vrtulového listu
- 3.) Střední část vrtulového listu
- 4.) Špička vrtulového listu
- 5.) Odmrazovací systém

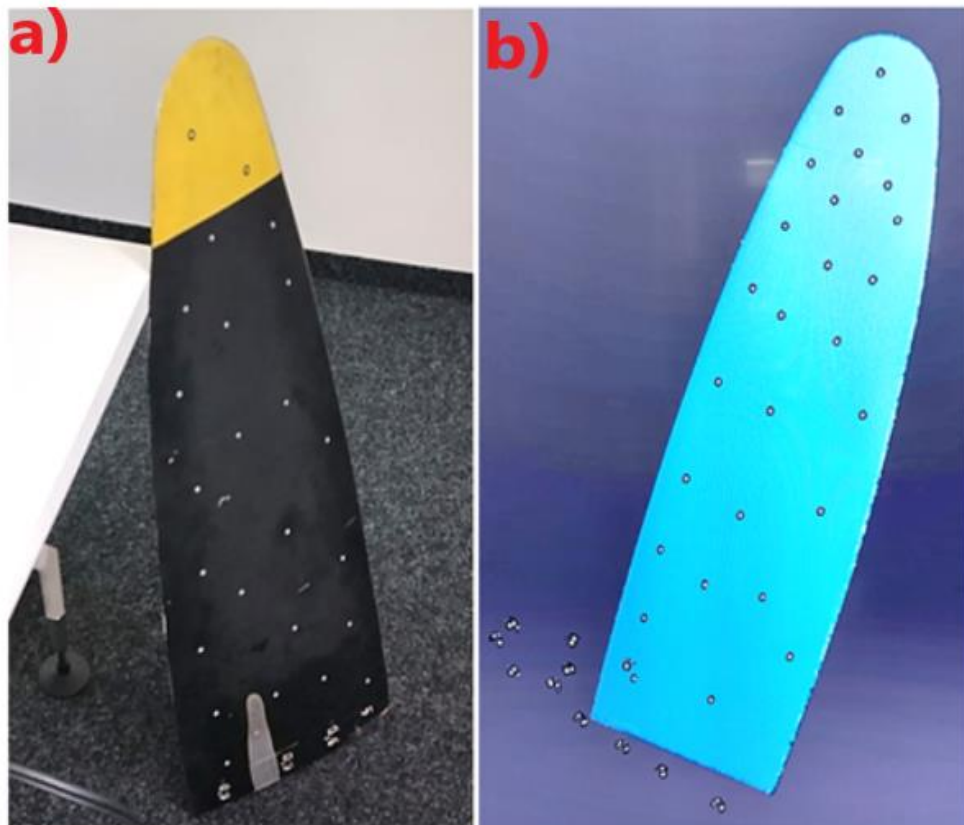
Zdroj: (CCCP, 1975)





V současné době neexistuje pro etalon vrtulového listu žádný druh dokumentace či technické zprávy, který by jednoznačně definoval jeho rozměry. Veškeré provozní dokumentace k letecké vrtuli Av – 72 RU jsou uloženy v archivu leteckého historického muzea – Kbely. Díky součinnosti s leteckým historickým muzeem byl nalezen provozní dokument Vrtulová kniha a Reduktorová kniha. Ani jedna z provozních dokumentací neobsahuje relevantní rozměry vrtule, které by bylo možné použít, jako náhradní rozměr etalonového listu. Kvůli získání základních rozměrů etalonu (*viz Příloha 8 – Proces laserové metrologie etalonového listu firmou 3D Wiser*) a vzhledem k jeho geometrické složitosti aerodynamického zkroucení, bylo využito služeb laserové metrologie firmou 3D Wiser (*viz obrázek 11*).

**Obrázek 11 - Laserové skenování etalonového listu**



*a) Skenovaný etalonový list*

*b) Modulace souřadnicových rozměrů budoucího modelu STL*

Zdroj: Vlastní zpracování



Účelem laserového skenování defektoskopicky kontrolovaného etalonu, bylo zjistit základní rozměry této extrahované části z vrtule AV – 72 RU. Znalost a úplnost těchto rozměrů, nijak neovlivňuje samotné defektoskopické zkoušení prováděné na etalonu. Defektoskopické přístroje byly v průběhu defektoskopických zkoušek etalonu kalibrovány podle základních podmínek určených výrobcem, a to bez potřeby znalosti skutečné tloušťky etalonu. Geometrická složitost aerodynamického zkroucení etalonu, neumožňovala pracovníkovi firmy 3D Wiseru provést vyhodnocení naměřených souřadnic z laserového skenování a určit tak základní rozměry etalonu. Tím je rozměr náběžné a odtokové hrany listu, rozměr tětiny a střední křivky profilu s její minimální a maximální tloušťkou.

Pro zvýšení přesnosti defektoskopického srovnávacího měření, bylo provedeno měření tloušťky nátěru (viz Příloha 9 – *Technické parametry magnetického tloušťkoměru laku PCE-CT28 a zdrojová data měřících pokusů*) v kořenové části etalonu (viz obrázek 10), kde se vyskytují umělé vady, a to pomocí magnetického tloušťkoměru laku PCE-CT28 (viz 12 obrázek).

**Obrázek 12 - Magnetický tloušťkoměr laku PCE-CT28**



Zdroj: Vlastní zpracování



Z důvodu nekonstantní tloušťky nátěru (*viz tabulka 1*) etalonového listu v místech defektoskopicky zkoumaných etalonových vad (*viz obrázek 7*) a silného tlumícího účinky, kterým nátěr působí na šíření indukovaných vířivých proudů (*viz obrázek 13*), byl proveden selektivní výběr umělé vady, která bude objektem pro defektoskopické srovnávací měření (*viz obrázek 14*).

**Tabulka 1 - Výsledky změřené tloušťky etalonového listu a jeho výrobní parametry**

<b>Statistický ukazatel naměřené tloušťky laku</b>	<b>Hodnota</b>
<b>Aritmetický průměr [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	142,56
<b>Průměrná odchylka [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	23,00
<b>MIN. [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	100
<b>MAX. [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	189
<b>Materiálová podstata etalonového listu</b>	černý lak EP-141
<b>Povrchový nátěr listu podle normy GOST</b>	
<b>Základní materiál listu podle normy GOST</b>	0356-02AU, 0356K-02AU a čistota zpracování nesmí být nižší než 7. třída jakosti podle GOST 2789-59.

Zdroj: Vlastní zpracování + (CCCP, 1975)





Obrázek 13 - Vyhodnocení tlumících účinků nátěru etalonového listu na indukci vířivých proudů sondy typu MP.060-60BL



a) Umělá vada hloubky 0,5 mm v místě nátěru na etalonovém listě

1.) Identifikovaná 1. hrana vady v pozici mimo nátěr

2.) Absolutní útlum vířivých proudů v pozici 2. hrany vady na nátěru

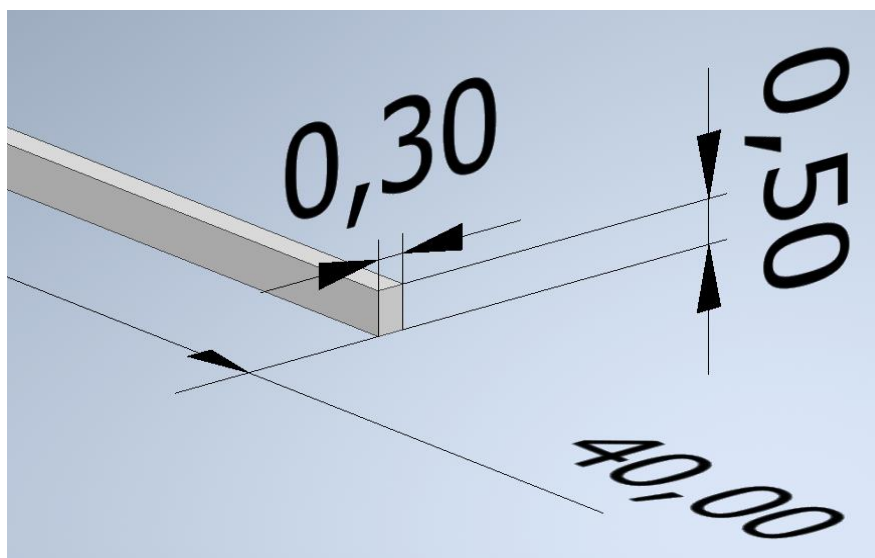
b) Sada měřících pokusů srovnávána ve funkci Waterfall po úpravě kalibrace snímání vady o hloubce 0,5 mm mimo nátěr

Zdroj: Vlastní zpracování



Z vytvořených umělých vad na etalonovém listě byla pro potřeby srovnávacího defektoskopického měření, zvolena vada o hodnotě hloubky 0,5 mm v odbarvené části etalonu. Důvodem tohoto výběru byl silný tlumící účinek laku na indukci vířivých proudů (viz obrázek 13). Vady v místě nátěru o hloubce 5 – 0,6 – 0,5 a 0,3 mm nebyly předmětem srovnávacího měření (viz obrázek 7), i přestože nebyl při ultrazvukové defektoskopii žádný tlumící účinek zaznamenán. Z důvodu zvýšení přesnosti kvalitativního defektoskopického měření, byla provedena panem Ing. Pavlem Prosem ultrazvukové měření za účelem získání základních rozměrů defektoskopicky zkoumané vady, jejíž hodnoty jsou 0,3 x 0,5 x 40 mm (viz obrázek 14).

**Obrázek 14 - Skica ultrazvukově zjištěných rozměrů defektoskopicky zkoumané vady**



Zdroj: Vlastní zpracování + Inventor



## 2 Cíl práce

Obecným cílem diplomové práce je porovnat vhodnost využití ultrazvukové defektoskopické metody vůči metodě vířivých proudů pro defektoskopické zkoušení povrchových vad v leteckém provozu 24. základny dopravního letectva ve Kbelích. Obecného cíle bude dosaženo prostřednictvím dílčích cílů:

- teoretický rozbor dosavadních poznatků a praktické využití ultrazvukové metody a metody vířivých proudů NDT na uživatelské úrovni,
- doplňkové měření rušivého vlivu hlukové expozice v průběhu srovnávacího defektoskopického měření,
- doplňkové měření rušivého vlivu působící teploty na pracovišti v průběhu srovnávacího defektoskopického měření,
- kvalitativní defektoskopické měření umělé vady etalonu pomocí ultrazvukové defektoskopie,
- kvalitativní defektoskopické měření umělé vady etalonu pomocí defektoskopie vířivých proudů.



### 3 Metodika práce

**Teoretického rozboru a praktického využití** ultrazvukové defektoskopie a defektoskopie vířivých proudů na uživatelské úrovni bude dosaženo školením ve firmě R&R NDT u pana Ing. Pavla Prosa a 24. základny dopravního letectva ve Kbelích. Následně absolvovanými konzultacemi s Czech Airlines Technics s panem Tomášem Příbylem – Kontrolor letadel senior NDT a v Leteckých opravárnách Malešice – LOM PRAHA

**Doplňkového měření rušivého vlivu hlukové expozice** na průběh srovnávacího defektoskopického měření bude dosaženo snímáním hodnoty hluku na pracovišti pomocí Hlukoměru Testo 816–1. Hodnota hluku bude snímána pouze jednou za měřicí operaci u každé defektoskopické metody. Jedna měřicí operace je složena z pěti měřících pokusů při využití pěti druhů snímacích sond dané defektoskopické metody.

**Doplňkového měření rušivého vlivu působící teploty** na průběh srovnávacího defektoskopického měření bude dosaženo snímáním teploty povrchu testovaného etalonu pomocí Termovizní kamery BOSCH GTC 400 C. Hodnota teploty povrchu bude snímána pouze jednou za měřicí operaci u každé defektoskopické metody zvlášť. Jedna měřicí operace je složena z pěti měřících pokusů při využití pěti druhů snímacích sond dané defektoskopické metody.

**Ultrazvukového kvalitativního měření** bude dosaženo prováděním ultrazvukové defektoskopie vybrané vady etalonu pomocí defektoskopického měření s přístrojem USN 52R a s využitím pěti různých sond. Každou sondou bude provedeno padesát měřících pokusů.

**Vířivoproudého kvalitativního měření** bude dosaženo prováděním defektoskopie vířivých proudů na vybrané vadě etalonu pomocí defektoskopického měření s přístrojem NORTEC 500D a s využitím pěti různých sond. Každou sondou bude provedeno padesát měřících pokusů.

**Následně budou veškerá data zpracována a vyhodnocena pomocí statistických metod.**



## **4 Výsledky (realizace měření na zvolené součásti letadla, porovnání jednotlivých metod měření, statistické zpracování dat)**

### **4.1 Realizace měření na zvolené součásti letadla**

Celé výzkumné měření bylo uskutečněno v prostorách vojenského dopravního letiště Praha – Kbely. Pracoviště, na kterém bylo prováděno kvalitativní defektoskopické měření etalonového listu, se nachází v blízkosti přistávací ranveje, dílen a hangárů jejichž je součástí. Defektoskopické měření bylo časově uskutečněno při sezónním vytížení letiště, a to od června do října roku 2022.

#### **4.1.1 Realizace doplňkového měření hlukové expozice**

Hlukoměr Testo 816-1 (*viz tabulka 2*) byl použit k průběžnému snímání hladiny hlukové expozice. Snímání hlukové expozice bylo uskutečněno současně s defektoskopickým kvalitativním měřením a měřením povrchové teploty vybrané vady etalonového listu. Hlukoměr byl ustaven od měřeného etalonu ve vzdálenosti 50 cm (*viz obrázek 15*), která je doporučena výrobcem. Tato vzdálenost je opodstatněná nejen šířícím se zvukem, ale že i jakýkoliv náraz do těla hlukoměru či jeho bezprostředního okolí, způsobil vygenerování chybné hodnoty měřených decibelů.



Tabulka 2 - Technické parametry Hlukoměru Testo 816-1

Hlukoměr Testo 816 - 1	
Měřicí rozsah	od 30 do 130 dB
Frekvenční rozsah	od 20 Hz do 8 kHz
Přesnost měření	$\pm 1,4$ dB
Rozlišení	0,1 dB
Rychlost Měření	0,5 s
Rozlišení	0,1 dB
Interval měření	0,5 s
Dynamický rozsah	100 dB
Provozní teplota	od 0° do + 40°

Zdroj: Manuál pro obsluhu přístroje Hlukoměr Testo 816-1 (Testo , s.r.o. 0980  
8971/cz/01/2016)

Obrázek 15 - Ustanovení Hlukoměru Testo 816-1



- a) Ustanovení hlukoměru v pracovní vzdálenosti od defektoskopicky snímaného etalonu  
b) Hlukoměr Testo 816-1

Zdroj: Vlastní zpracování



Hlukoměru Testo 816–1 (*viz obrázek 15*) byl pro účely tohoto měření zapůjčen firmou Boels Rental. Přístroj měl platnou certifikaci, ale kalibrátor hluku nebyl součástí jeho příslušenství. Z tohoto důvodu nemohla být před samotným měřením provedena jeho kalibrace, která by zvýšila jeho přesnost měření. Hlukoměrem Testo 816–1 byl po zapnutí napájení interním zdrojem, nastaven tlačítkem MIN/ MAX na funkci zobrazování aktuální hodnoty od okamžiku zapnutí přístroje. Podle návodu pro obsluhu přístroje, byl tlačítkem A/ C aktivován režim současného snímání křivky A společně s křivkou C, čímž byl přístroj nastaven pro snímání hluku v celém frekvenčním rozsahu expozice hluku, který přístroj technicky umožňoval. Z důvodu předpokládaného ovlivnění ultrazvuku šířícím se hlukem, byla odečítána aktuální maximální hodnota, kterou přístroj díky funkci MAX indikoval v daný okamžik pro obě křivky frekvence jako nejvyšší. Naměřená hodnota akustické expozice byla z displeje hlukoměru odečítána současně s výsledkem defektoskopického kvalitativního měření. Displej hlukoměru byl umístěn v zorném poli obsluhy vykonávající defektoskopické měření (*viz Příloha 10 – Ovládací prvky Hlukoměru Testo 816–1, důvod snímání hlukové expozice a jeho předpokládaný vliv na průběh defektoskopie*).

#### **4.1.2 Realizace doplňkové měření teplotní závislosti**

Termovizní kamera byla pro účely tohoto měření zapůjčena firmou DEK trade. Tato termovizní kamera typu BOSCH GTC 400 C (*viz tabulka 3*) měla v době měření platnou revizi a před samotným měřením byla prováděna její kalibrace. Veškeré nastavení a kalibrace termovizní kamery bylo prováděno podle manuálu přístroje interaktivně, a to pouze pomocí ovládacích šipek, tlačítek, na těle přístroje.



Tabulka 3 - Technické parametry Termovizní kamery BOSCH GTC 400 C

Termovizní kamera BOSCH GTC 400 C	
Měřící rozsah	od - 10°C do + 400°C
Přesnost měření	±3,0 °C (*plus odchylna závislá na obsluze)
Teplotní citlivost NETD	< 50 mK
Rozlišení	0,1 °C
Velikost IČ senzoru	160x120 px
Počet měřících bodů	19200 ks
Zorné pole FOV	53x43°
Minimální ostřicí vzdálenost	0,3 m
Provozní teplota	od - 10°C do + 45°C

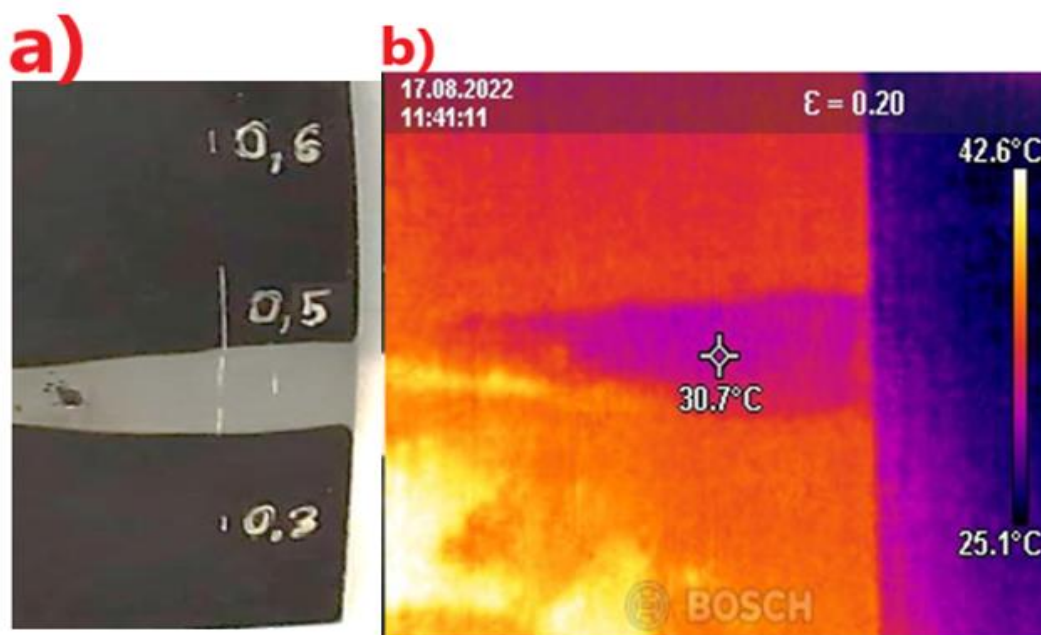
Zdroj: Vlastní zpracování + manuál pro obsluhu přístroje

V softwaru přístroje byla nastavena tabulková hodnota emisivity  $\varepsilon = 0,20$  pro lesklý povrch zoxidovaného hliníku. Kovově lesklý měřený povrch hliníkového etalonu nebyl nijak dodatečně začernován z důvodu snížení odrazivosti měřeného povrchu (viz obrázek 16). Tato hodnota emisivity odpovídá tabulkové hodnotě silně povrchu hliníku při jeho teplotě 93°C. Následně byla nastavena hodnota odražené teploty daného materiálu. Hodnota odražené teploty je důležitým parametrem pro zvýšení přesnosti měřené teploty u materiálů s vysokou odrazivostí a nízkou emisivitou. Hodnota odražené teploty podle manuálu výrobce termovizní kamery odpovídá teplotě okolního prostředí, která byla odečítána ze rtuťového teploměru na pracovišti.





Obrázek 16 - Měření povrchové teploty vybrané vady etalonu



a) Obrázek měřeného etalonu pořízený termovizní kamerou ze vzdálenosti 0,5m

b) Obrázek rozložení tepelných polí etalonu pořízený termovizní kamerou

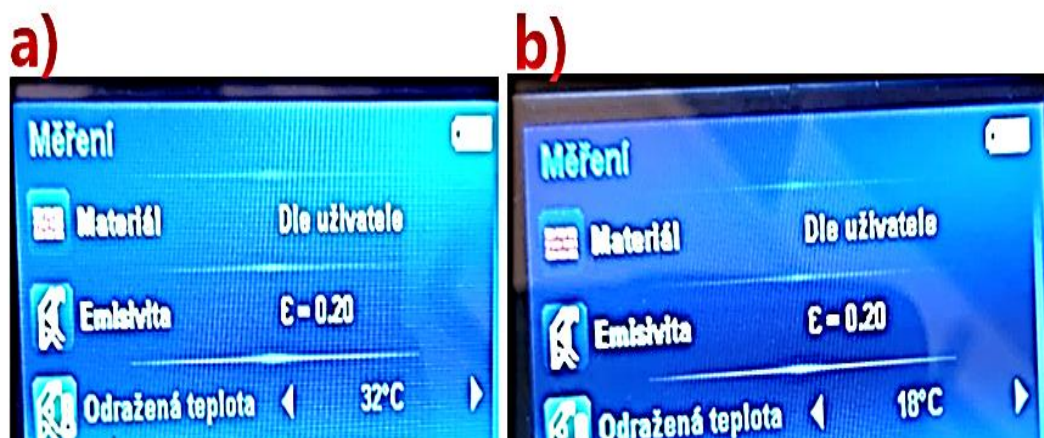
Měření bylo uskutečňováno ze vzdálenosti 0,5 m, čemuž odpovídá infračervená oblast tvořená ze 3 mm pixelů.

Zdroj: Vlastní zpracování

Průměrná délka trvání jedné defektoskopické metody byla 10 hodin. Hodnota odražené teploty (viz obrázek ) nebyla vzhledem k měnící se teplotě prostředí v závislosti na čase aktualizována. Tato hodnota byla nastavena před zahájením defektoskopického měření. Předpokládá se, že měnící se teplota bude ovlivňovat výsledek vířivoproudé defektoskopie (viz Příloha 11 – Tepelné podmínky na pracovišti a ovládací prvky na termovizní kameře).



Obrázek 17 - Nastavená hodnota odražené teploty



- a) Hodnota odražené teploty při vířivoproudé defektoskopii uskutečněné v srpnu 2022
- b) Hodnota odražené teploty při ultrazvukové defektoskopii uskutečněné v říjnu 2022

Zdroj: Vlastní zpracování

#### 4.1.3 Realizace kvalitativního defektoskopického měření vad etalonu pomocí ultrazvukové defektoskopie

Pro ultrazvukové měření etalonového listu (viz Příloha 12 – Teoretický rozbor a praktické využití defektoskopických metod na uživatelské úrovni, ultrazvukové školení), bylo využito ultrazvukového defektoskopu typu Krautkramer Branson USN 52R (viz tabulka 4). Tento defektoskopický přístroj (viz Příloha 13 – Obecný popis, ovládací prvky a architektura ultrazvukového defektoskopu Krautkramer Branson USN 52R) a použité sondy (viz Příloha 14 – Obrázky, schématické uspořádání a obecné parametry použitých ultrazvukových sond), byly za účelem ultrazvukového testování zapůjčeny Dopravním letectvem armády České republiky Praha – Kbely.



**Tabulka 4 - Technické parametry ultrazvukového přístroje USN 52 - R**

<b>ultrazvukový defektoskop EPSON USN 52 - R Krautkramer Branson</b>	
<b>rok výroby přístroje</b>	1999
<b>kalibrace podle normy</b>	DIN EN 61 010
<b>možné zdroje napájení</b>	síťový adaptér; výměnné baterie NiCd; výměnné baterie Alk
<b>možné připojovací konektory datových kabelů</b>	LEMO 0034; LEMO 900s; konektorem sondy BNC
<b>rozměr displeje</b>	146 mm x 67 mm (5,75" x 2,65")
<b>rozlíšení displeje</b>	552 x 256 pixelů
<b>frekvenční rozsah vysílání (šířka pásma)</b>	0,25 - 11 MHz
<b>uzamykací funkce</b>	ochrana proti neúmyslné změně nastavených hodnot
<b>funkce lupy</b>	zvětšení či zmenšení naměřených hodnot pro snadné čtení
<b>funkce operativní změny rychlosti ultrazvuku</b>	možnost rychlého přepínání nastavených hodnot rychlostí příčných a podélných ultrazvukových vln pro daný typ materiálu. Kapacita 90 uložených hodnot

Zdroj: Vlastní zpracování + (Epson, 2000)

Pro ultrazvukovou defektoskopii výzkumného měření byly použity ultrazvukové sondy MSEB4 (viz tabulka 5), MWB70-4 (viz tabulka 6), MWB60-4 (viz tabulka 7), MWB45-4 (viz tabulka 8) a MSW-QC (viz tabulka 9).



**Tabulka 5 - Technické parametry – sonda MSEB4**

<b>sonda MSEB 4</b>	
<b>Sonda</b>	kontaktní
<b>Akustický vysílací paprsek</b>	přímý
<b>Akustický měnič</b>	oddělený vysílací a přijímací
<b>Kód sondy</b>	57462
<b>Maximální frekvence měniče</b>	4 MHz
<b>Rozměr měniče [mm]</b>	3,5 * 10

Zdroj: (Krautkramer and Nutronik, 2008)

**Tabulka 6 - Technické parametry – sonda MWB 70-4**

<b>sonda MWB 70-4</b>	
<b>Sonda</b>	kontaktní
<b>Akustický vysílací paprsek</b>	pod úhlem 70°
<b>Akustický měnič</b>	sružený vysílací a přijímací
<b>Kód sondy</b>	56929
<b>Maximální frekvence měniče</b>	4 MHz
<b>Rozměr měniče [mm]</b>	8*9

Zdroj: (Krautkramer and Nutronik, 2008)



Tabulka 7 - Technické parametry – sonda MWB 60-4

<b>sonda MWB 60-4</b>	
<b>Sonda</b>	kontaktní
<b>Akustický vysílací paprsek</b>	pod úhlem 60°
<b>Akustický měnič</b>	sdužený vysílací a přijímací
<b>Kód sondy</b>	56928
<b>Maximální frekvence měniče</b>	4 MHz
<b>Rozměr měniče [mm]</b>	8*9

Zdroj: (Krautkramer and Nutronik, 2008)

Tabulka 8 - Technické parametry – sonda MWB 45-4

<b>sonda MWB 45-4</b>	
<b>Sonda</b>	kontaktní
<b>Akustický vysílací paprsek</b>	pod úhlem 45°
<b>Akustický měnič</b>	sdužený vysílací a přijímací
<b>Kód sondy</b>	56927
<b>Maximální frekvence měniče</b>	4 MHz
<b>Rozměr měniče [mm]</b>	8*9

Zdroj: (Krautkramer and Nutronik, 2008)



**Tabulka 9 - Technické parametry – sonda MSW – Quick Change**

sonda MSW - Quick Change	
<b>Sonda</b>	kontaktní
<b>Akustický vysílací paprsek</b>	pod úhlem 90°
<b>Akustický měnič</b>	sdružený vysílací a přijímací
<b>Kód sondy</b>	008RTB
<b>Maximální frekvence měniče</b>	25 MHz
<b>Průměr připojovacího konektoru [mm]</b>	6

Zdroj: (Krautkramer and Nutronik, 2008)

Z důvodu využití kontaktních ultrazvukových sond musela být použita optimální tloušťka akustické vazby s vhodnými vlastnostmi. Hodnota tloušťky vazebního prostředku mezi ultrazvukovou sondou a zkoušeným povrchem ovlivňuje reálnou schopnost prostupu šířících se ultrazvukových vln prostředím. Samotný poměr odražených a pohlcených ultrazvukových vln je výrazně ovlivněn chemickými vlastnostmi a skupenstvím použité akustické vazby. Z důvodu množství prováděných měřících pokusů a nevyžadované estetické podmínce kvality měřeného povrchu po aplikaci akustické vazby, byl jako akustický prostředek použit motorový olej typu SAE20 (viz tabulka 10) a jako optimální tloušťka vazebního prostředku  $d_v = 0,22$  mm (viz Příloha 15 – Typ akustické vazby, stanovení její tloušťky a její aplikování). Tento vazební prostředek byl zvolen na základě konzultací a zkušeností absolvovaných s panem Ing. Prosem.



Tabulka 10 - Technické parametry akustické vazby – Mogul special SAE 20W-30

Akustický prostředek - Mogul special SAE 20W-30	
Popis	celoroční motorový olej s inhibitory koroze a oxidace
Užití	mazání benzínových a naftových spalovacích motorů
Základový olej	Destilát (ropný) těžký hydrokrakovaný
Relativní hustota	885 kg/mm <sup>3</sup>
Kinematická viskozita při 100°C podle normy ČSN EN ISO 3104	12,3 mm <sup>2</sup> /s
Viskozitní index podle normy ČSN ISO 2909	122
Bod vzplanutí podle normy ČSN EN ISO 2592	220°C
Bod tekutosti podle normy ČSN ISO 3016	.-27°C
Teplota samovznícení	nad 350°C
Nebezpečné složky výrobku - Fosfordithiová kyselina, směsná O,O-bis(1,3-dimethylbutyl a izopropyl) estery, zinečnaté soli	0,498%
Nebezpečné složky výrobku -Fenol, dodecyl-, rozvětvený	0,023%
Hořlavost	4. třída nebezpečnosti

Zdroj:

[https://tescodocuments.com/files/Documents/docs/mogul\\_speci%C3%A1l\\_1\\_lit\\_20w-30\\_karta\\_bezpe%C4%8Dnostn%C3%BDch\\_%C3%BAajov\\_sk\\_v0.pdf](https://tescodocuments.com/files/Documents/docs/mogul_speci%C3%A1l_1_lit_20w-30_karta_bezpe%C4%8Dnostn%C3%BDch_%C3%BAajov_sk_v0.pdf)

Kalibrace (viz tabulka 11) defektoskopického přístroje USN52R byla provedena převážně podle pokynů stanovených výrobcem v příslušném manuálu pro obsluhu daného přístroje. Podstatou tohoto kvalitativního ultrazvukového měření je pouze identifikovat přítomnost vady v kontrolovaném etalonu, nikoliv lokalizovat její polohu. Z důvodu předpokládané silné hlukové expozice a proměnným teplotním podmínkám, nebyla v průběhu defektoskopického měření prováděna jakákoliv dodatečná subjektivní úprava nastavených parametrů defektoskopického přístroje, například z důvodu zvýraznění vadových signálů a potlačení šumu. Tato manuální úprava





měřících parametrů přístroje by mohla vést ke zhoršení přesnosti naměřených výsledků, a to mylným vyhodnocením šumu prostředí obsluhou přístroje.

**Tabulka 11 - Kalibrace defektoskopického přístroje USN52R**

<b>Kalibrace ultrazvukového defektoskopického přístroje USN 52R</b>				
<b>typ sondy</b>	<b>pracovní frekvence</b>	<b>rychlost vln</b>	<b>kalibrační měrka</b>	<b>tloušťka akustické vazby</b>
MSEB4 + předsádka 30 mm	4 MHz	6,32 km/s	Spárová kalibrační měrka z hliníkové slitiny typu 2024-T8XX vyrobená v souladu s normou ANSI/AWS, MIL-STD. Kalibrační metoda v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025 čl. 5 . 4.	SAE20 - 0,22 mm
MWB70-4	4 MHz	3,13 km/s	Úhlová kalibrační měrka typu K2 zhotovená z hliníkové slitiny typu 2024-T8XX v souladu s normou ANSI/AWS, ČSN EN ISO 7963, MIL-STD. Kalibrační metoda v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025 čl. 5 . 4., ČSN EN ISO 7963 pro K2	SAE20 - 0,22 mm
MWB60-4	4 MHz	3,13 km/s	Úhlová kalibrační měrka typu K2 zhotovená z hliníkové slitiny typu 2024-T8XX v souladu s normou ANSI/AWS, ČSN EN ISO 7963, MIL-STD. Kalibrační metoda v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025 čl. 5 . 4., ČSN EN ISO 7963 pro K2	SAE20 - 0,22 mm
MWB45-4	4 MHz	3,13 km/s	Úhlová kalibrační měrka typu K2 zhotovená z hliníkové slitiny typu 2024-T8XX v souladu s normou ANSI/AWS, ČSN EN ISO 7963, MIL-STD. Kalibrační metoda v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025 čl. 5 . 4., ČSN EN ISO 7963 pro K2	SAE20 - 0,22 mm
MSW-QC	25 MHz	2,9 km/s	Úhlová kalibrační měrka typu K2 zhotovená z hliníkové slitiny typu 2024-T8XX v souladu s normou ANSI/AWS, ČSN EN ISO 7963, MIL-STD. Kalibrační metoda v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025 čl. 5 . 4., ČSN EN ISO 7963 pro K2	SAE20 - 0,22 mm

Zdroj: (Epson, 2000; Richard a Marcela REGAZZOVÁ, 2013) + praxe

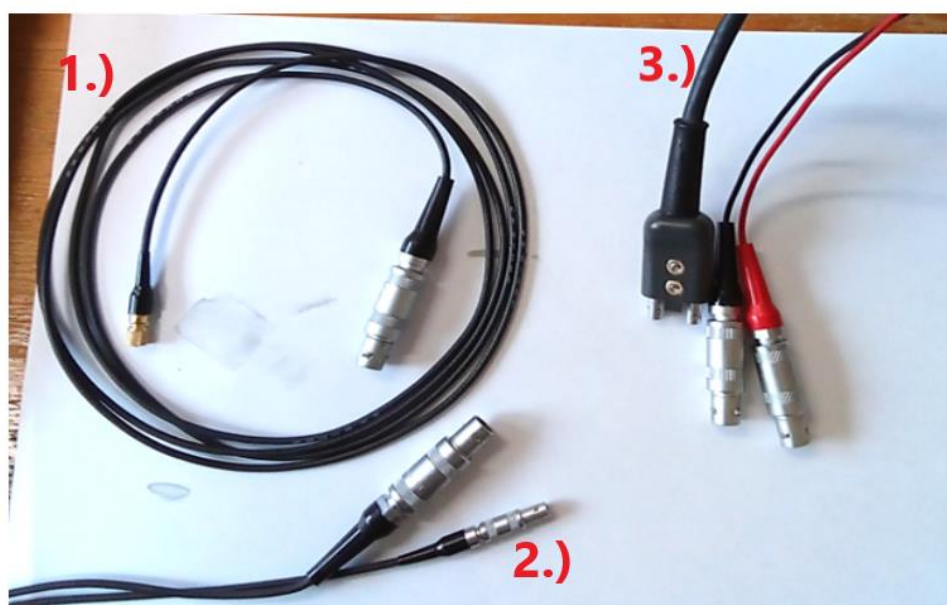
S ohledem na povahu kvalitativního ultrazvukového měření byla provedena kalibrace (viz Příloha – Obecný postup kalibrace ultrazvukového defektoskopického přístroje pro



potřeby kvalitativního měření na etalonovém listu) a nastavení pouze na základě stanovené hodnoty akustické vazby, rozsahu časové základny, rychlosti ultrazvukových vln a tloušťce – typu etalonu.

Následně byla zahájena příprava pro ultrazvukové měření na etalonovém listu. Podle druhu připojovacího datového konektoru příslušné sondy, byl použit její identický datový kabel (viz obrázek 18). Dále byl nanesen na testovaný povrch listového etalonu vazební prostředek, jehož tloušťka byla následně upravena. Hlukoměr Testo 816–1 byl umístěn a zprovozněn ve vzdálenosti 50 cm od měřeného etalonu. Snímání hlukové expozice bylo prováděno po celou dobu ultrazvukového měření. Po předem provedené kalibraci a nastavení hodnoty emisivity a teploty odrazu, byla termovizní kamera umístěna na dosah od pracovníka obsluhy ultrazvukového defektoskopu.

Obrázek 18 - Datové kabely použitých sond



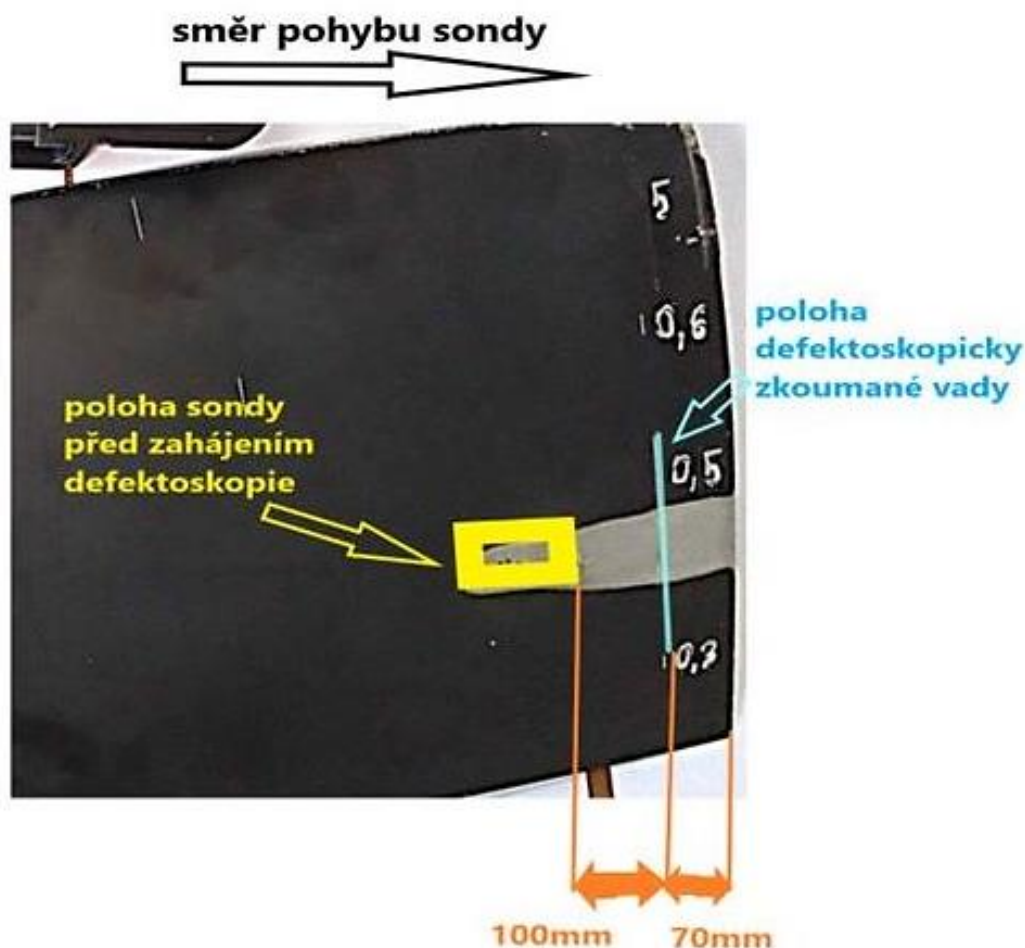
- 1.) Datový kabel typu BNC pro sondu MSW-QC
- 2.) Datový kabel typu LEMO-1 pro sondy MWB70-4, MWB60-4, MWB45-4
- 3.) Datový kabel typu LEMO-00 Dual Plug pro sondu MSEB4

Zdroj: Vlastní zpracování



Po takovéto přípravě bylo zahájeno kvalitativní ultrazvukové měření. Sonda byla ponořena jemně do vazebního prostředku na povrchu měřeného etalonu ve vzdálenosti 100 mm od čela sondy. Předmětem měření byla umělá vada o hloubce 0,5 mm (viz obrázek 19). Tato vada se nachází na odbarvené části etalonového listu. Čelo sondy, tedy její směrově vysílací část, směřovala kolmo vůči této umělé vadě. Sonda byla uvedena do pomalu se sunoucího se pohybu kolmo vůči ploše měřené vady. Rychlost ultrazvukového měření byla u každé z použitých sond rozdílná. Obsluha defektoskopického přístroje sledovala rastr (viz obrázek 20) na displeji ultrazvukového přístroje a podle hodnot akustických ech přizpůsobovala rychlost měření pro každou sondu zvlášť.

Obrázek 19 - Měřicí postup na etalonovém listu

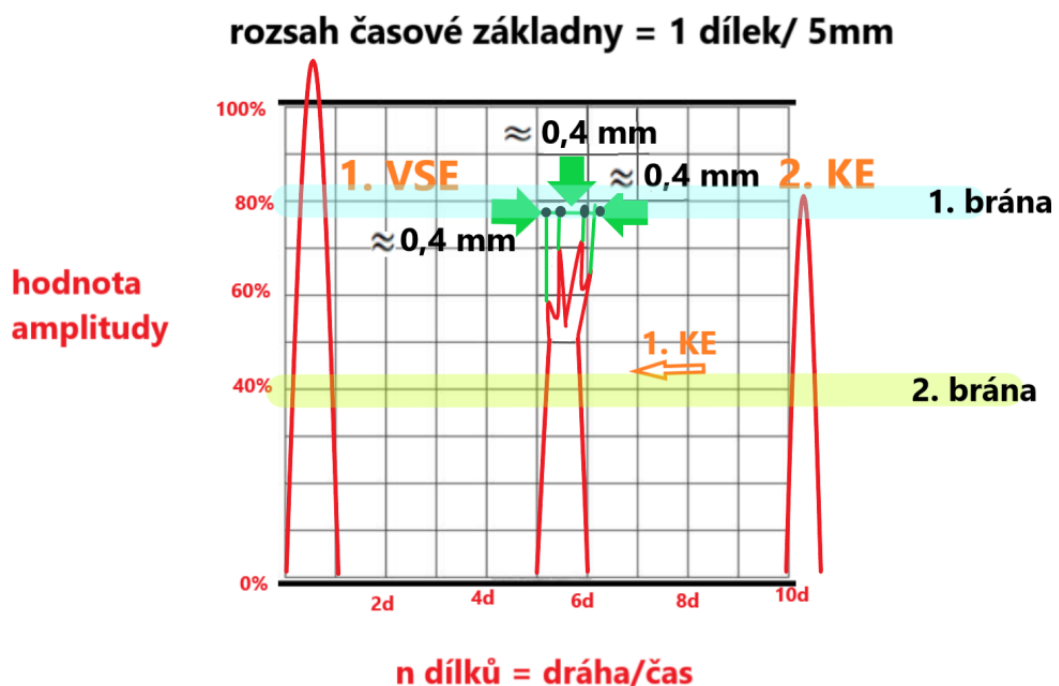


Zdroj: Vlastní zpracování



Bylo provedeno padesát měřících operací. Jedna měřící operace je složena z pěti měřících pokusů při využití pěti druhů snímacích sond. Po provedeném ultrazvukovém měření jednou sondou, byl odečten výsledek měřícího pokusu a následně byla připojena jiná sonda, u které byl v defektoskopickém přístroji vyvolán přednastavený kalibrační profil dané sondy. Po pátém měřícím pokusu posledním typem sondy, byla jednotně odečtena hodnota doplňkového měření z hlukoměru a termovizní kamery. Podmínkou prokazatelnosti odhalené vady bylo, že se musí ultrazvuková sonda nacházet při měření před vadou či přímo nad její polohou. Překročením této polohy by byl totiž indikován konec etalonového listu. Vzhledem k této podmínce byla pro indikovanou vadu stanovena hodnota 1 od hodnoty intenzita zpětného echa 100 % rastru do 40% tastru a neodhalenou vadu hodnota 0 pod 40 % rastru. Tato hodnota vady ve formě odhalena = 1, neodhalena = 0 a procentuální hodnota rastru (viz obrázek 20) byla následně zapsána do předem připravené tabulky tabulkového kalkulátoru MS Excel. Současně byla zaznamenána aktuální hodnota hlukové expozice z displeje hlukoměru, který se nacházel v zorném poli obsluhy defektoskopu. Následně bylo provedeno snímání emisivity etalonového listu a teplotní stav konkrétní vady. Veškeré tyto naměřené hodnoty byly zaznamenány do předem připravených tabulek a následně zpracovávány.

Obrázek 20 - Ukázka odečítání vad z rastru





#### 4.1.4 Realizace kvalitativního defektoskopického měření vad etalonu pomocí defektoskopie vířivých proudů

Při kvalitativním měření pomocí vířivých proudů na etalonovém listu, byl použit vířivoproudý defektoskopický přístroj typu Olympus Nortec 500D (viz tabulka 12). Tento defektoskopický přístroj (viz Příloha 17 – *Obecný popis, ovládací prvky a architektura defektoskopického přístroje Nortec 500D*) a použité sondy (viz Příloha 18 – *Obrázky, schématické uspořádání a obecné parametry vířivoproudých sond*) byly zapůjčeny dopravním letištěm Praha – Kbely.

Tabulka 12 - Technické parametry defektoskopického přístroje Nortec 500D

defektoskopický přístroj vířivých proudů Olympus Nortec 500D	
rok výroby	2007
kalibrováno podle normy	MIL-STD-810F
frekvenční rozsah	50 Hz až 12 MHz
předzesilovací cívka	0 nebo 14 dB
možné zdroje napájení	Li-Ion baterie 2,4 Ahr nebo 8,8 Ahr
druh displeje	VGA LCD
rozišení displeje	640 x 480
rozsah paměťového úložiště pro vytváření předdefinovaných kalibrací	200 programů
stabilizační funkce	vnitřní vyvažovací zátěže pro podporu jednocívkové sondy
funkce Freeze	schopnost udržení naměřených chybových signálů totžné vady, které lze prolnout
funkce PowerLink	automatické rozpoznání jakékoliv sondy a autonomní nastavení přístroje
funkce	měření vodivosti a tloušťky povlaku
funkce	použití rotačních sond

Zdroj: Vlastní zpracování + manuál pro obsluhu přístroje Nortec 500D



Pro vířivoproudou defektoskopii výzkumného měření byly použity sondy typu MP.060-60BL (viz tabulka 13), MRL/A/90.5 /6 (viz tabulka 14), MM7L9003-50 (viz tabulka 15), M7L905-60 (viz tabulka 16), M7L9003-60 (viz tabulka 17).

**Tabulka 13 - Technické parametry – sonda vířivých proudů MP.060-60BL**

<b>sonda vířivých proudů MP.060-60BL</b>	
<b>frekvenční rozsah</b>	50 kHz – 500 kHz
<b>typ sondy</b>	diferenciální
<b>konfigurace sondy</b>	můstková
<b>úhel měřícího hrotu</b>	0°
<b>celková délka</b>	152.4 mm
<b>ID číslo</b>	9102894

Zdroj: Katalogový list výrobce

**Tabulka 14 - Technické parametry – sonda vířivých proudů MRL/A/90.5 /6**

<b>sonda vířivých proudů MRL/A /90.5 /6</b>	
<b>frekvenční rozsah</b>	50 kHz – 500 kHz
<b>typ sondy</b>	absolutní
<b>konfigurace sondy</b>	odrazová
<b>úhel měřící špičky</b>	90°
<b>vzdálenost měřící špičky od základny</b>	5mm
<b>celková délka</b>	154,6 mm
<b>ID číslo</b>	9222215

Zdroj: Katalogový list výrobce



Tabulka 15 - Technické parametry – sonda vířivých proudů MM7L9003-50

<b>sonda vířivých proudů MM7L9003-50</b>	
frekvenční rozsah	50 kHz – 500 kHz
typ sondy	absolutní
konfigurace sondy	můstková
úhel měřící špičky	90°
vzdálenost měřící špičky od základny	0.76 mm
celková délka	127 mm
ID číslo	U8620124

Zdroj: Katalogový list výrobce

Tabulka 16 - Technické parametry – sonda vířivých proudů M7L905-60

<b>sonda vířivých proudů M7L905-60</b>	
frekvenční rozsah	1MHz - 6MHZ
typ sondy	absolutní
konfigurace sondy	můstková
úhel měřící špičky	90°
vzdálenost měřící špičky od základny	12.7 mm
celková délka	152.4 mm
ID číslo	U8620206

Zdroj: Katalogový list výrobce

Tabulka 17 - Technické parametry – sonda vířivých M7L9003-60

<b>sonda vířivých proudů M7L9003-60</b>	
frekvenční rozsah	200kHz - 1MHz
typ sondy	absolutní
konfigurace sondy	můstková
úhel měřící špičky	90°
vzdálenost měřící špičky od základny	0.76 mm
celková délka	152.4 mm
ID číslo	U8616226

Zdroj: Katalogový list výrobce

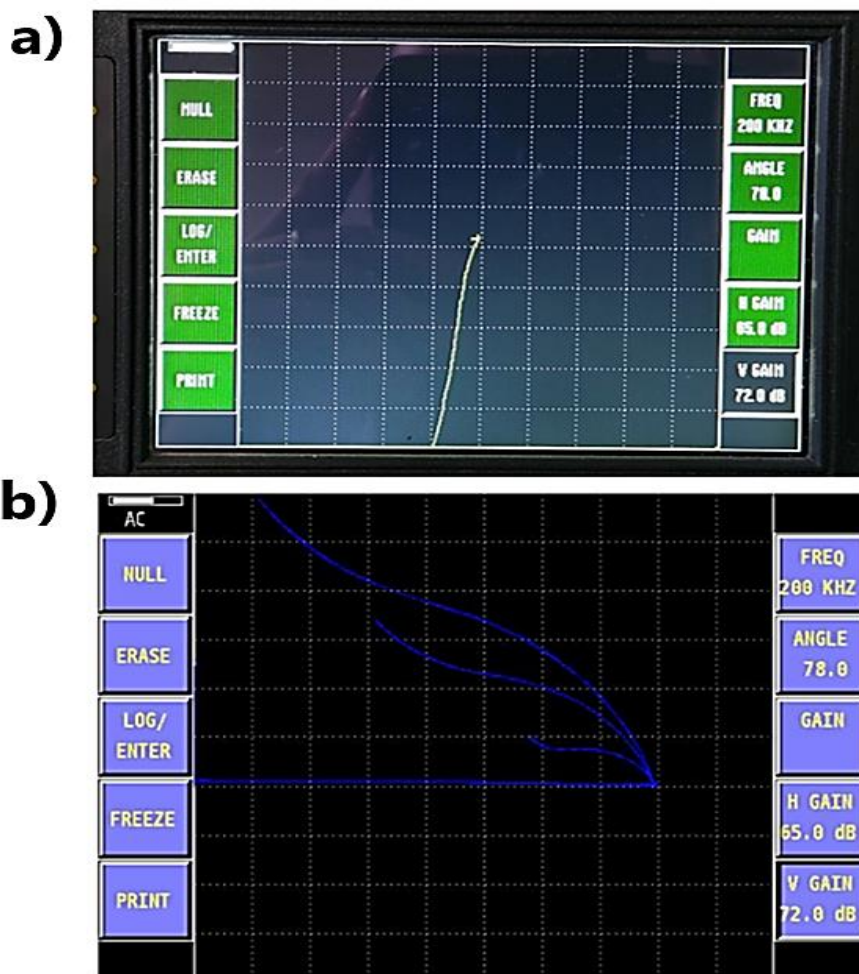




Kalibrace (viz Příloha 19 – Obecný postup kalibrace vířivoproudého defektoskopického přístroje pro potřeby kvalitativního měření na etalonovém listu) defektoskopického přístroje Nortec 500D byla provedena převážně podle pokynů stanovených výrobcem v příslušném manuálu pro obsluhu daného přístroje. Obsluha defektoskopického přístroje Nortec 500D provádějící kvalitativní defektoskopii vířivých proudů na etalonovém listu, podstoupila řadu konzultací a školení zabývajících se defektoskopií vířivých proudů. Tyto školení byla uskutečněna s defektoskopickými týmy vojenského letiště Praha – Kbely a LOM PRAHA s.p.

Podstatou tohoto kvalitativního defektoskopického měření je pouze indikovat přítomnost vady v kontrolovaném etalonu, nikoliv lokalizovat její přesnou polohu. Již v procesu kalibrace defektoskopického přístroje byla intenzita rušivých vlivů na takové úrovni, že výsledek ověření samotné kalibrace byl nepřijatelný (viz obrázek 21).

**Obrázek 21 - Rušivé vlivy v průběhu kalibrace vířivých proudů na trhlinovém etalonu standard TB-S1**





a) výsledek kalibrace prováděný obsluhou přístroje podle postupů stanovených výrobcem

b) výrobcem přístroje stanovený vzor správné kalibrace

poznámka:

Na zapůjčeném defektoskopickém přístroji Nortec 500D byla v tomto okamžiku hodnota impedanční roviny na ose „y“ a hodnota induktivní reaktance v ose „x“. tato poloha os se průběžně měnila v závislosti na poloze sondy, a to z důvodu aktivace funkce Úhel synchronizace.

Zdroj: Vlastní zpracování + <https://www.olympus-ims.com/cs/ndt-tutorials/eca-tutorial/intro/>

Pro kalibraci defektoskopického přístroje Nortec 500D byl využit trhlinový etalon od firmy Nortec s označením TB-S1 EDM Standard. Vyjiskřené zářezy etalonu, které představují velikost náhradní vady, mají hodnotu hloubky .040", .020" a .008" (viz obrázek 22).

**Obrázek 22 - Etalon TB-S1 EDM Standard**

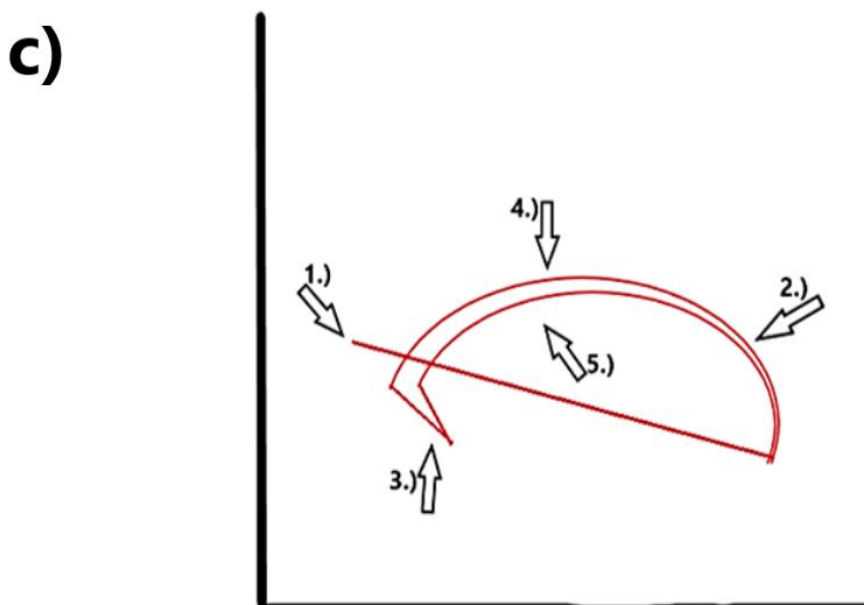
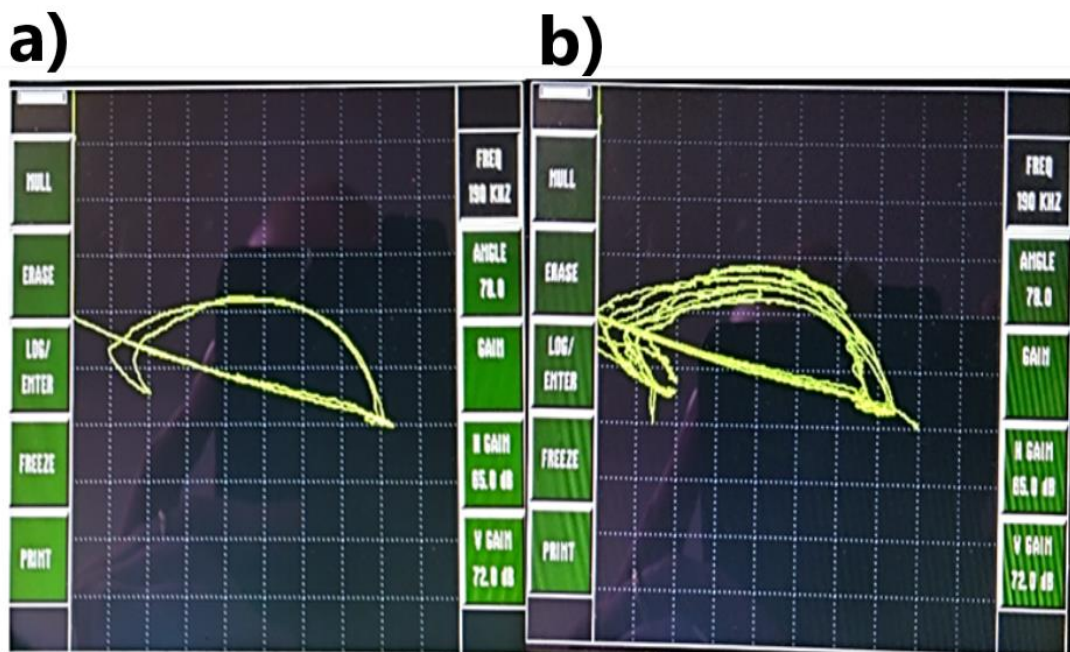


Z důvodu vysoké intenzity rušivých faktorů prostředí, byl základní postup kalibrace pro detekci povrchových vad upraven nad rámec stanovený výrobcem a byla aktivována většina stabilizačních funkcí přístroje, jako například funkce Waterfall.



Funkce Waterfall (viz obrázek 23, 24, 25, 26, 27) byla v průběhu celého defektoskopického měření vířivých proudů využita jako kontrolní mezistupeň správnosti defektoskopického měření a působení okolního šumu. Toto vyhodnocení a srovnání výsledků bylo provedeno nejpozději po pěti měřících pokusech. Důvodem tohoto počtu je ztráta čitelnosti detailů vadových ech při jejich srovnání. Po průběžném zhodnocení byly tyto srovnávací echa vymazány. Tímto byla kompletní kalibrace defektoskopického přístroje Nortec 500D se sondou MP.060-60BL ukončena. Takto byla provedena kalibrace se všemi sondami.

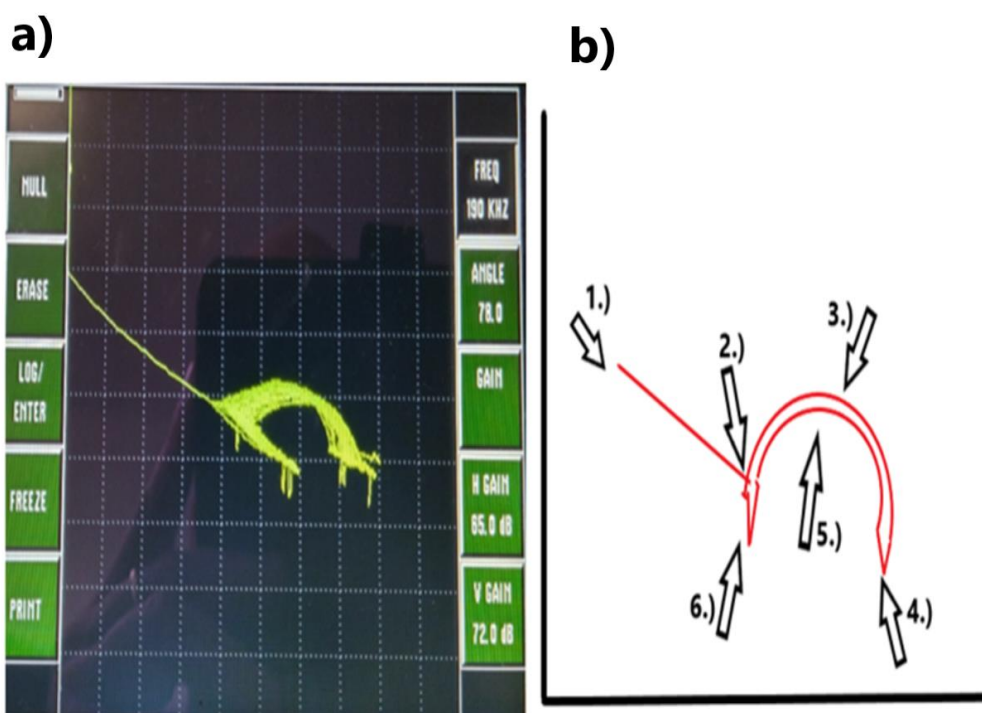
Obrázek 23 - Funkce Waterfall sonda vířivých proudů MRL/A /90.5 /6





- a) jeden měřicí pokus
- b) sada měřících pokusů srovnávána ve funkci Waterfall
- c) grafické znázornění průměrně naměřeného echa
  - 1.) přímka znázorňující vzduch
  - 2.) dvoj křivka znázorňující odezvu vířivých proudů na hliníkový materiál
  - 3.) oblast znázorňující odezvu vířivých proudů na trhlinu vyplněnou vzduchem
  - 4.) křivka znázorňující první půl otáčku sondy okolo vady
  - 5.) křivka znázorňující druhou půl otáčku sondy okolo vady

Obrázek 24 - Funkce Waterfall sonda vířivých proudů MP.060-60BL



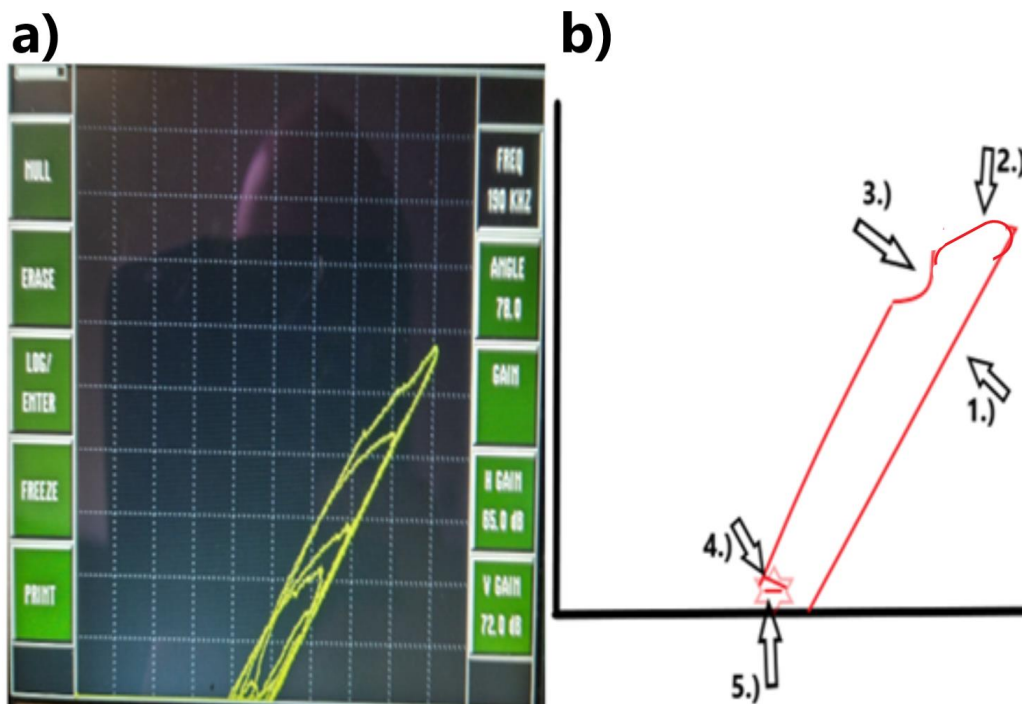
- a) sada měřících pokusů srovnávána ve funkci Waterfall
- b) grafické znázornění průměrně naměřeného echa
  - 1.) přímka znázorňující vzduch
  - 2.) dvoj křivka znázorňující odezvu vířivých proudů na hliníkový materiál
  - 3.) křivka znázorňující první půl otáčku sondy okolo vady
  - 4.) oblast znázorňující odezvu vířivých proudů na první okraj trhliny vyplněný vzduchem



5.) křivka znázorňující druhou půl otáčku sondy okolo vady

6.) oblast znázorňující odezvu vířivých proudů na první okraj trhliny vyplněný vzduchem

Obrázek 25 - Funkce Waterfall sonda vířivých proudů M7L9003-60



a) sada měřících pokusů srovnávána ve funkci Waterfall

b) grafické znázornění průměrně naměřeného echa

1.) přímka znázorňující vzduch

2.) křivka znázorňující odezvu vířivých proudů na hliníkový materiál, první půl otáčka sondy okolo vady

3.) oblast znázorňující odezvu vířivých proudů na první okraj trhliny vyplněný vzduchem

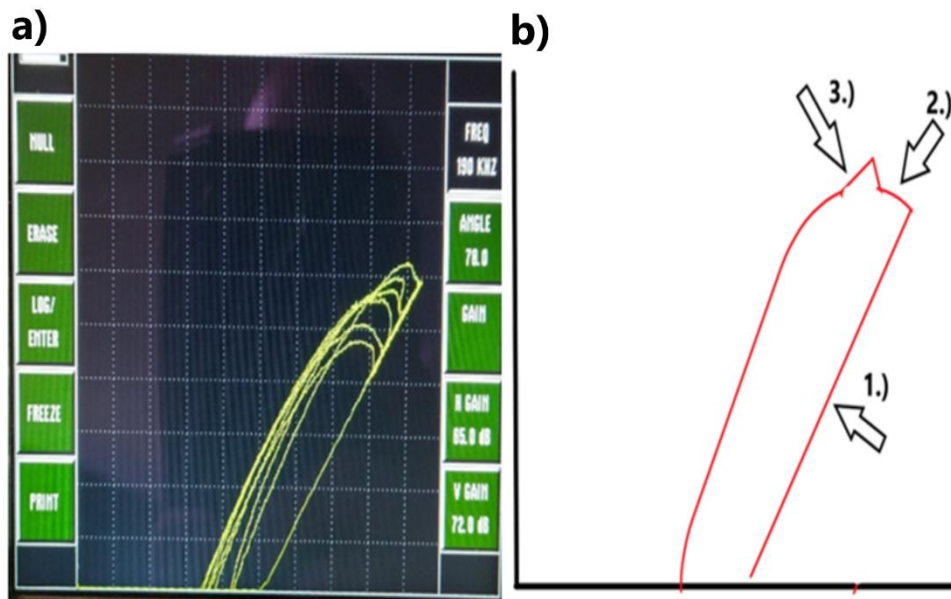
4.) oblast mírně znázorňující odezvu vířivých proudů na druhý okraj trhliny vyplněný vzduchem, druhá půl otáčka sondy okolo vady

5.) oblast intenzivního šumu





Obrázek 26 - Funkce Waterfall sonda vířivých proudů MM7L9003-50



a) sada měřících pokusů srovnávána ve funkci Waterfall

b) grafické znázornění průměrně naměřeného echa

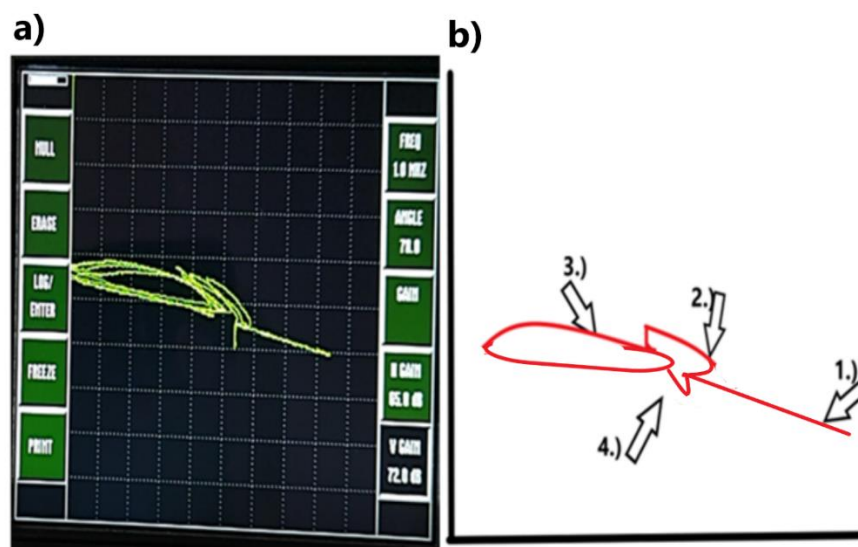
1.) přímka znázorňující vzduch

2.) křivka znázorňující odezvu vířivých proudů na hliníkový materiál, první půl otáčka sondy okolo vady

3.) oblast znázorňující odezvu vířivých proudů na první okraj trhliny vyplněný vzduchem

4.) křivka znázorňující odezvu vířivých proudů na hliníkový materiál, druhá půl otáčka sondy okolo vady

Obrázek 27 - Funkce Waterfall sonda vířivých proudů M7L905-60





- a) sada měřících pokusů srovnávána ve funkci Waterfall  
 b) grafické znázornění průměrně naměřeného echa
- 1.) přímka znázorňující vzduch
  - 2.) oblast znázorňující silnou odezvu vířivých proudů na první okraj trhliny vyplněný vzduchem. Křivka znázorňující odezvu vířivých proudů na hliníkový materiál při první půl otáčce sondy, byla obtížně rozeznatelná
  - 3.) Křivka znázorňující odezvu vířivých proudů na hliníkový materiál při druhé půl otáčce sondy
  - 4.) oblast znázorňující mírnou odezvu vířivých proudů na druhý okraj trhliny vyplněný vzduchem.

Následně bylo zahájeno samostatné kvalitativní měření vířivých proudů na etalonovém listu. Všechny použité sondy měli jednotný typ 16pinového LEMO datového kabelu s BNC konektorem. Hlukoměr Testo 816-1 byl umístěn a zprovozněn ve vzdálenosti 50 cm od měřeného etalonu. Snímání hlukové expozice bylo prováděno po celou dobu vířivoproudého měření. Po provedené kalibraci a nastavení hodnoty emisivity a teploty odrazu, byla termovizní kamera umístěna na dosah od pracovníka obsluhy vířivoproudého defektoskopu. Po zapojení a aktivování napájení defektoskopického přístroje, bylo provedeno vyvolání přednastavené kalibrace pro danou sondu, která byla pro všechny sondy stejná (viz tabulka 18), výjimkou byla sonda M7L905-60 a její pracovní frekvence 1 MHz.

**Tabulka 18 - Kalibrace defektoskopického přístroje Nortec 500D pro všechny sondy**

<b>Parametry kalibrace defektoskopického přístroje Nortec 500D</b>	
<b>pracovní frekvence</b>	200 kHz, 1MHz
<b>horizontální zesílení</b>	65 dB
<b>vertikální zesílení</b>	72 dB
<b>fázový úhel</b>	78°
<b>buzení - napájení sondy</b>	High - 12 V
<b>aktivované stabilizační funkce</b>	PowerLink, Úhel synchronizace, High napájení sondy, Preamb, Continuous Null a Waterfall

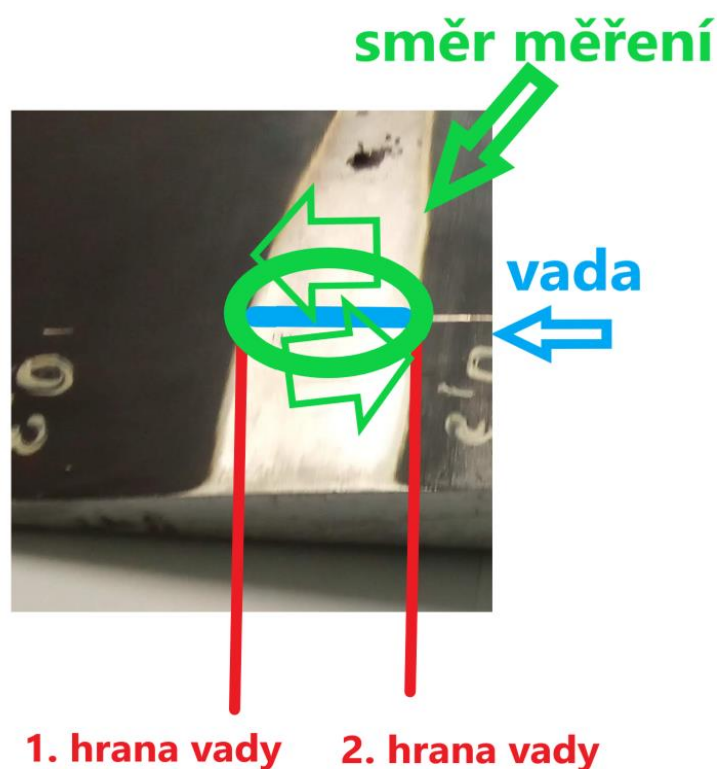




Zdroj: Vlastní zpracování

Příslušnou sondou bylo zahájeno kvalitativní vířivoproudé měření. Sonda byla uvedena do krouživého pohybu po hraně defektoskopicky snímané vadě (viz obrázek 19). Hodnota vady byla určena na základě velikosti přiblížení funkcí lupa. Vada byla při defektoskopii vířivých proudů vždy odhalena. Proto byla hodnota výsledku měření přiřazena obdobná procentuální hodnota jako u ultrazvukového měření, ale zde tato hodnota vycházela z poměru přiblížení na zakřivený signál pomocí lupy. Hranicí zjistitelnosti vady tedy bylo 40 % přiblížení.

**Tabulka 19 - Postup kvalitativní defektoskopie vířivých proudů**



Zdroj: Vlastní zpracování

Následně byla hodnota zapsána do předem připravené tabulky tabulkového kalkulátoru MS Excel. Bylo provedeno padesát měřících operací. Jedna měřící operace je složena z pěti měřících pokusů při využití pěti druhů snímacích sond. Po provedeném vířivoproudém měření jednou sondou, byl odečten výsledek měřícího pokusu a následně byla připojena jiná sonda, u které byl v defektoskopickém přístroji vyvolán přednastavený kalibrační profil dané sondy. Po pátém měřícím pokusu



posledním typem sondy, byla jednotně odečtena hodnota doplňkového měření z hlukoměru a termovizní kamery. Veškeré tyto naměřené hodnoty byly zaznamenány do předem připravených tabulek a následně zpracovávány.

## 4.2 Porovnání jednotlivých metod měření

### 4.2.1 Metoda ultrazvukové defektoskopie a vířivých proudů

Metoda ultrazvukové defektoskopie umožňuje na rozdíl od vířivých proudů prostoupit do všech hmotných materiálů, a to jak kovových, tak i nekovových. Podstatou šíření ultrazvukových vln jsou iniciované mechanicky kmitající částice hmotového prostředí. Díky této fyzikální podstatě ultrazvuku je možné uskutečnit bezkontaktní měření průtočného množství tekutin či provádět defektoskopii materiálů o tloušťce několika metrů. Též umožňuje ultrazvuková defektoskopie provádět defektoskopickou kontrolu povrchu s více vadami a určit i jejich polohu a velikost, což defektoskopie vířivých proudů neumožňuje. Ultrazvukové vlny umožňují detekovat a změřit i celý objem vad, což indukované rotující elektrony vířivých proudů šířící se v kruhových trajektoriích nedokážou. Vířivé proudy umožňují indikovat pouze okraje defektů.

Při nárazu ultrazvukového vlnění na hranu zrna materiálu či na vadu, nastává převážně odraz ultrazvukové vlny v závislosti na prostorové orientaci zrna či defektu, ale u vířivých proudů dochází v tomto okamžiku k zúžení plochy, přes kterou prochází ve formě elektrického náboje, což vede k ovlivnění hustoty elektrického náboje. Změna této hustoty poté ovlivňuje i samotnou hodnotu impedance vinutí a vlivem tohoto odporu cívky může docházet k rozdílným potenciálům v jednotlivých částech dané cívky. To vede k rozdílné kapacitě cívky v jejích jednotlivých částech a tato vlastní kapacita cívky poté způsobuje rezonanci, která ovlivňuje činný odpor cívky a její reaktanci, čímž dochází k výraznému ovlivnění defektoskopické metody vířivých proudů.

Ultrazvuková defektoskopie je z uživatelského hlediska velmi složitou a komplikovanou metodou nedestruktivní defektoskopie a mnoha vlivů prostředí ovlivňuje ultrazvukové měření. Na rozdíl od defektoskopických přístrojů vířivých



proudů neobsahují nové moderní ultrazvukové defektoskopy, tak účinné filtry elektronického obvodu, aby dokázali utlmit či úplně odrušit působící šum. Při působení okolního šumu musí defektoskopický pracovník vymyslet, jakým způsobem nastavení či změnou měřící techniky tento šum minimalizuje. Oproti tomu nové moderní defektoskopy vířivých proudů jsou velmi interaktivní a uživatelsky přívětivé, veškeré kolísání měřícího signálu je schopen přístroj zesílit a šum utlmit.

Nejčastějším akustickým měničem ultrazvukových sond jsou piezoelektrické měniče. Funkční využití těchto měničů je ovlivněno do určité míry působením teplotních podmínek okolního prostředí. Tento rozsah funkčnosti piezoelektrických měničů ovlivňuje Curieův teplotní bod. Dosažením Curieova teplotního bodu pro daný typ piezoelektrického materiálu dochází k okamžité ztrátě jeho schopnosti generovat povrchový elektrický náboj. K této ztrátě piezoelektrických vlastností materiálů dochází skokově, nevratně a poškození je obtížně prokazatelné. Z tohoto důvodu bylo prováděno i doplňkové měření emisivity etalonu. Vysílací měnič se nejčastěji vyrábí z bariumtitanátu a přijímací měnič z lithiumsulfátu.

Výrobce sond obecně uvádí, že s nárustem teploty prostředí o  $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dochází ke snižování rychlosti ultrazvukových vln v daném materiálu o  $1\text{ m/s}$ , což se projeví jako rozdíl šumu ve výšce tvarových ech o  $\pm 1\text{ dB}$ . Dále ovlivňují samotnou ultrazvukovou defektoskopii anharmonické kmity prostředí, které poté působí svou rezonanční podstatou, orientací a velikostí proti harmonicky generovaným kmitům ultrazvuku. Z tohoto důvodu byla snímána hluková expozice

Metoda defektoskopie vířivých proudů umožňuje provádět defektoskopii pouze elektricky vodivých materiálů. Na rozdíl od ultrazvukových vln se můžou elektromagnetické vlny šířit i vakuem, ale této výhody se v běžné defektoskopii příliš nevyužije. Sonda defektoskopického přístroje je sice napájena střídavým proudem se sinusovým průběhem, ale tento střídavý proud vyvolává v budící cívice sondy primární magnetické pole, které je časově proměnné, jinak by nemohlo dojít k indukci vířivých proudů, a již tato podstata anharmonického vzniku a působení tohoto kontrolního



média vířivých proudů je zatíženo měřicí chybou. Pomocí vířivých proudů lze také provádět bezkontaktní defektoskopii, stejně jako u ultrazvukové defektoskopie, ale pouze několik milimetrů od testovaného povrchu. Vířivé proudy nejsou schopné jako ultrazvuk proniknout do celého objemu testovaného materiálu. Nejpodstatnějším rozdílem je, že vířivé proudy umožňují identifikovat pouze okraje vad, nikoliv jejich celý objem. Z tohoto důvodu není ani možné změřit velikost vady a určit její polohu v materiálu. Schopnost identifikovat polohu vady ztrácí metoda vířivých proudů v tzv poli vad, kde se nachází více vad vedle sebe.

Z uživatelského hlediska je ale metoda vířivých proudů výrazně snazší na prováděnou defektoskopii nežli metoda ultrazvuková. Má-li pracovník dostatečné znalosti a dobrého školícího pracovníka, tak je schopný se naučit a účinně používat metodu vířivých proudů během jednoho dne. U ultrazvukové defektoskopie je toto otázkou několika let, a to ještě za předpokladu že si pracovník rozšiřuje povědomí o fyzikálních vazbách, které ovlivňují účinnost ultrazvukového měření.

Nejčastěji používaným typem sond vířivých proudů, které se využívají při defektoskopii, jsou sondy tužkové. Snímací část těchto sond je tvořena jedno či více vrstvenou cívkou z měděného drátu. Sonda je tvořena jednou či více cívkami, které jsou vinuty buďto na železném nebo feritovém jádře, čímž tato konstrukce společně s odstíněním umožňuje generovat při malém průměru cívky, malém průměru drátu a menším počtu závitů, velmi silné magnetické pole. Mohou být i cívky se vzduchovou mezerou, což znamená že nejsou vinuty na jádře a tento prostor je určen pro defektoskopii tyčovin, tento druh sond se moc v běžné defektoskopii nevyužívá. Lepší rozpoznávací schopnosti povrchových vad, mají sondy s vyšší frekvencí a menším průměrem cívky. Když je průměr vysílací cívky větší a frekvence sondy menší, tak má sice horší rozlišovací schopnosti, ale vygenerované vířivé proudy jsou schopny proniknout do větší hloubky testovaného materiálu.

Teplotní rozsah použití sond vířivých proudů je od  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$  a v tomto teplotním rozsahu mají sondy  $\pm 0,05\%$  chybovost snímání. Nejvýznamnější rušivé vlivy, které ovlivňují sondy vířivých proudů jsou vibrace, které jsou způsobeny obsluhou dané sondy, která vede měřicí plochu sondy po testovaném povrchu. Tyto



vibrace způsobují vznik rušivého šumu signálu sondy. Dalším a neméně významný rušivým jevem u tužkových sond je chyba způsobená oddálením měřící plochy sondy od povrchu testovaného materiálu. Tímto oddálením měřící plochy sondy od povrchu vznikne rušivý signál a poklesne schopnost citlivosti sondy k měření. Dále dochází u sond vířivých proudů ke vzniku šumu v povrchovém objemu měřeného materiálu

#### 4.2.2 Statistické zpracování dat

S ohledem na četnost provedených měřících pokusů při kvalitativním měření ultrazvukové defektoskopie a defektoskopie vířivých proudů, budou výsledky jednotlivých měření postupně vyhodnoceny (viz Příloha 20 – Zdrojová data defektoskopického měření). V samotném závěru bude na základě naměřených zdrojových dat a jejich statistické analýze, vybrána ideální metoda defektoskopie pro konkrétní aplikaci v leteckém provozu vojenské letecké základny Praha – Kbely.

#### Vyhodnocení ultrazvukové defektoskopie

Akustický měnič všech použitých ultrazvukových sond je z báriumtitanátu. Předpokládalo se tedy, že působící tepelné ovlivnění akustických snímačů způsobí u všech sond obdobné odchylky v měření. Ze statistického vyhodnocení dat (viz tabulka 20) ale vyplývá, že každá sonda (viz graf 1, 2, 3, 4, 5) vykazovala rozdílnou míru rušení, která byla vyhodnocena na základě hodnoty akustického tlaku vadového echa. Podle katalogových listů výrobce sond je poloviční hodnota Curieova teplotního bodu u všech měničů stejná, a to 60°C.

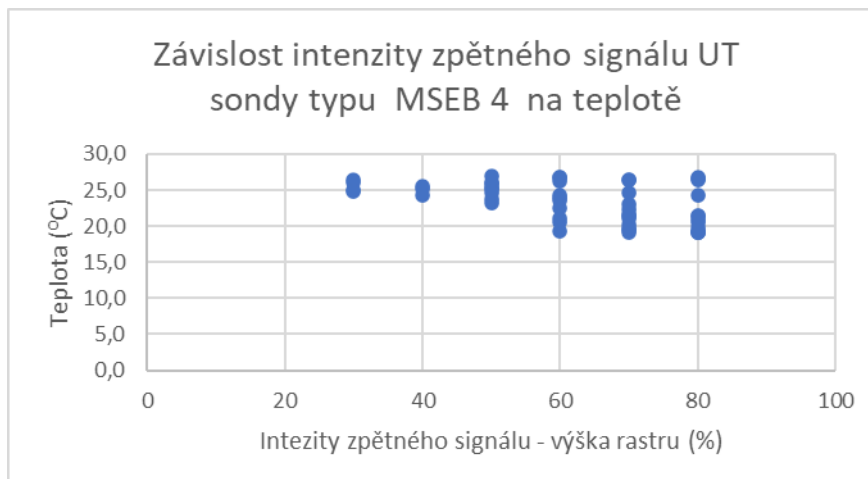
**Tabulka 20 - Korelace účinnosti ultrazvukových sond v závislosti na rušivých vlivech prostředí**

Typ sondy UT:	Teplota (°C):	Hluková expozice (dB):
MSEB 4	-0,500	-0,781
MWB 70-4	-0,532	-0,756
MWB 60-4	-0,533	-0,868
MWB 45-4	-0,465	-0,808
MSW	-0,492	-0,822

Zdroj: Vlastní zpracování

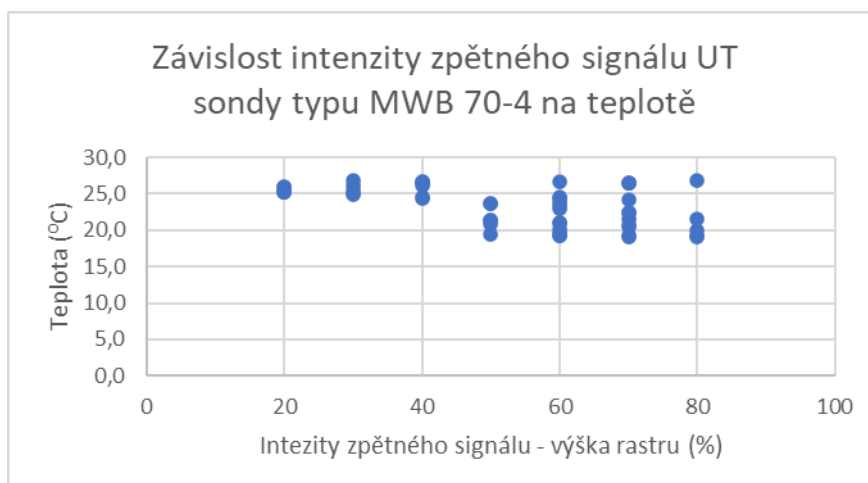


**Graf 1 - Korelace účinnosti sondy MSEB4 na teplotě**



Zdroj: Vlastní zpracování

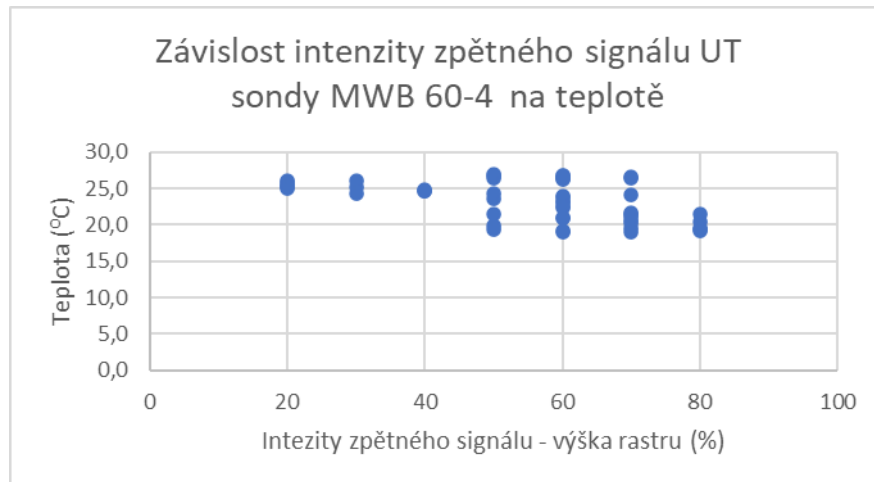
**Graf 2 - Korelace účinnosti sondy MWB 70 na teplotě**



Zdroj: Vlastní zpracování

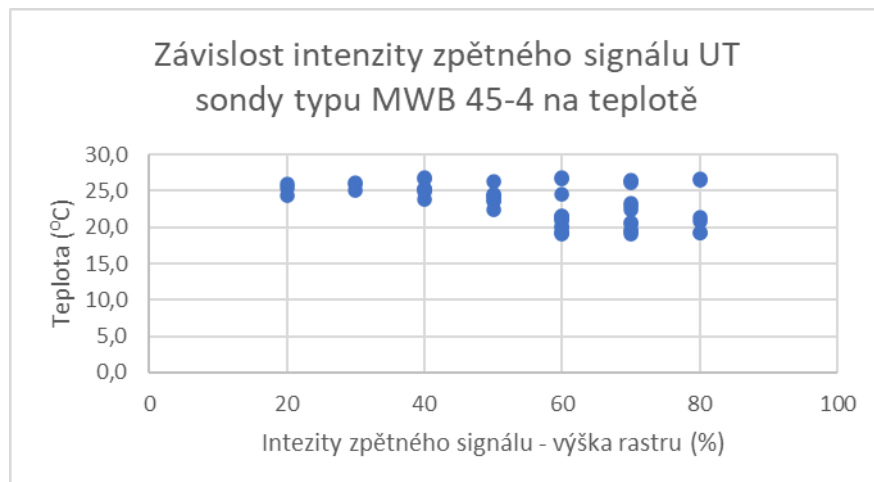


**Graf 3 - Korelace účinnosti sondy MWB 60 na teplotě**



Zdroj: Vlastní zpracování

**Graf 4 - Korelace účinnosti sondy MWB 45 na teplotě**

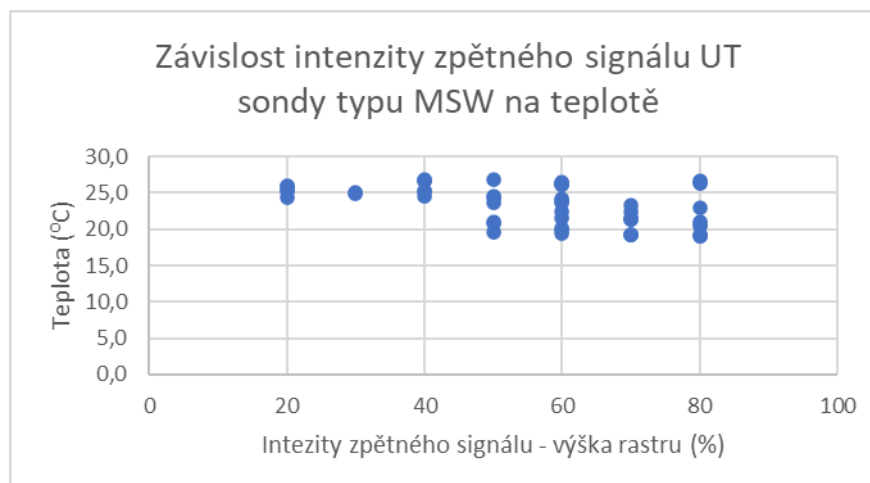


Zdroj: Vlastní zpracování





**Graf 5 - Korelace účinnosti sondy MSW na teplotě**

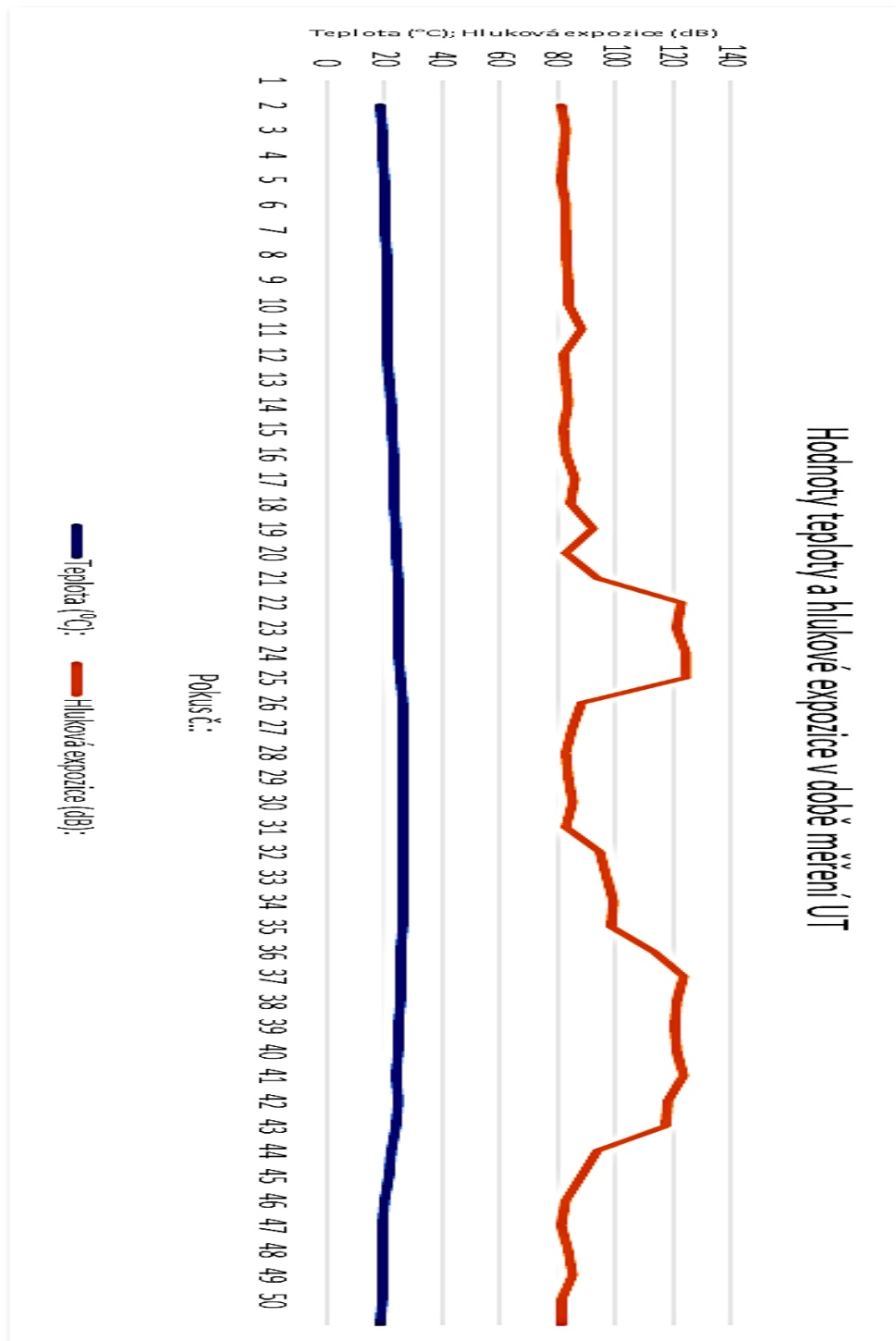


Zdroj: Vlastní zpracování

Výrobce sond obecně uvádí, že s nárustem teploty prostředí o + 1 °C, dochází ke snižování rychlosti ultrazvukových vln v daném materiálu o - 1 m/s, což se projeví jako rozdíl šumu ve výšce tvarových ech o - 1 dB. Nastavovaná hodnota rychlosti ultrazvuku podélných vln pro sondu MSEB4 bylo 6,32 km/s. Pro úhlové sondy typu MWB 70, 60, 45 byla pro příčné vlny nastavena hodnota 3,13 km/s. Pro úhlovou sondu typu MSW byla pro povrchové vlny nastavena hodnota 2,99 km/s. Rychlost šíření vln je materiálovou konstantou daného hmotového prostředí, přes které se vlny šíří. Tyto tabulkové hodnoty rychlostí ultrazvukových vln jsou stanoveny pro konstantní teplotu daného materiálu o hodnotě + 20 °C. Této teplotě odpovídá i specifická krystalografie jednotlivých atomů daného materiálu a prostorové uspořádání jejich zrn. Mění se teplotní podmínky v průběhu ultrazvukové defektoskopie, způsobily nejspíše vnitřní přechodové změny textury testovaného materiálu. Tato elastická vlastnost materiálu a pokles rychlostí jednotlivých šířících se ultrazvukových vln, způsobila rozdílnou hodnotu účinnosti sond a tím i prozvučitelnost materiálu. Tento jev způsobený změnou tepelného stavu testovaného materiálu nebyl doplňkovým měřením zaznamenaný. Ze statisticky zpracovaných dat ultrazvukové defektoskopie, lze říci, že z průměrných hodnot měření vyplývá, že průběh zaznamenané teploty během měření byl takřka lineární (*viz graf 6*).



Graf 6 - Průběh rušivých vlivů při ultrazvukové defektoskopii



Zdroj: Vlastní zpracování

Vzhledem k dosahovaným hodnotám hlukové expozice,

Vyhodnocení korelace účinnosti sond vzhledem k teplotě, nelze provést na základě druhu jejich stíně. Sonda MSW je jako jediná sonda se stíněním Gama, ale podle

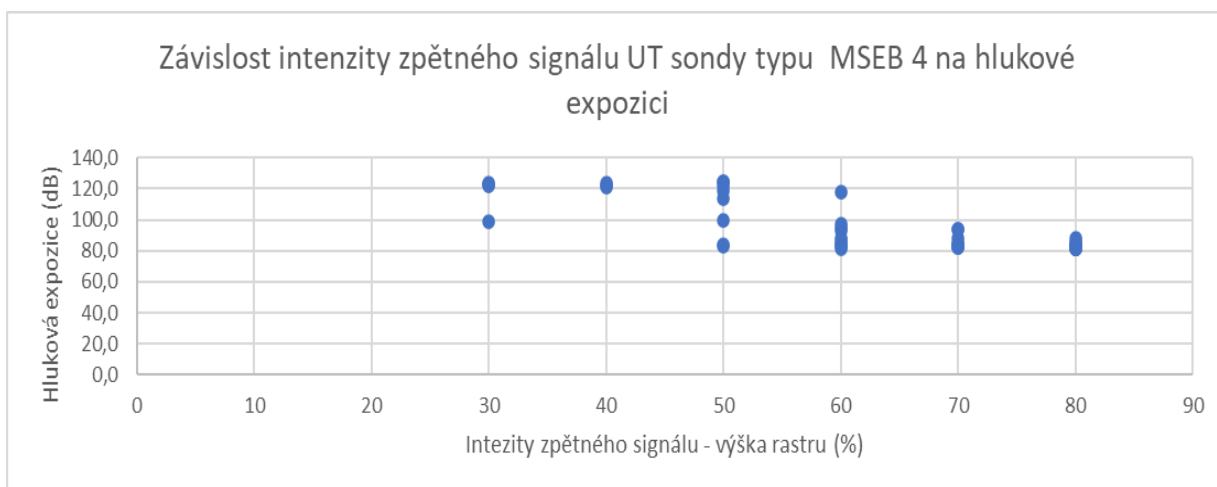


hodnoty korelace je jako druhá nejméně ovlivnitelná. U sondy MSW se očekávalo nejvyšší míra ovlivnění. Lze ale říci, že sonda MSW a MWB45 byly vzhledem k teplotě nejúčinnější, nejspíše díky jejich jmenovitým úhlům. Sonda MWB45 má jmenovitý úhle lomu ultrazvuku o hodnotě  $45^\circ$ . Při porovnání úhlových sond vysílající fokusovaný paprsek podélných vln, na základě hodnoty jmenovitého úhlu lomu, ohybu a hodnotě akustického tlaku, dosahují právě sondy s úhlem lomu  $45^\circ$  nejvyšší hodnoty akustického tlaku. Sonda MSW má hodnotu jmenovitého úhlu lomu  $90^\circ$ , při této hodnotě dochází při dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní k ohybu ultrazvuku a k jeho tzv. vymizení. Tyto vlny dosahují v povrchových vrstvách takřka 100% akustického tlaku a jejich hodnota tlaku klesá pouze s hloubkou prostupu, či vzhledem k zoxidovanému povrchu. Vzhledem k hodnotám hlukové expozice, je možné říci že postupná vlna šířící se od místa rozruchu, tedy proudového motoru, byla zdrojem vzniku teplotních rozdílů v objemu etalonového listu. Tento teplotní rozdíl ale nebyl zaznamenanatelný termovizní kamerou. Myšlená tepelně ovlivněná oblast, vznikla přeměnou mechanické energie kmitajících částic vně etalonového listu na energii tepelnou. Příčinou této tepelné energie byla periodická změna hustoty stlačovaného prostředí vlivem šířící se postupné vlny. Je tedy možné říci, že jmenovitý úhel sond, umožnil vyslané ultrazvukové vlně, se vyhnout tepelně ovlivněné oblasti, která způsobila snížení účinnosti sondy MSEB4, od které se očekávalo, že bude nejúčinnější. Nelze toto vyhodnocení provést ani na základě jmenovité frekvence sond, například u sondy MSW. Při vyšší jmenovité frekvenci se zmenšuje hodnota vlnové délky, která způsobí horší prozvučitelnost materiálu, čímž vzroste šum. Korelace účinnosti sond s teplotou je nejspíše závislá na hodnotě jmenovitého úhlu lomu a působením hlukové expozice.

Ze statistického vyhodnocení dat rušivé hlukové expozice (viz GRAF 7, 8, 9, 10, 11 ) vyplývá, že každá sonda vykazovala při ovlivnění hlukem rozdílnou míru rušení. Vzhledem k nepředpokládaným hodnotám korelací jednotlivých sond, nelze opět stanovit hodnotu korelace určité sondy na hluku vzhledem k jejímu konstrukčnímu uspořádání. Opět je překvapivé, že jako jediná sonda MSW se stíněním GAMA nedosahovala nejhorších výsledků, právě naopak při zohlednění hodnoty akustického tlaku vadového echa, byla tato sonda jako druhá nejúčinnější.

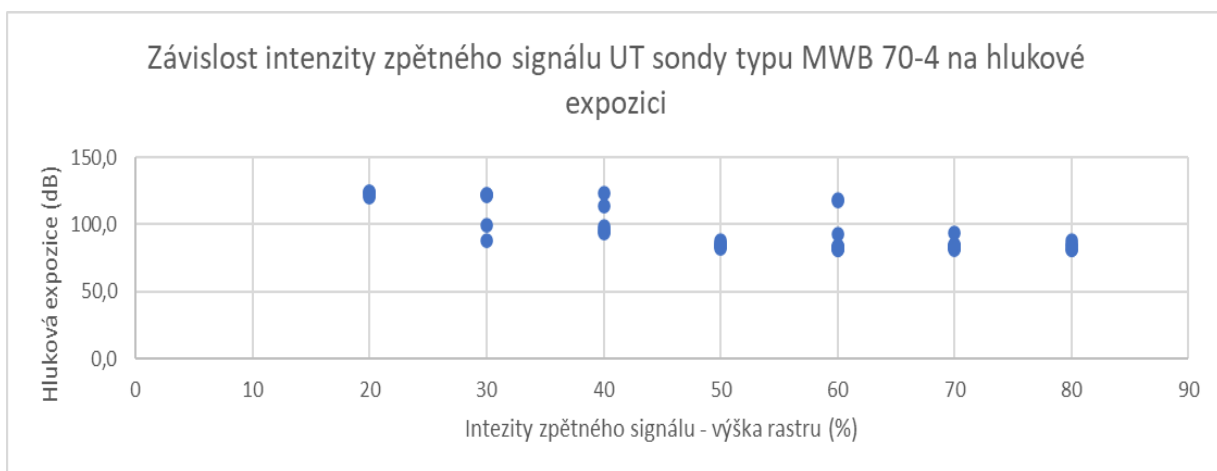


**Graf 7 - Korelace účinnosti sondy MSEB4 na hlukové expozici**



Zdroj: Vlastní zpracování

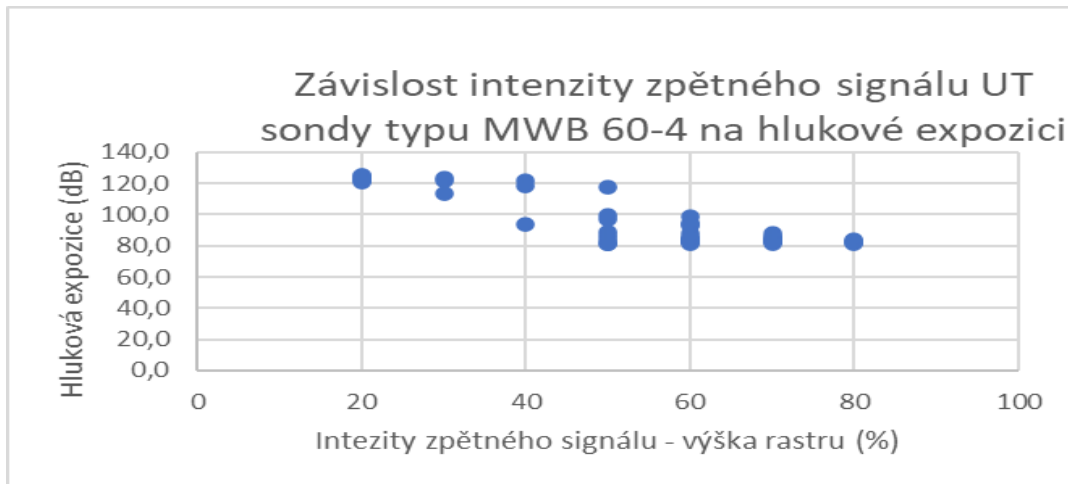
**Graf 8 - Korelace účinnosti sondy MWB 70 na hlukové expozici**



Zdroj: Vlastní zpracování

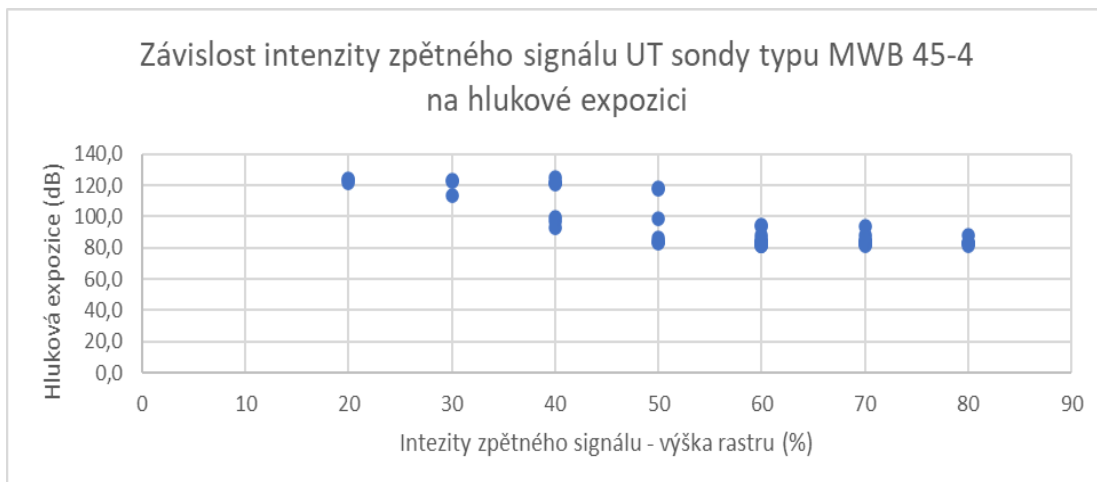


**Graf 9 - Korelace účinnosti sondy MWB 60 na hlukové expozici**



Zdroj: Vlastní zpracování

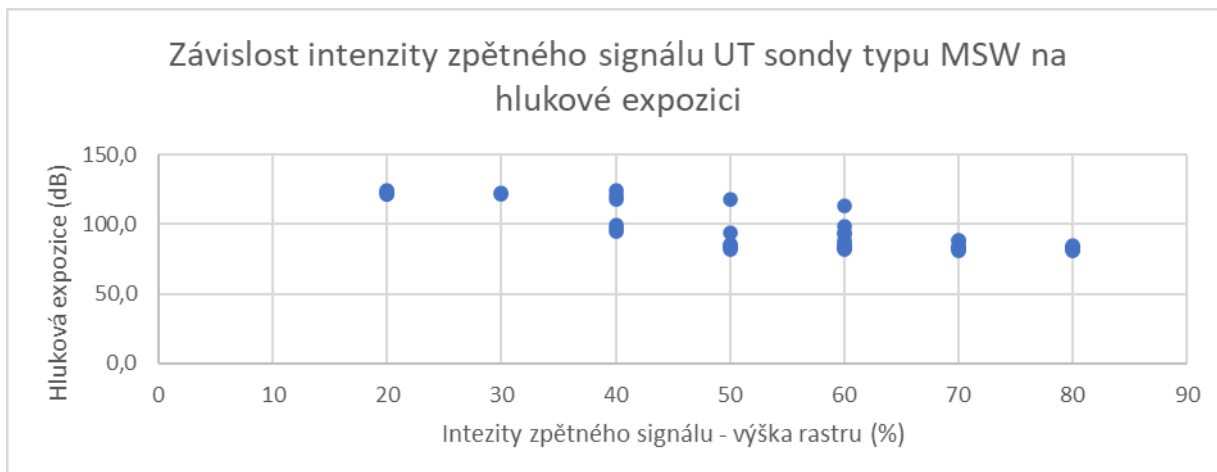
**Graf 10 - Korelace účinnosti sondy MWB 45 na hlukové expozici**



Zdroj: Vlastní zpracování



**Graf 11 - Korelace účinnosti sondy MSW na hlukové expozici**



Zdroj: Vlastní zpracování

Vzhledem k hodnotám korelace účinnosti jednotlivých sond na hlukové expozici, lze usuzovat, že jejich míra účinnosti byla nejspíše ovlivněna více faktory. Jedním z těchto faktorů je rozdílná Fresnelova a Fraunhoferova zóna. Fresnelova zóna neboli blízké pole je určitá vzdálenost akustické vlny od akustického měniče, v této vzdálenosti mají ultrazvukové vlny nejvyšší akustický tlak a jejich svazek je nejužší. Následně dochází k rozevření vlnového svazku a tím i k degradaci vyslaných vln, ty přecházejí do Fraunhoferovi zóny neboli vzdáleného pole, čímž nastává snižování akustického tlaku. Po tuto vzdálenost má vyslaná ultrazvuková vlna šířící se od akustického měniče do prostředí, neměnnou hodnotu 100 % akustického tlaku. Sonda MSEB4, má hodnotu vzdálenosti délky blízkého pole  $N = 19,00320513$  mm. S ohledem na tuto podmínku a skutečnost, že sonda MSEB4 má Alpha stínění a vysílá podélné vlny kolmo na rozhraní materiálů, bylo očekáváno, že bude sonda MSEB4 nejméně ovlivňována. Sondy s Alpha stíněním vysílají krátké impulsy s nejširším frekvenčním spektrem, což umožňuje získávat na rastru defektoskopu velmi ostrá a vysoká tvarová echa. Současně s tímto poznatkem bylo očekáváno, že bude sonda MSW se stíněním Gama nejméně ovlivňována, ale hodnota korelace tomu neodpovídá.

Sondy typu MWB mají jednotně hodnotu  $N = 1,938291139$  mm. Vzhledem k hodnotě blízkého pole sond typu MWB a jejich modulaci fokusované podélné vlny, bylo očekáváno, že budou tyto sondy také ovlivňovány hlukovou expozicí a vzhledem k jejich vysílané příčné vlně budou dosahovat obecně nejhorších měřících výsledků



kompletně. Nejpřekvapivější je hodnota korelace sondy MWB70, a to s ohledem na podmínky Snellova zákona o transformaci dopadajících ultrazvukových vln na rozhraní prostředí. Snellův zákon nevyjadřuje sice nic o energetické bilanci ultrazvukových vln při jejich transformaci, ale popisuje závislost mezi úhly dopadu jednotlivých vln na rozhraní prostředí o určité hodně akustického vlnového odporu.

V závislosti na rychlostech šíření, frekvenci a vlnových délkách jednotlivých ultrazvukových vln, nastává útlum jejich energie z hlediska rozdílného vzájemného poměru jednotlivých složek koeficientu útlumu. Koeficient útlumu je tvořen složkou absorpce a rozptylu ultrazvukových vln. Bude-li toto nečekané pořadí korelací ultrazvukových sond zkoumáno z hlediska energie akustického tlaku, pak bude hodnota útlumu absorpcí tou nejrizikovější složkou. Útlum ultrazvukové vlny absorpcí je o to větší, čím je její frekvence nižší, důvodem je vyšší podíl hysteretických ztrát mechanické energie kmitajících částic prostředí. Hodnota korelace sondy MSW s jmenovitou frekvencí 25 MHz, ale vykazuje silnou korelaci s hlukovou expozicí. Důvodem této korelace je, že má sonda gama stínění a při hodnotě této frekvence dochází již spíše k rozptylu nežli absorpci ultrazvukových vln.

Sonda typu MSW má hodnotu  $N = 0,520833333$  mm. Tyto hodnoty blízkého pole jsou ale obecným vyjádřením v souvislosti s hloubkou prostupu. Sonda MSW vysílá povrchové vlny a u této sondy je nevhodné vysílat vlny do větší hloubky, protože s tím úměrně klesá hodnota jejich akustického tlaku. V závislosti na rozsahu nastavené časové základny defektoskopu, si jsou povrchové vlny schopny udržet takřka 100 % akustického tlaku, a to až do dopadu na hranu vady, podmínkou je ale kvalita povrchu testovaného materiálu. Má-li materiál povrchové vměstky či je-li zoxidovaný, tak úměrně tomu klesá i hodnota akustického tlaku povrchových vln. Defektoskopicky zkoumaný povrch nebyl zoxidovaný, ale gama stínění a hodnota jmenovité frekvence potvrzuje hodnotu korelace sondy MSW.

Dalším důležitým faktorem je hodnota útlumu jednotlivých ultrazvukových vln. Tento faktor ovlivňuje hodnotu hysteretických ztrát šířících se ultrazvukových vln, což vede k přeměně mechanické energie kmitajících částic hmotového prostředí na tepelnou energii. Tento faktor ovlivňuje jmenovitá frekvence sondy, rychlost, vlnová délka a konstanta absorpce šířících se vln. V ultrazvukové defektoskopii se vlnová délka





přepočítává na hodnotu milimetrů prostupu do daného materiálu. Podélné vlny mají hodnotu 1,58 mm, příčné vlny mají hodnotu 0,78 mm a povrchové vlny mají hodnotu 0,12 mm vlnové délky prostupujícího impulsu. Vzhledem k výše zmíněným principům a zákonům, není stále odůvodněná minimální hodnota korelace sondy MWB70. Byl předpoklad, že sonda MWB70 bude nejvíce ovlivnitelná vzhledem ke Snellova zákonu a její hodnotu korelace, lze skutečně vysvětlit pouze časoprostorovým ovlivněním energie vybuzených ultrazvukových vln ostatních sond. Toto ovlivnění muselo nejspíše nastat skokově, protože hodnoty naměřené hlukové expozice pro dané sondy tomu neodpovídají.

Pro vysvětlení tohoto předpokládaného fenoménu, je možné tuto hodnotu korelace vysvětlit na základě fyzikálních kmitajících systémů. Uvažuje-li se, že je ultrazvuková sonda představitelem kmitajícího systému, pak je charakterizována hodnotou činitele jakosti, energií kmitů a ztrátovým výkonem. Bere-li se, že je tento kmitající systém oscilátorem vynucených ustálených kmitů, pak je hodnota kinetické energie těchto kmitů přímoúměrná jejich čtverci amplitudy a nepřímoúměrná hmotnosti svého oscilátoru a současně i čtverci tlumení působícího hluku, čímž označíme proudový motor letadla, který je v tomto okamžiku také oscilátorem vynucených proměnných kmitů v závislosti na čase. Tímto lze oba oscilátory s vnějším buzením porovnat. Z hlediska ultrazvukové sondy se jedná o dvojici vázaných oscilátorů působící vzájemně pouze v jednom směru, a to směrem k sondě harmonických kmitů. Oscilátory se vzájemně liší vlastní frekvencí a podle kvadrátu vlastní frekvence mají i rozdílnou rezonanční frekvenci. Bere-li se úvaha vázaných oscilátorů, kdy je rezonanční chování sondy zprostředkovaně ovlivňováno prostřednictvím absorpcí a disperzí jejich amplitud, způsobila hluková expozice u podélných vln vyslaných sondou MSEB4 jejich hysteretní ztráty. A naopak u příčných vln došlo k umocnění šířící se příčné vln prostřednictvím postupných vln ve shodném směru. Okamžitý součet výchylek interferujících vln způsobil lineární polarizování vln. Amplituda takovýchto vln je poté následně dvojnásobná, za předpokladu je-li jejich rozdíl vzájemných drah roven sudému počtu půlvln. Díky tomuto jevu mohla sonda MWB70 dosáhnout tak nečekaného účinku (*VIZ TABULKA 21*).



Toto skládání kmitů působící akustické expozice a vliv teploty na pracovišti, ovlivnil výsledky všech použitých sond s piezoelektrickým měničem jednotně. Na základě vzájemného porovnání výsledků měření jednotlivých sond, při jejich úspěšnosti odhalit povrchové či podpovrchové vady testovaného materiálu, se přesto potvrdila fyzikální podstata a charakter jednotlivých ultrazvukových vlnění šířících se prostředím, o kterých je pojednáváno ve zprávách zabývajících se:

- *ztráty odrazem pro měření útlumu s kontaktní vazbou č. 34. 7. 0036 SVÚM Praha, říjen 1978*
- *Chyba bodu výstupu na měrce K1 a K2 a přenášení této chyby do měření úhlu lomu; H.L. Carson IIW Doc. VC – 130 – 68/OE*

**Tabulka 21 - Účinnost jednotlivých sond na hodnotě zpětného echa v průběhu měření**

Typ sondy UT:	Průměrná intenzita zpětného signálu sondy:
MSEB 4	62,4
MWB 70-4	53,6
MWB 60-4	54,6
MWB 45-4	56,2
MSW	56,6

Zdroj: Vlastní zpracování

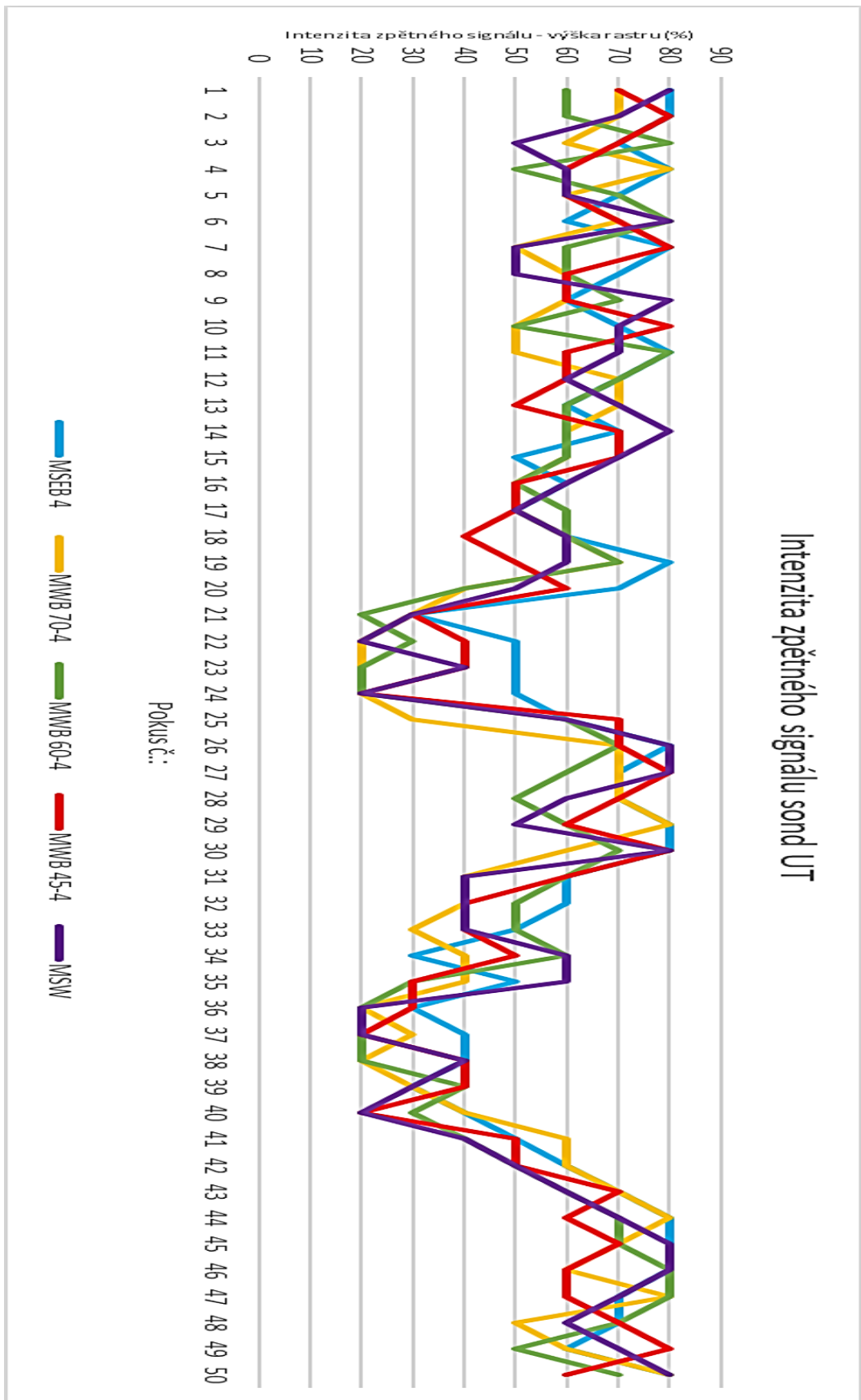
Statisticky (*viz graf 21*) porovnané výsledky ultrazvukového měření naopak vyvrací zažitou představu o přesnosti ultrazvukového měření pomocí metody Phased Array, Pitch – Catch, TOFD a jiných metod s využitím úhlových sond. Tyto metody využívají ke svému měření sadu úhlových sond a výkonný software defektoskopického přístroje, který moduluje sérii získaných výsledků z měření difrakce ultrazvukových vln na trhlinových hranách. Podle Huygensova principu dochází při difrakci dopadajících příčných vln na tvarové špičky trhlin k mnoha čtenému odrazu těchto bývalých příčných vln, které následně vytváří kulové vlny. Hodnotu těchto odražených znehodnocených tvarových ech následně moduluje software. Výsledek takového



měření je poté zatížen velkou chybou. Úhlové sondy využívané pro ultrazvukovou defektoskopii vysílají fokusované impulsy podélných ultrazvukových vln, které se podle Snellova zákona transformují v závislosti na jmenovitém úhlu lomu ultrazvuku.



Graf 12 - Znázornění účinnosti sond v průběhu měření





Zdroj: Vlastní zpracování

## Vyhodnocení vířivoproudé defektoskopie

Vlastnosti elektromagnetických vln šířících se hmotovým prostředím, při působení rušivých vlivů, jsou ovlivněny obdobnými vnitřními vlastnostmi látek, které ovlivňují i šíření akustických vln. Z tohoto důvodu bude statistické porovnání metody vířivých proudů založeno především na konstrukčních rozdílech jednotlivých sond.

Hodnotu šířících se ultrazvukových vln, ovlivňuje vnitřní setrvačnost a pružnost látek, přes které se dané vlny šíří. Setrvačnost lze vyjádřit hmotovou podstatou látek či případně matematicky jako jejich hustotu. Pružnost nebo-li elasticitu představují meziatomární síly materiálů, které jsou vyjádřeny modulem pružnosti. Tyto veličiny umožňují určit rychlost akustických vln a jejich následný odpor způsobený prostředím. Na základě této podstaty je ovlivněna i hodnota šířících se elektromagnetických vln hmotovým prostředím. V případě elektromagnetických vln je setrvačnost nahrazena magnetickým polem daných látek, které lze vyjádřit hodnotou permeability a elasticita látek je nahrazena elektrickým polem nábojů, jejíž hodnotu lze vyjádřit permitivitou.

Všechny použité vířivoproudé sondy oscilační cívku obvodově vinutou ve dvou konfiguracích, a to buď jako absolutní či diferenciální sonda v můstkovém či odrazovém zapojení. Tyto tužkové sondy mají stínění tvořené z měkké feromagnetické slitiny, která má ale ze všech možných druhů stínění nejmenší účinnost. Přes tuto slitinu obtížně prochází magnetické pole, což v samotném důsledku ovlivňuje i hodnotu hodnotu vířivých proudů a přesnost defektoskopie jako takové, protože v samotném důsledku to může vést ke zvětšování amplitudy, která ovlivňuje vlastní indukčnost cívky a ta se dostává do rezonance. To, že stínění cívky zvyšuje její indukčnost, vypadá na první pohled jako skvělá vlastnost, ale u rezonančních vázaných obvodů o stejné frekvenci, je toto velmi nežádáný jev. Feromagnetické stínění zvyšuje indukčnost cívky tak, jako kdyby došlo k navýšení počtu jejích závitů. To má za následek odezvy signálů, které se v průběhu měření objevovali na displeji. Tento nežádoucí přenos energie z cívky na cívku ovlivňoval, jak nízkofrekvenční, tak i vysokofrekvenční obvody. Těmito rezonančně ovlivňovanými sondami byly absolutní sondy v můstkovém zapojení (*viz tabulka 22*).



**Tabulka 22 - Korelace účinnosti vířivoproudých sond v závislosti na rušivých vlivech prostředí**

Typ sondy ET	Teplota (°C):	Hluková expozice (dB):
MP.060-60BL	-0,224	-0,297
MRL/A /90.5 /6	-0,186	-0,238
M7L9003-60	-0,313	-0,529
MM7L9003-50	-0,325	-0,378
M7L905-60	-0,183	-0,226

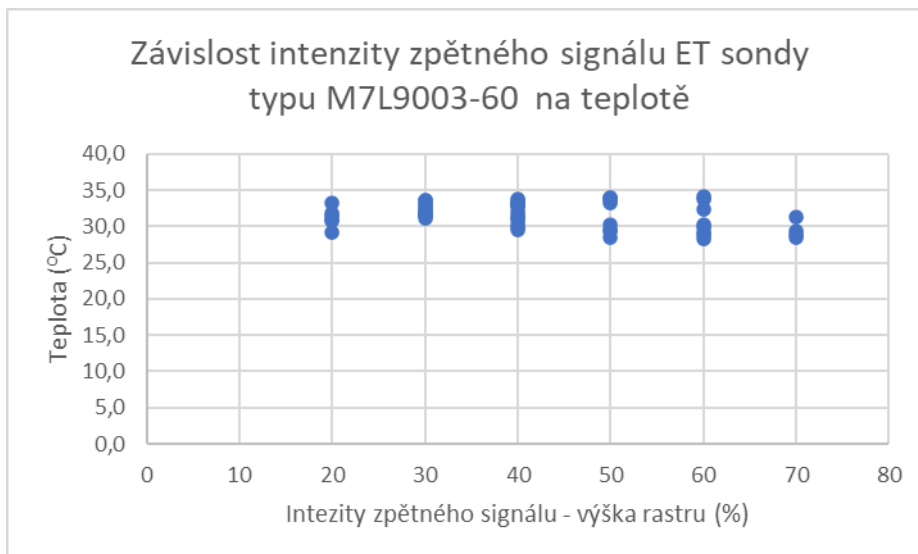
Zdroj: Vlastní zpracování

Po statistické analýze naměřených (*graf 13, 14, 15, 16*), dat při kvalitativní defektoskopie vířivých proudů, se zjistilo, že předpoklad plošné silné korelace vířivoproudých sond na teplotě byl z části mylný. Vzájemné statistické porovnání účinnosti sond intenzity zpětného signálu, lze hodnotit z hlediska typu zapojení obvodu a výjimečně na základě jmenovité frekvence

Nejvíce ovlivnitelným typem jsou absolutní sondy v můstkovém zapojení. Nejsilnější korelaci na teplotě a hlukové expozici má sonda typu M7L9003-60 a sonda MM7L9003-50. jedná se o absolutní sondy s můstkovým zapojením. Jednotlivé sondy mají rozdílnou jmenovitou frekvenci, ale podle postupů výrobce byly kalibrovány na shodnou hodnotu 200 kHz.

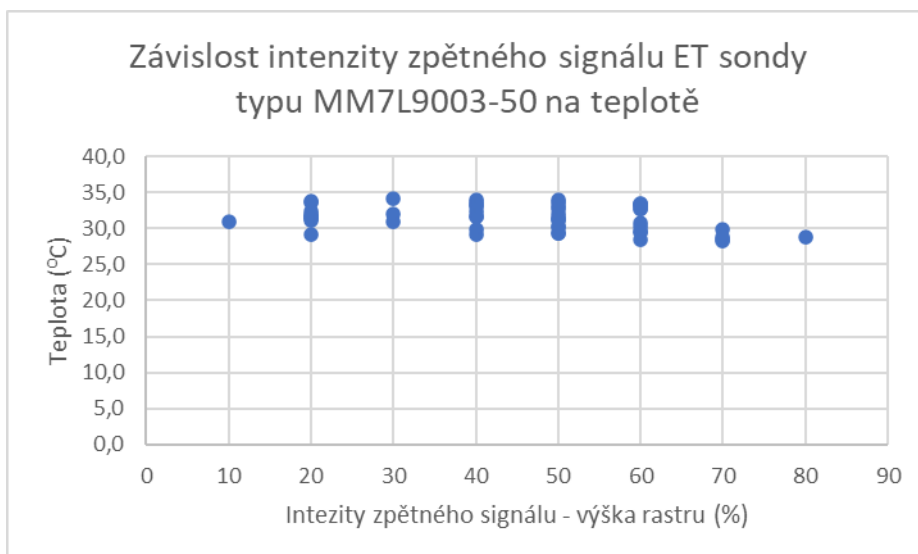


**Graf 13 - Korelace účinnosti sondy M7L9003-60 na teplotě**



Zdroj: Vlastní zpracování

**Graf 14 - Korelace účinnosti sondy MM7L9003-50 na teplotě**

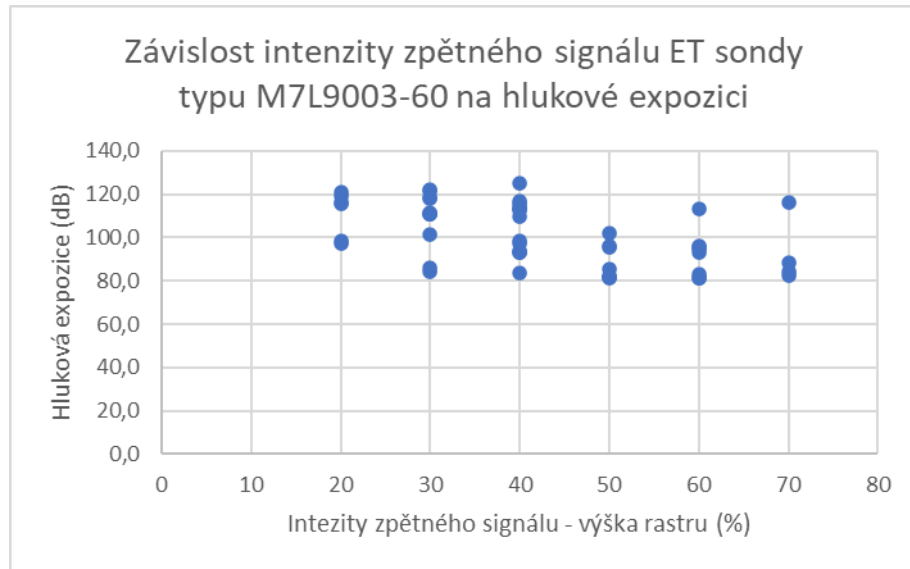


Zdroj: Vlastní zpracování



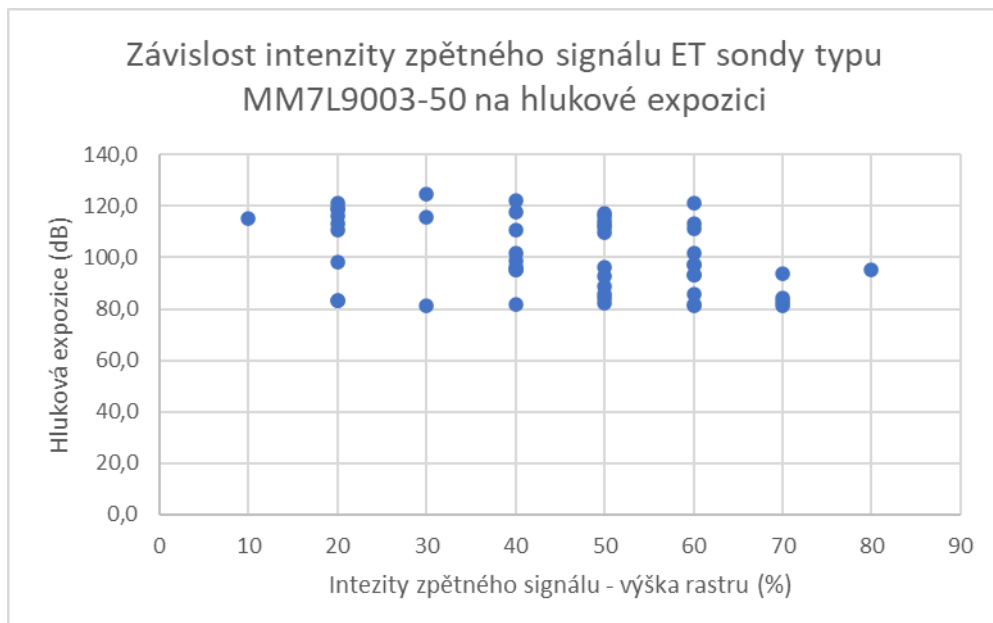


**Graf 15 - Korelace účinnosti sondy M7L9003-60 na hlukové expozici**



Zdroj: Vlastní zpracování

**Graf 16 - Korelace účinnosti sondy MM7L9003-50 na hlukové expozici**



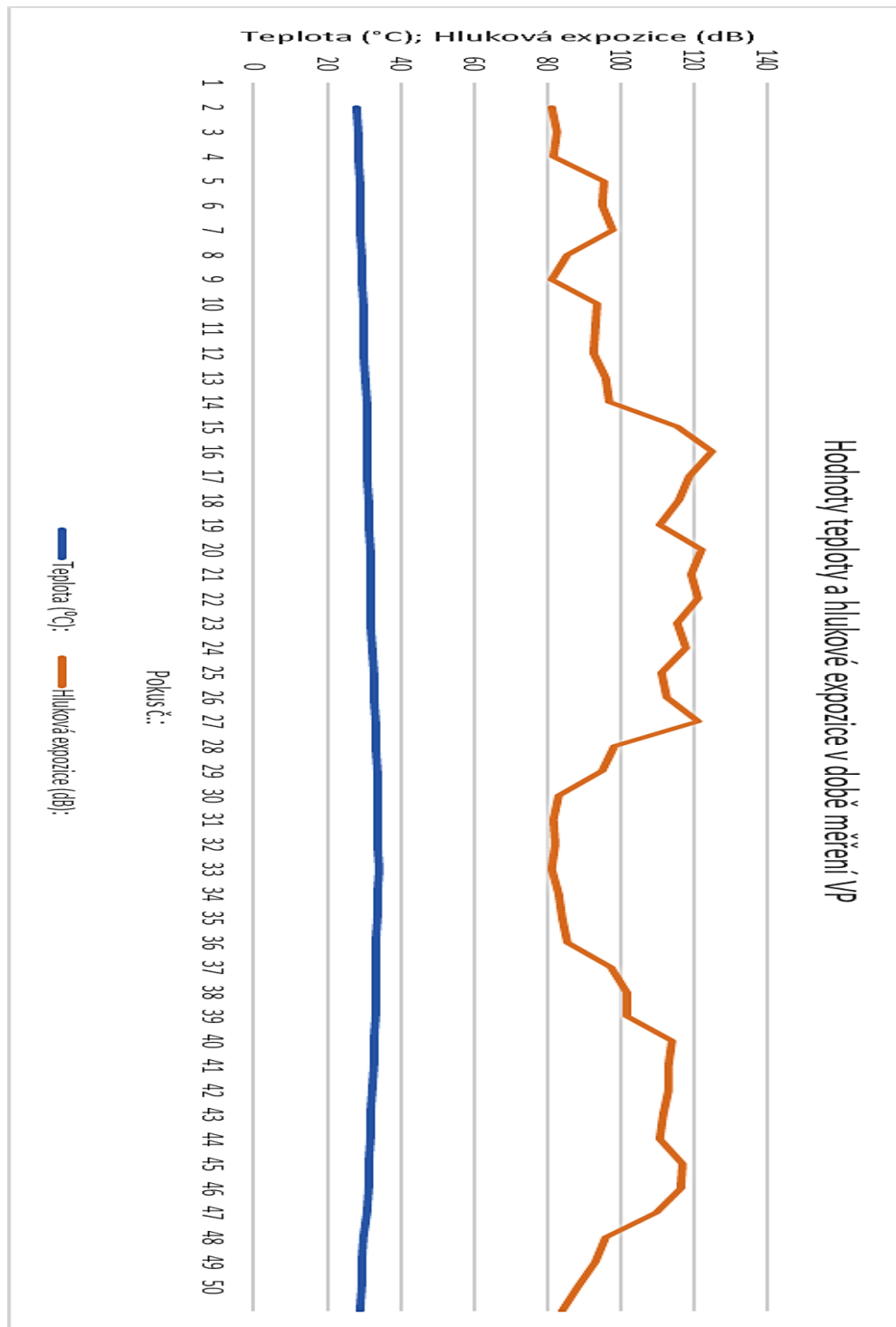
Zdroj: Vlastní zpracování



Absolutní sondy jsou nejčastěji používaným typem tužkových vířivoproudých sond a měří na základě vyhodnocení změny vlastní impedance. Tyto sondy mají v obvodu buďto jednu měřicí cívku a v připojovacím konektoru je cívka vyrovnávací, nebo je tato vyrovnávací cívka součástí samotného měřicího obvodu, což je nevhodné řešení. Dané cívky jsou v obvodě zapojeny můstkově, což znamená, že jakákoliv změna způsobená rozdílem impedance se projeví jako výchylka na jejíž hodnotě se indikuje vada. Není-li hodnota indukčnosti měřicí cívky přibližná hodnotě vyrovnávací cívky, kdy tato nerovnováha systému může být způsobena tepelným ovlivněním, tak nastává výrazné snížení citlivosti sondy a dojde ke vzniku silného šumu v systému. Sondy v konfiguraci můstkového zapojení reagují nejenom na změnu impedance, ale též i na změnu vodivosti testovaného materiálu a změnu teploty. Ovlivnění citlivosti těchto sond lze vyjádřit z grafického průběhu průměrné teploty, která neměla tak lineární průběh (*viz graf 17*) jako u ultrazvukové defektoskopie. Průběh zpětného signálu indukující vada, byl u těchto sond při porovnání s ostatními sondami nejméně čitelný.



Graf 17 - Průběh rušivých vlivů při vířivoproudé defektoskopii



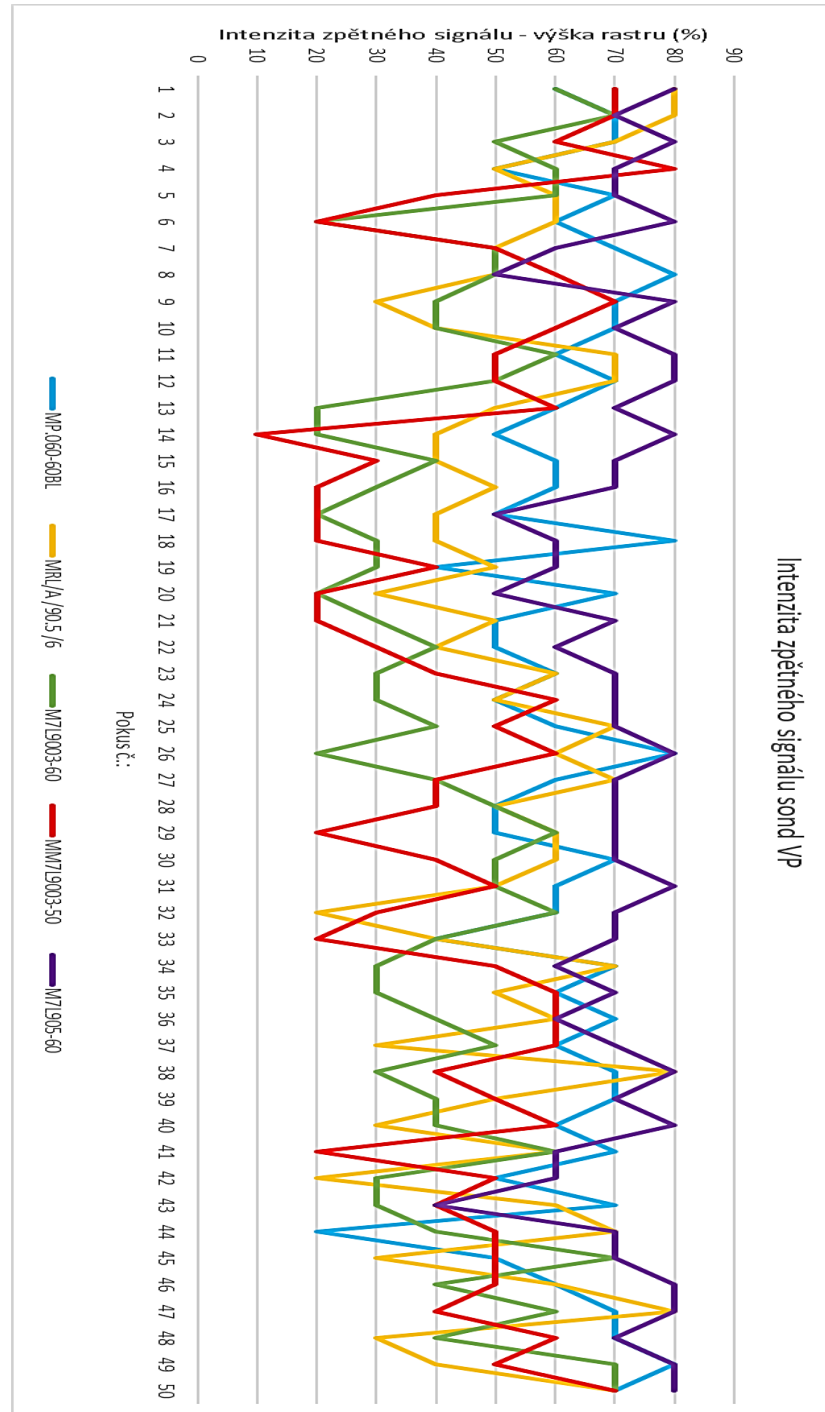
Zdroj: Vlastní zpracování

Takovouto saturaci signálu způsobuje především typ zapojení elektronického obvodu, přesto bylo možné na základě statistického vyhodnocení dat, získat nejlepší



výsledky s využitím absolutní sondy s můstkovým zapojením typu M7L905-60 (viz graf 18).

Graf 18 - Grafické znázornění účinnosti vířivoproudých sond v průběhu měření

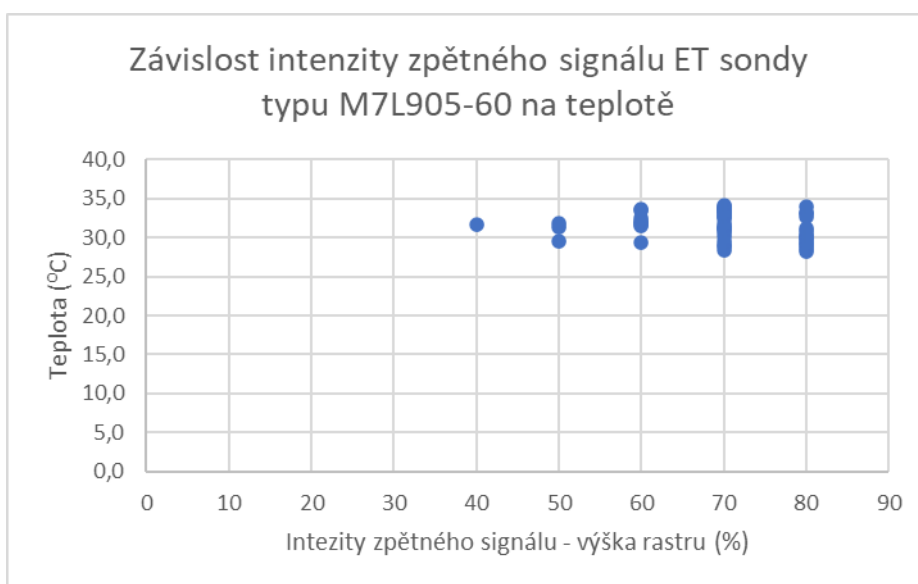


Zdroj: Vlastní zpracování



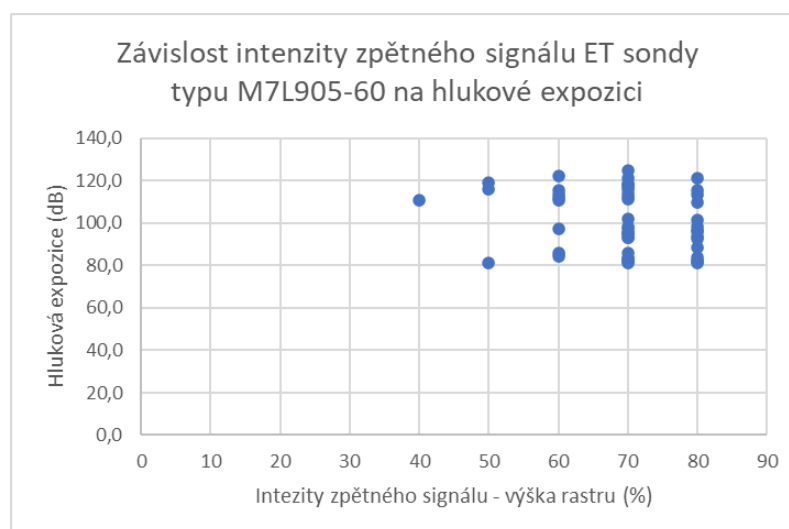
Tímto bylo dokázáno, že hodnota frekvence má vliv na citlivost sond, přestože výrobce uvádí pracovní frekvenci využitelnou pro defektoskopii povrchových vad na hodnotu 200 kHz, tak stochastickým zvýšením pracovní frekvence sondy, z důvodu rozsahu její jmenovité frekvence, byly získány nejlepší výsledky z vířivoproudé defektoskopie a s ohledem na její minimální korelaci (viz graf 19,20,21,22 )

**Graf 19 - Korelace účinnosti sondy typu M7L905-60 na hlukové expozici**



Zdroj: Vlastní zpracování

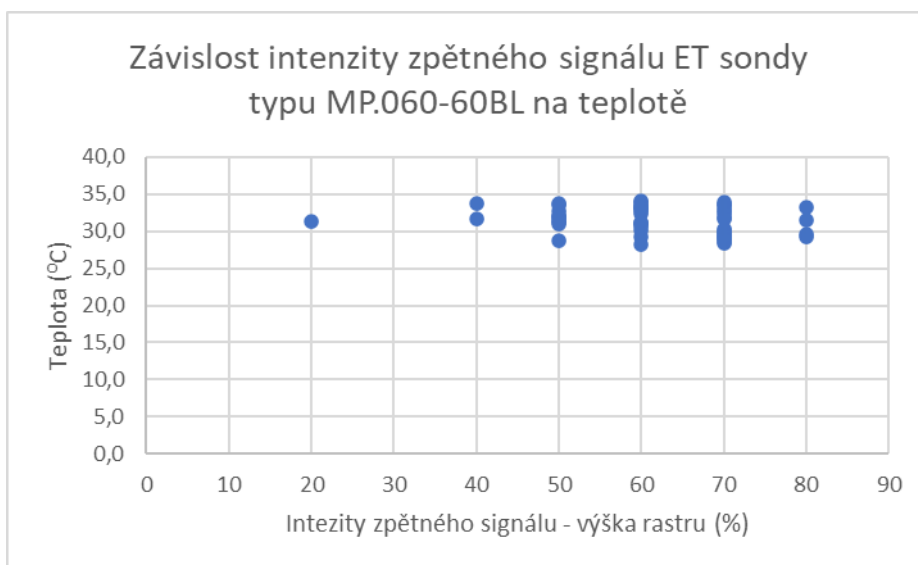
**Graf 20 - Korelace účinnosti sondy typu M7L905-60 na hlukové expozici**





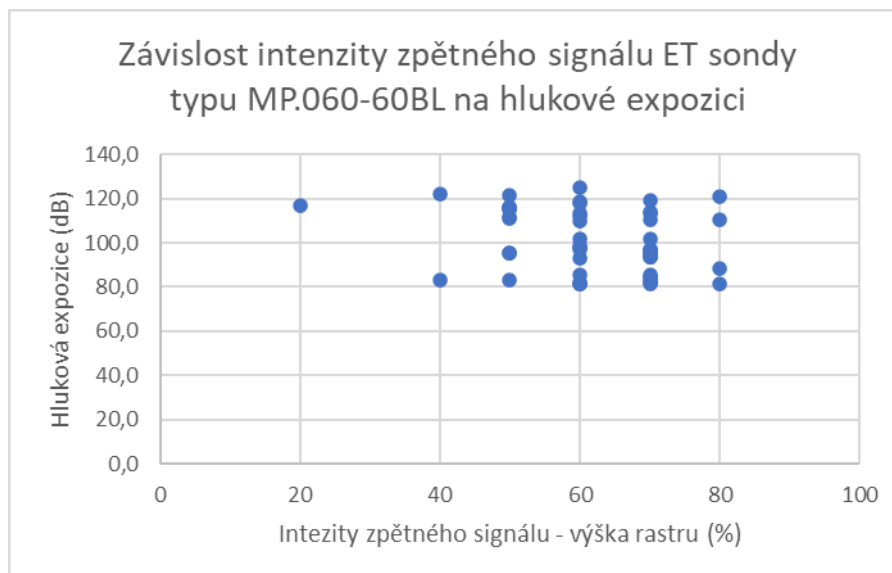
Zdroj: Vlastní zpracování

Graf 21 - Korelace účinnosti sondy MP.060-60BL na teplotě



Zdroj: Vlastní zpracování

Graf 22 - Korelace účinnosti sondy MP.060-60BL na hlukové expozici



Zdroj: Vlastní zpracování

U další sondy s můstkovým zapojením již hodnota jmenovité frekvence příliš vliv na citlivost snímání neměla, zde tedy nastávala opět mylná odezva obvodu s ohledem na korelaci s rušivými vlivy. Takovýmto případem je diferenciální sonda typu MP.060-60BL.



Tato diferenční sonda, indikovala na rastru displeje zcela nejlepší pozici. Průběh signálu za jednu otočku sondy okolo vady, naprosto přesně znázorňuje hrany defektoskopicky zkoumané vady. Diferenční vady měří na základě vyhodnocení rozdílné impedance mezi dvěma oscilačními vynutími, čímž je tato sonda i pro měření citlivější. Podstatou měření této sondy je rozdílná hodnota impedance cívky, která je v blízkosti vady vyplněné vzduchem a hodnoty impedance cívky, která je v oblasti kompaktního materiálu. Podle výrobce sondy, umožňuje tato konstrukční konfigurace snížit citlivost obvodu na kolísající teplotu a zvýšit citlivost na detekci vad, přičemž signál neodhalí její střed, ale pouze přední a zadní hranu vady. Stabilní citlivost sondy vůči kolísající teplotě nebyla hodnotou korelace potvrzena, ale charakter signálu potvrzující vadu potvrzen byl a sonda jako taková měla jednu z nejvyšších hodnot intenzity zpětného signálu (*viz tabulka 23*).

**Tabulka 23 - Účinnost jednotlivých vířivoproudých sond na hodnotě zpětného echa v průběhu měření**

Typ sondy ET	Průměrná intenzita zpětného signálu sondy:
MP.060-60BL	61,6
MRL/A /90.5 /6	52,4
M7L9003-60	42,6
MM7L9003-50	45,2
M7L905-60	69,6

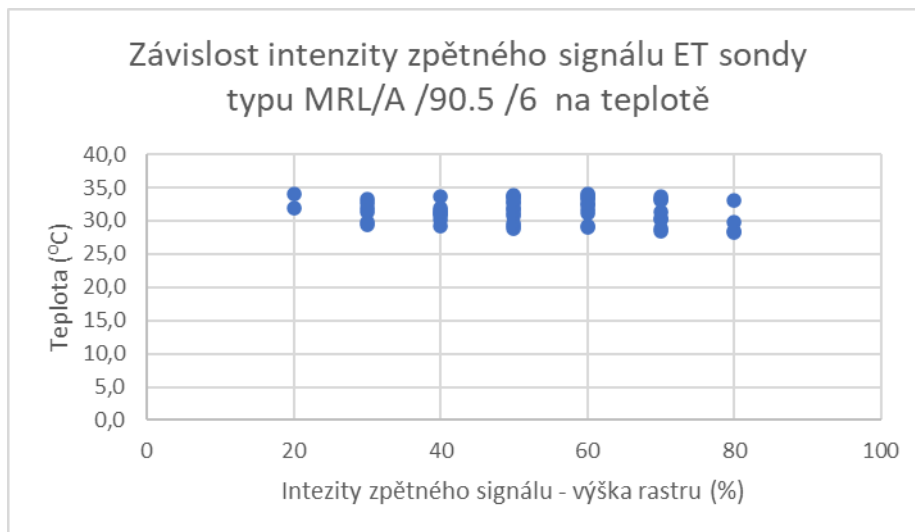
Zdroj: Vlastní zpracování

Jako jediná sonda typu MRL/A /90.5 /6 neměla můstkové zapojení. Jedná se o absolutní sondu odrazového typu, která má stejně jako diferenční sonda dvě cívky, jednu vysílací a druhou pouze přijímací, přičemž indukční cívka produkuje velmi silné magnetické pole, čímž se zvyšuje i citlivost sondy a zmírňuje ovlivnění. Tato sonda zobrazovala nejplynulejší přechod mezi odezvami signálu vířivých proudů (*viz graf 23,24*).



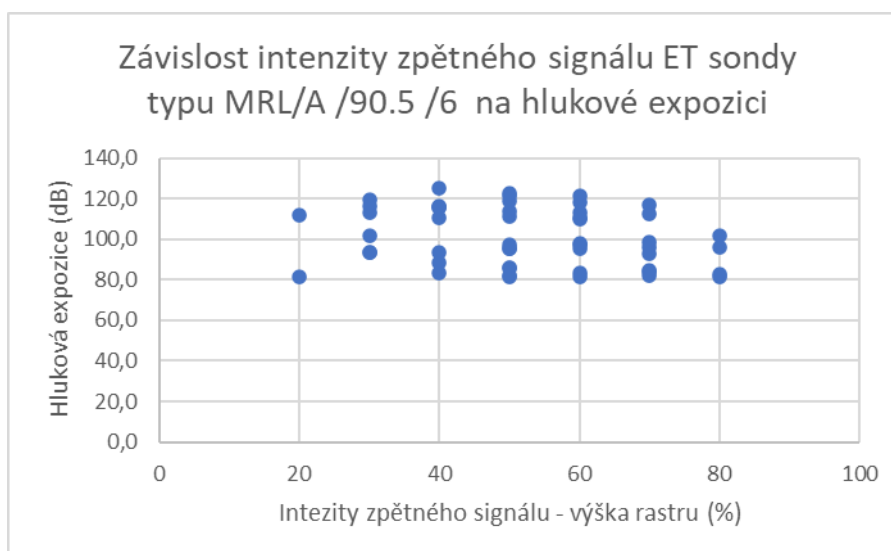


**Graf 23 - Korelace účinnosti sondy MRL/A /90.5 /6 na teplotě**



Zdroj: Vlastní zpracování

**Graf 24 - Korelace účinnosti sondy MRL/A /90.5 /6 na hlukové expozici**



Zdroj: Vlastní zpracování

### Vzájemné porovnání metody vířivých proudů a ultrazvukové defektoskopie

Vzhledem ke statistické analýze dat, vyplývá, že v počtu úspěšně provedených měřících pokusů (viz tabulka 24), které vedly k odhalení vady, vykazuje metoda ultrazvukové defektoskopie vyšší četnost úspěšných měřících pokusů, nežli je tomu u metody vířivých proudů. S přihlédnutím na složitost a náročnost prováděné



ultrazvukové defektoskopie, by tato hodnota úspěšnosti ultrazvukové defektoskopie mohla být ještě vyšší, protože se u ultrazvukové defektoskopie hodnotil i takový výsledek, který ovlivnila obsluha ultrazvukového defektoskopu tím, že vymáčkla vazební prostředek mezi sondou a měřeným povrchem, což vedlo ke zhoršení přesnosti měření. Obzvláště pak byl tento problém významný u sondy MSW, která má velmi malé tělo a obtížně se drží.

**Tabulka 24 - Počet úspěšně provedených měřících pokusů jednotlivých metod**

Počet přesných měření	Vířivé proudy	Ultrazvuk
Úspěšné (1)	211	214
Neúspěšné (0)	39	36

Zdroj: Vlastní zpracování

Při porovnání četnosti úspěšných měřících pokusů jednotlivých metod s využitím různých sond, vykazuje ultrazvuková defektoskopie s použitím daných sond takřka obdobné výsledky (*viz tabulka 25, 26*), přičemž rozdíl v úspěšnosti mezi sondou MSEB4 a MWB70, se očekával větší. Naopak u metody vířivých proudů (*viz graf 25,26*) je podle četnosti úspěšných měřících pokusů významný rozdíl mezi jednotlivými sondami, což odpovídá i konstrukčním problémům použitých sond a v samotném závěru i rozdílné průměrné teplotě v daném okamžiku na pracovišti.

**Tabulka 25 - Srovnání úspěšné četnosti měřících pokusů jednotlivých ultrazvukových sond**

Počet přesných měření	MSEB 4	MWB 70-4	MWB 60-4	MWB 45-4	MSW	Celkem
Úspěšné (1)	46	40	41	44	43	214
Neúspěšné (0)	4	10	9	6	7	36

Zdroj: Vlastní zpracování

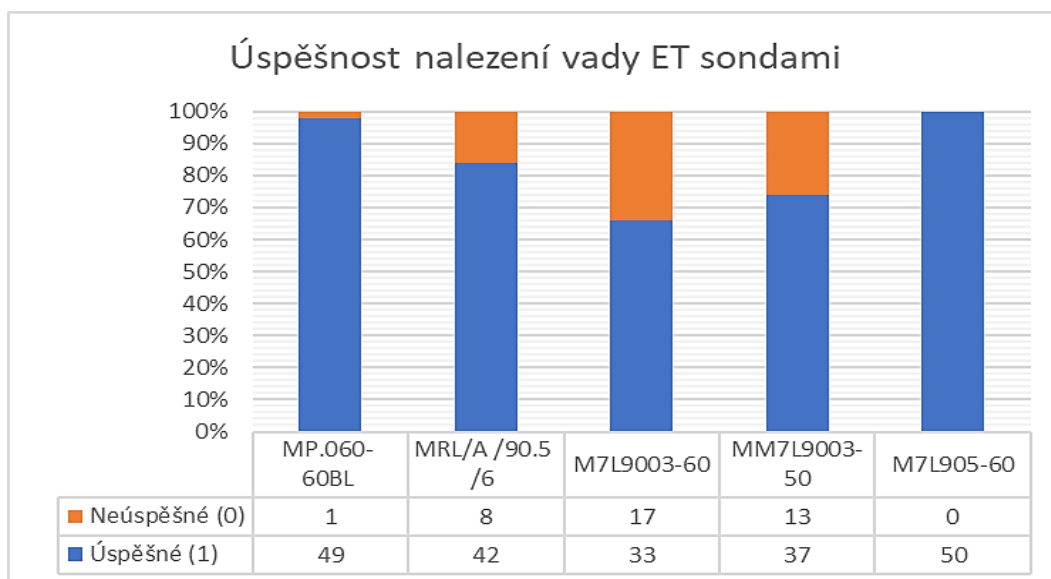


**Tabulka 26 - Srovnání úspěšné četnosti měřících pokusů jednotlivých vířivproudých sond**

Počet přesnosti	MP.060-60BL	MRL/A /90.5 /6	M7L9003-60	MM7L9003-50	M7L905-60	Celkem
Úspěšné (1)	49	42	33	37	50	211
Neúspěšné (0)	1	8	17	13	0	39

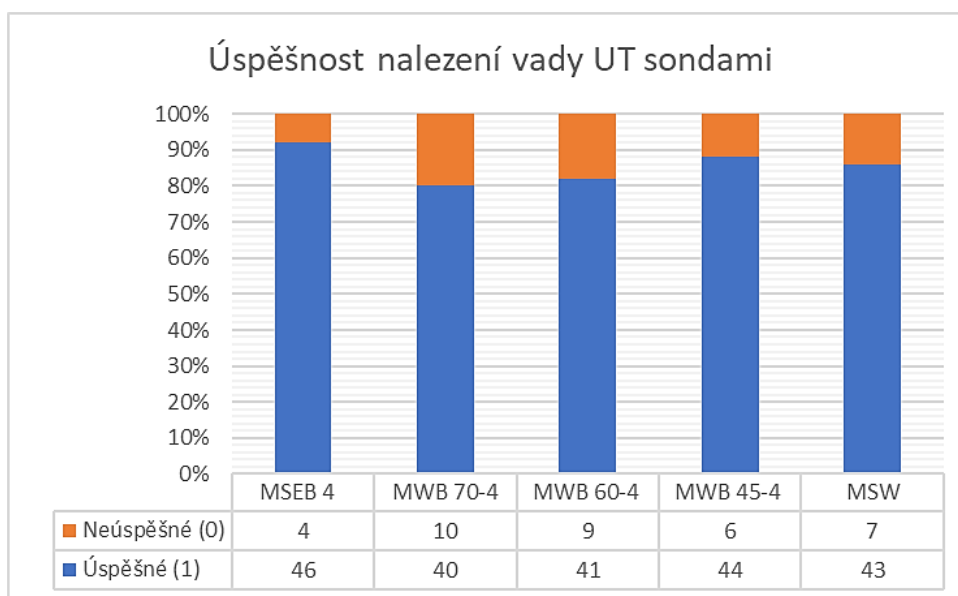
Zdroj: Vlastní zpracování

**Graf 25 - Procentuální srovnání úspěšnosti měřících pokusů jednotlivých vířivproudých sond**



Zdroj: Vlastní zpracování

**Graf 26 - Procentuální srovnání úspěšnosti měřících pokusů jednotlivých ultrazvukových sond**



Zdroj: Vlastní zpracování



## Závěr

Tato práce poukazuje na důležitý aspekt nezastupitelnosti jednotlivých defektoskopických metod. Jediná, byť univerzální metoda nedestruktivní defektoskopie není puncem kvality defektoskopicky kontrolovaného materiálu. Obecným cílem této práce bylo porovnání účinnosti jednotlivých defektoskopických metod, které jsou založeny na šíření kmitajícího detekčního média hmotovým prostředím. Z výsledku statistické analýzy účinnosti jednotlivých defektoskopických metod je patrné, že je ultrazvuková defektoskopie o tři měřící pokusy přesnější. Tento výsledek ale nevykazuje náročnost prováděných defektoskopických kontrol.

Z poznatků a zkušeností získaných při zpracovávání této práce, lze říci, že mnoho subjektů, u kterých byla prováděná konzultace za účelem získání praktických poznatků, využívala metody nedestruktivní defektoskopie jako procesu, který není součástí údržby strojů a pouze stojí hodně peněz. Jestliže se zavede taková podniková politika a náhled na podstatu defektoskopických zkoušek, tak dochází u většiny defektoskopických pracovníků k vytvoření takového úsudku, že jim defektoskopicky kontrolovaný předmět je ještě před jejich kontrolou bezvadný a neočekává, že by mohl obsahovat nějaké defekty, a proto mnohdy využije pouze jednu defektoskopickou metodu.

Defektoskopické metody jsou součástí technické diagnostiky, a z hlediska údržby jako takové, jejíž podstatou je provozní péče strojů za vynaložení optimálních nákladů, by se mělo variabilně měnit postavení výjimečnosti těchto metod, v závislosti na aktuálně prováděné defektoskopické kontrole. Z poznatků získaných praxí u pana Ing. Prose a konzultací s Czech Airlines Technics, a.s., by se mělo volit pořadí prováděných kontrol v závislosti na velikosti kontrolované plochy, a to bez ohledu na působení rušivých vlivů. Kontroluje se materiál o rozměru několika metrů, tak se tento prostor zúží selektivním měřením např. pomocí magnetické defektoskopie, poté se provede vířivoproudá defektoskopie zmenšeného prostoru, a nakonec pro přesné lokalizování se provede ultrazvuková defektoskopie.

*Poznámka autora: I v navazujícím studiu na ČZU – IUB bych se rád zabýval problematikou ultrazvukové a vířivoproudé defektoskopie a výrobou jejich měřících sond, pod vedením prof. Ing. Martina Pexy, Ph.D.*



## Seznam použité literatury

- ABDULMUTTALIB ABDULKAREEM MUHSEN, 2021. *Non-Destructive Testing Methods and their Application in Technology*. 2021. B.m.: Warsaw University of Technology. Získáno z: [https://www.researchgate.net/publication/355889692\\_Non-Destructive\\_Testing\\_Methods\\_and\\_their\\_Application\\_in\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/355889692_Non-Destructive_Testing_Methods_and_their_Application_in_Technology)
- ADAM KOZAKIEWICZ a , MACIEJ ADAMCZYK, MACIEJ MAJCHER, 2022. *Determination of Ranges of Unstable Operation of Axial Compressor for Aircraft Turbine Engines*. 2022. B.m.: Military University of Technology, Faculty of Mechatronics, Armament and Aerospace Technology 2 Sylwestra Kaliskiego Str., 00-908 Warsaw, Poland. Získáno z: <https://bibliotekanauki.pl/articles/2073829.pdf>
- AHMARAN, 2006. *NON-DESTRUCTIVE TESTING*. 2006. Získáno z: <https://web.itu.edu.tr/~arana/ndt.pdf>
- ALI H. MUTIB, 2018. *Turbo-Prop Engine*. 2018. B.m.: London Aeronautical Techniques Engineering Aircraft Engines. Získáno z: <https://cnj.atu.edu.iq/wp-content/uploads/2020/03/Turbo-prop-111engines.pdf>
- B. ATZORI, G. MENEGHETTI, 2012. *NOTCH AND DEFECT SENSITIVITY OF ADI IN TORSIONAL FATIGUE*. 2012. B.m.: Department of Mechanical Engineering University of Padova. Získáno z: <https://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/esis/ECF16/paper/viewFile/7322/3801>
- BISGROVE, P., Hayward, P, 2001. *Guidebook for the Fabrication of Non-Destructive Testing (NDT) Test Specimens*. 2001. B.m.: Sonaspection International Ltd, United Kingdom; Certification Board for Inspection Personnel, New Zealand. Získáno z: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TCS-13.pdf>
- СССР, СССР, 1975. *vrtule AV-72 sér. 02A a AB-72T sér. 02A - ВОЗДУШНЫЕ ВИНТЫ АВ-72 сер. 02A u AB-72T сер. 02A*. B.m.: Ministerstvo civilního letectví - МИНИСТЕРСТВО ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ. Manuál a údržba - Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию. ISBN CJSC "АНТС „TECHNOLOG" - ЗАО "АНТЦ „ТЕХНОЛОГ".
- DOC. ING. NEŠTRÁK, CSC. ING. PILA PH.D., 2006. *učební texty pro teoretickou přípravu techniků údržby letadel dle nařízení komise ES 2042/2003 PART 66*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 80-7204-484-2.
- EPSON, 2000. *Manuál USN 52R / USN 52L*. 2000. B.m.: Krautkramer USN 52R/USN 52L. Získáno z: <https://www.scribd.com/document/332307549/USN-52-Manual-pdf#>
- G. DIMITRIADIS, O. Léonard, 2016. *Aircraft Propulsion*. 2016. B.m.: universite de liege. Získáno z: <http://www.ltas-cm3.ulg.ac.be/AERO0023-1/ConceptionAeroTurbomachine.pdf>
- GIWA TEMITAYO, 2018. *Non-Destructive Testing: Principle, Procedure and Applications*. 2018. B.m.: Mechanical Engineering SteemSTEM Writer. Získáno z: <https://steemit.com/stemng/@temitayo-pelumi/non-destructive-testing-principle-procedure-and-applications>
- I. J. DAY WHITTLE LABORATORY CAMBRIDGE, UNITED KINGDOM, 1993. *The Unstable Behavior of Low and High Speed Compressors*. 1993. B.m.: THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS 345 E. 47th St., New York, N.Y. 10017. Získáno z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=64ee09c8654d59b994cceed7dd750c0f17440e86>



- ING. VIKTOR ŽÁRSKÝ, 2019. *Technické podmínky pro vibrodiagnostiku strojních zařízení ŠkodaAuto*. 2019. B.m.: ŠkodaAuto. Získáno z: [https://az749841.vo.msecnd.net/sitesencom/alv1/564b5f46-5260-4374-8b29-d1cbb8af3a08/1\\_16\\_C.0bd934e9574e256b0311d3f11cd8a6ca.pdf](https://az749841.vo.msecnd.net/sitesencom/alv1/564b5f46-5260-4374-8b29-d1cbb8af3a08/1_16_C.0bd934e9574e256b0311d3f11cd8a6ca.pdf)
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 2004. *Non-destructive Testing: A Guidebook for Industrial Management and Quality Control Personnel*. 2004. B.m.: IAEA-TCS-9. Získáno z: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20043503>
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA, 2013. *Training Guidelines in Non-Destructive Testing Techniques*. 2013. B.m.: Radioisotopes Products and Radiation Technology Section. Získáno z: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TCS\\_54\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TCS_54_web.pdf)
- JIŘÍ BARTÁK, 2020. *Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení. Česká svářečská společnost ANB*. 19. září 2020. B.m.: CWS ANB. Získáno z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
- JIŘÍ HEJNA, 2018. *MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK MODELOVÉHO DMYCHADLA*. 2018. B.m.: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STROJNÍ ÚSTAV LETADLOVÉ TECHNIKY. Získáno z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79940/F2-BP-2018-Hejna-Jiri-Mereni%20charakteristik%20modeloveho%20dmychadla.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- JONAS HALLBÄCK, 2017. *Nedestruktivní zkoušky v SKF*. 2017. B.m.: SKF Evolution. Získáno z: <https://evolution.skf.com/cs/nedestruktivni-zkousky-v-skf/>
- KOSMELOVÁ IVANA, 2020. *Normy CAA-ZLP-121, AML Part-66*. 2020. B.m.: Úřad pro civilní letectví. Získáno z: <https://www.caa.cz/wp-content/uploads/2019/07/121-2-AML-Part-66.pdf?cb=7e6df3b1dd01dedb305dfa3e2030253c>
- KRAUTKRAMER AND NUTRONIK, 2008. *ultrazvukové sondy*. 2008. B.m.: GE Sensing & Inspection Technologies. Získáno z: [https://www.aaatesters.com/NDT\\_Inspection/Material/krautkramer-mwb45-n4-transducer-model-mwb45n4-krautkramer-mwb45.html](https://www.aaatesters.com/NDT_Inspection/Material/krautkramer-mwb45-n4-transducer-model-mwb45n4-krautkramer-mwb45.html)
- LETIŠTĚ PRAHA, A.S, 2011. *Měření a hodnocení hluku*. 2011. B.m.: Praha - Životní prostředí EU ročenka RZP11. Získáno z: [https://envis.praha.eu/rocenky/Pr11\\_pdf/RZP11\\_kapB5.pdf](https://envis.praha.eu/rocenky/Pr11_pdf/RZP11_kapB5.pdf)
- LUIS SAN ANDRES, 2019. *Torsional Vibrations – a (twisted) Overview*. 2019. B.m.: Texas A&M University - Mechanical Engineering Department, January 2018. Získáno z: <https://rotorlab.tamu.edu/me459/NOTES%209%20Torsional%20Dynamics%20Overview.pdf>
- MIRCO PERON, 2018. *Fracture behaviour of notched as-built EBM parts: characterization and interplay between defects and notch strengthening behaviour*. 2018. B.m.: Department of Industrial and Mechanical Engineering, Norwegian University. Získáno z: [https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2587232/Fracture+behaviour+of+notched+as-built+EBM+parts\\_v247062.pdf?sequence=2](https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2587232/Fracture+behaviour+of+notched+as-built+EBM+parts_v247062.pdf?sequence=2)
- NPOR. ING. SUCHÝ, Ondřej a František KPT. ING. TUČEK, 1984. *Základní údaje o letounu AN - 24/26 drak - motor*. 1986 1984. B.m.: AČR.
- OBRAZ, Jaroslav, 1984. *Ultrazvuk v měřící technice*.
- PAWEL BERZYNSKI, Slawomir Marczynski, 2014. *Advances in Imaging and Electron Physics*. Institute of Physics, West Pomeranian University of Technology, Szczecin 70-



- 310, Polsko. Získáno z: <http://eprints.uanl.mx/9177/1/Jose-Yacaman%20et%20al.%20-%202013.pdf>
- PROF. BHASKAR ROY, Prof. A M Pradeep, 2015. *Mod-01 Lec-12 Instability in Axial Compressors*. 2015. B.m.: Department of Aerospace Engineering, IIT Bombay. Získáno z: <https://www.youtube.com/watch?v=s-7f3UAE23A&t=2724s>
- PROF. ENG. ANTON PANDA, PHD, 2021. *USE OF VIBRODIAGNOSTICS TO PREDICT PHENOMENA IN SERIAL AUTOMOTIVE PRODUCTION*. 2021. B.m.: Faculty of Manufacturing Technologies with a seat in Presov, Technical University of Kosice, Sturova 31, 080 001 Presov, Slovakia. Získáno z: [file:///C:/Users/42073/Downloads/mmscience\\_2021-10\\_use-of-vibrodiagnostics-to-predict-phenomena-in-serial-automotive-production.pdf](file:///C:/Users/42073/Downloads/mmscience_2021-10_use-of-vibrodiagnostics-to-predict-phenomena-in-serial-automotive-production.pdf)
- PROF. ING. ŠTĚPÁNEK, DRSC A KOLEKTIV, 1989. *Příručka leteckého technika*. Praha: NAŠE VOJSKO. ISBN 28-088-89.05.
- RAINER GROH PHD, 2013. *Jet Engine Detail Design: The Compressor*. 2013. B.m.: Bristol Composites Institute (BCI) Department of Aerospace Engineering, University of Bristol Queen's Building, University Walk. Získáno z: <https://aerospaceengineeringblog.com/jet-engine-compressor/>
- RIFAT, Olgun, 2022. *Hluk ve městech - hladina hluku v kampusu na Cumhuriyet univertsit*. prosinec 2022. B.m.: Cumhuriyet univertsit. Získáno z: [https://www.researchgate.net/publication/324169086\\_Assesment\\_of\\_on-Campus\\_Noise\\_Levels\\_at\\_Cumhuriyet\\_University](https://www.researchgate.net/publication/324169086_Assesment_of_on-Campus_Noise_Levels_at_Cumhuriyet_University)
- RICHARD A MARCELA REGAZZOVÁ, 2013. *Ultrazvuk: základy ultrazvukové defektoskopie*. B.m.: Praha: BEN - technická literatura. ISBN 978-80-7300-466-8.
- RNDR. DVOŘÁK; PPLK. MUDR. TRUSKA; ING. KELLER, 2019. *Učebnice pilota 2019 podle PART - FCL*. Příbram: Svět křídel. ISBN 978-80-7573-049-7.
- SEDLÁK, Bedřich, 2012. *Elektrina a magnetismus*. B.m.: Karolinum. ISBN 978-80-246-2198-2.
- THE AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, INC., 2012. *Non-destructive Testing*. 2012. B.m.: ASNT on Social Media. Získáno z: <https://ncr.indianrailways.gov.in/cris/uploads/files/1348828761350-NDT.pdf>
- VÁCLAV LEGÁT A KOL., 2016. *Management a inženýrství údržby*. B.m.: PBtisk Příbram. 2. ISBN 978-80-7431-163-5.
- ZBYNĚK ZAVADIL, 2017. *Národní rada NDT pro letectví a kosmonautiku ČR dle EN 4179/NAS410*. 2017. B.m.: Sekretář CZ NANDTB. Získáno z: [https://nandtb.cz/wp-content/uploads/2019/05/Interpretace\\_CZ\\_NANDTB\\_02-Auditor\\_Qualification-CZ.pdf](https://nandtb.cz/wp-content/uploads/2019/05/Interpretace_CZ_NANDTB_02-Auditor_Qualification-CZ.pdf)





## Přílohy

### Příloha 1 – Technická diagnostika prováděná na letecké technice

Převážná většina jednotlivých metod nedestruktivní defektoskopie v různých kombinacích, nalézají široké uplatnění v leteckém průmyslu při údržbě letadel. S ohledem na pravidelnost letu jednotlivých strojů, má nedestruktivní defektoskopie v rámci údržby letadel významné zastoupení. Fyzikálně chemické interakce jednotlivých metod nedestruktivní defektoskopie umožňují velmi rychle a bez potřeby rozsáhlé demontáže provádět diagnostiku aktuálního stavu letadla. S ohledem na nedostatek odborně školeného personálu inženýrské letecké služby a vysoký požadavek častého létání, se počáteční náklady do defektoskopických přístrojů, které zefektivňují údržbu rychle navrací. Díky rychlé návratnosti investic do přístrojů nedestruktivní defektoskopie, je možné vydržovat velké množství různorodých defektoskopických přístrojů, které umožňují vysokou rychlost a přesnost kontroly stroje, mnohdy bez potřeby odstávky (Doc. Ing. Neštrák, CSc. Ing. Pila Ph.D., 2006; RNDr. Dvořák; pplk. MUDr. Truska; Ing. Keller, 2019; prof. Ing. Štěpánek, DrSc a kolektiv, 1989).

Z důvodu udržení letadla ve špičkovém technickém stavu, se provádí jeho defektoskopické kontroly nejen na silově namáhaných částech, ale i na relativně stabilních letadlových soustavách, jakými je palivová soustava. Pro kontroly palivové soustavy, se využívá nepřímá vizuální defektoskopická kontrola buďto pomocí boroskopu, fybroskopu či videoskopu. Videoskopy umožňují prostorové skenování a měření. Jejich základní funkcí je stereoskopické měření a fázový posuv k trojrozměrnému objektu tzv. 3D phase measurment. Videoskopy využívají pro stereofotogrametrii CCD (Charge – Coupled Device) čipy barevného snímání. Tyto čipy mají svůj elektrický obvod elektronicky rozdělený na půlky, což umožní stanovit různé úhly pohledu pozorovaného předmětu, a tím vytvořit jeho trojrozměrný obraz, který je již schopný procesor videoskopu trigonometrickou funkcí vyčíslit a pomocí algoritmů dopočítat. Funkce fázového posuvu videoskopu je umožněna souborem laserových diod, které umožňují trojrozměrně a pod různými úhly rozsvítovat defektoskopicky kontrolovaný objekt. Následným skenováním je získána množina

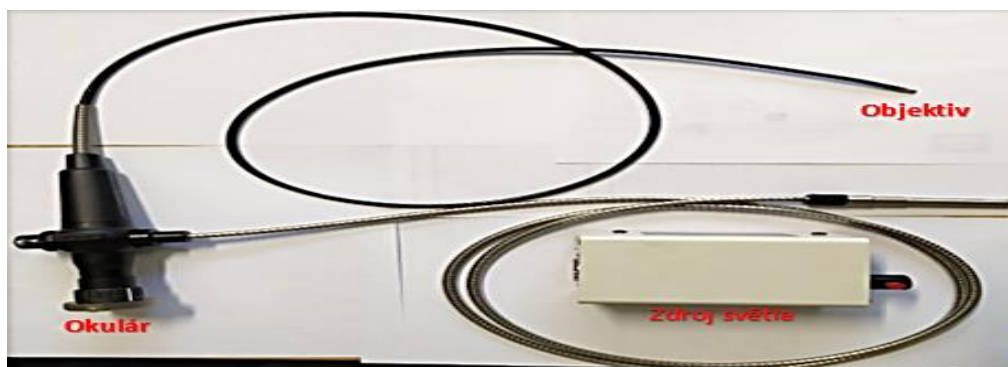


bodů na skenovaném povrchu testovaného materiálu. Endoskopickou kontrolou palivového systému se měří průchodnost palivové soustavy, množství palivových sedimentů, šlemů a cizorodých složek v prostředí palivové soustavy (Doc. Ing. Neštrák, CSc. Ing. Pila Ph.D., 2006; RNDr. Dvořák; pplk. MUDr. Truska; Ing. Keller, 2019; prof. Ing. Štěpánek, DrSc a kolektiv, 1989).

Nepřímá vizuální kontrola – Boroskopy Olympus pro kontrolu drakových částí  
letadla



Nepřímá vizuální kontrola – Fybrokop Machida pro kontrolu silových systémů letadla a vrtulníků



Nepřímá vizuální kontrola – Videoskop Olympus pro universální využití na letecké technice





Základní části defektoskopicky kontrolované palivové soustavy jsou hlavní a záložní palivové nádrže, rozvody paliva a odvzdušňovací potrubí. Pro správné fungování palivové soustavy je z hlediska defektoskopické kontroly nejdůležitější měření sedimentace a jmenovité světlosti odvzdušňovacího potrubí. Odvzdušňovací potrubí propojuje jednotlivé expanzní prostory hlavních palivových nádrží. Expanzní prostory jsou při jednotlivých spalovacích cyklech pohonné jednotky uzavřeny plamenovým chráničem kvůli zpětnému zašlehnutí plamene při pracovním cyklu motoru.

Hlavní gravitačně plněné nádrže (viz obrázek) u letadla CASA C295M jsou umístěné v prostoru mezi předním a zadním nosníkem křídla. Stabilní funkce palivové soustavy letadla je z důvodu jeho aerodynamického přetížení, zajištěna tlakově variabilními ventily. Tyto ventily stabilizují hodnotu tlaku čerpatelných dodávek paliva při různých letových režimech, čímž nedochází k přetížení palivových dopravních čerpadel a tenkostěnných palivových nádrží.

Sedimentace nádrží u letadla CASA C295M



Zdroj: Vlastní zpracování

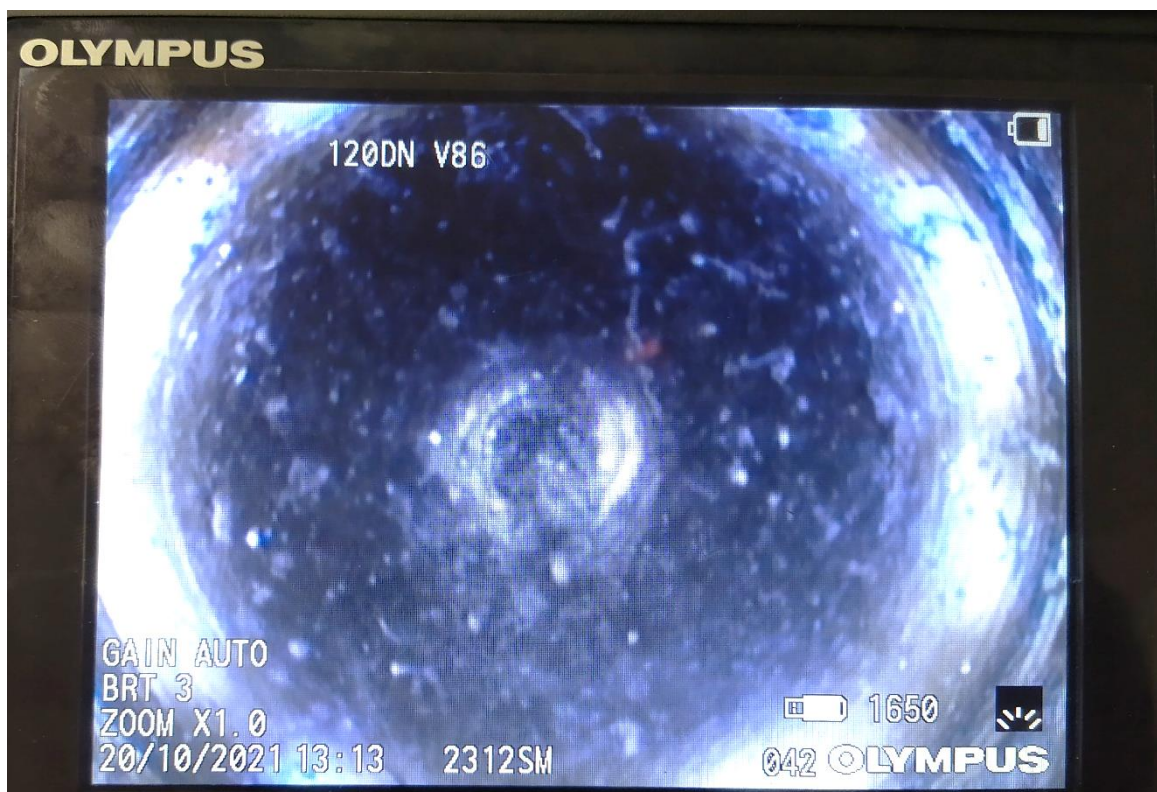
V palivové soustavě nastává přirozená sedimentace palivových šlemů a cizorodých příměsí, jejichž množství ovlivňuje hodnotu dopravního tlaku paliva. Vlivem palivových kalů dochází v odvzdušňovacím potrubí k jeho zarůstání kaly a tím k zúžení jeho světlosti. To má za následek nestabilní práci palivového systému. Z tohoto důvodu stanovil výrobce letadla, aby byla po určitých letových hodinách provedena vizuální





inspekce kruhového odvodušňovacího potrubí, a to podle metodického listu ideálně pomocí videoskopu (viz obrázek ). Výsledek vizuální inspekce odvodušňovacího potrubí u provozuschopného stroje by neměl překročit 25 % kalových srůstů v kruhovém průřezu odvodušňovacího potrubí. Pro sondu ohebného videoskopu je výrobcem stroje již konstrukčně připravený montážní otvor pro snazší vizuální inspekci jednotlivých větví testovaného potrubí. Pomocí videoskopu je vypočítán průměr průchozí části potrubí tak, že se pomocí softwaru videoskopu stanoví zájmové body obrazu a videoskop následně provede softwarové propočítávání sítě těchto bodů. Následně je v závislosti na měřítku získaná vzdálenost v [mm] mezi označenými body. Chybovost softwarového odečítání rozměru je u videoskopu typu Olympus Iplex LX 10 %.

Vyhodnocení sedimentace nádrží u letadla CASA C295M pomocí videoskopu



Zdroj: Vlastní zpracování

Videoskopy umožňují prostorové skenování a měření. Jejich základní funkcí je stereoskopické měření a fázový posuv k trojrozměrnému objektu tzv. 3D phase measurment. Videoskopy využívají pro stereofotogrametrii CCD (*Charge – Coupled*

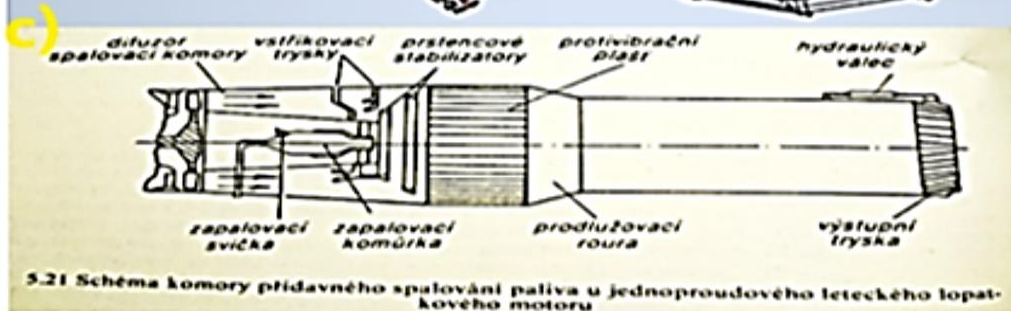


*Device*) čipy barevného snímání. Tyto čipy mají svůj elektrický obvod elektronicky rozdělený na půlky, což umožní stanovit různé úhly pohledu pozorovaného předmětu, a tím vytvořit jeho trojrozměrný obraz, který je již schopný procesor videoskopu trigonometrickou funkcí vyčíslit a pomocí algoritmů dopočítat. Funkce fázového posuvu videoskopu je umožněna souborem laserových diod, které umožňují trojrozměrně a pod různými úhly rozsvětlovat defektoskopicky kontrolovaný objekt. Následným skenováním je získána množina bodů na skenovaném povrchu testovaného objektu. Tyto body jsou prostorové souřadnice testovaného objektu, mezi kterými následně software dopočítává vzdálenost (Václav Legát a kol., 2016; Adam KOZAKIEWICZ a , Maciej ADAMCZYK, Maciej MAJCHER, 2022; RNDr. Dvořák; pplk. MUDr. Truska; Ing. Keller, 2019).

Výkonově přetěžované strojní části pravidelně užívaných letadla, na které působí i rychle měnící se vlivy okolí, jsou kontrolovány pomocí metod NDT i dvakrát za čtyři dny. Tyto namáhané části mnohdy pracují takřka na hranici svých konstrukčních možností. Takovéto strojní části nelze mnohdy i přes bezpečnostní riziko vyřadit z provozu. Důvodem je, že prozatím neexistuje odpovídající náhrada za danou strojní skupinu nebo neexistuje inovativní řešení, které by minimalizovalo vznik takovéto poruchy. Představitelem takovéto vytížené strojní části je axiální kompresor proudového motoru (*viz obrázek* ) (Václav Legát a kol., 2016; Adam KOZAKIEWICZ a , Maciej ADAMCZYK, Maciej MAJCHER, 2022; RNDr. Dvořák; pplk. MUDr. Truska; Ing. Keller, 2019).

#### Konstrukční uspořádání proudového motoru Turbojet





a) Kompresorové stupně proudového motoru Tumanskij R – 13 letadla MIG 21, s forsagí



- b) *Model proudového motoru Turbojet, bez forsage*
- c) *Komora přídavné spalování (forsage) motoru Turbojet*
- d) *Zkušební stolice proudového motoru*

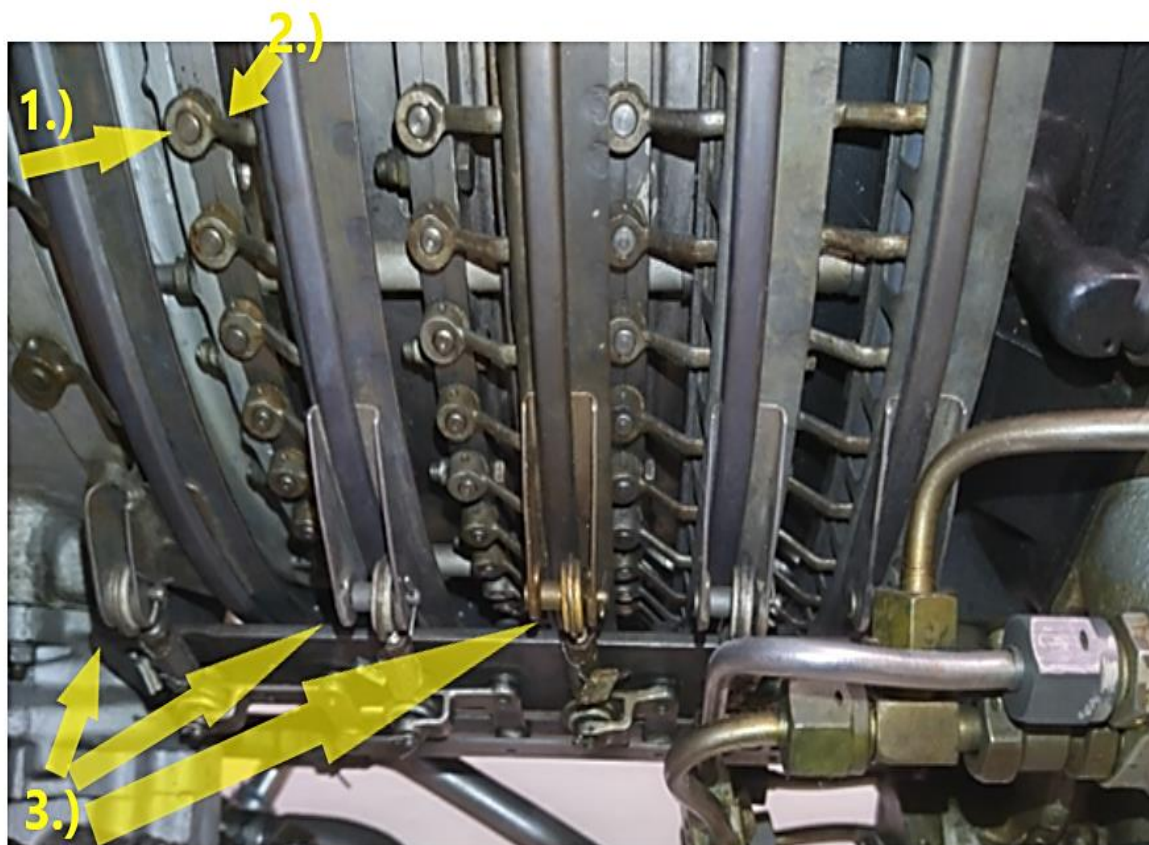
Zdroj: Vlastní zpracování + Inventor

Na letecký proudový motor využívající přídavné spalování (*viz obrázek a*)), jsou kladeny vysoké výkonnostní požadavky v různých letových hladinách, kde dochází k působení kosmických či přízemních jevů. Proudový motor jako celek musí poskytovat stabilní výkon (*viz obrázek d*)) i přes variabilitu kompresorových otáček a velký objem náporově stlačeného vzduchu na prvním kompresorovém stupni. Z důvodu zvýšení účinnosti celého letadla pak musí být celá pohonná jednotka a tím i kompresor, uzpůsobena pro dyfuzorní a konfuzorní tvar dýzy motorové gondoly. Toto tvarování přechodových částí umožňuje efektivně snížit vznik interferenčního odporu letadla vůči obtékaným proudnicím vzduchu (prof. Ing. Štěpánek, DrSc a kolektiv, 1989; Adam KOZAKIEWICZ a , Maciej ADAMCZYK, Maciej MAJCHER, 2022; Jiří Hejna, 2018; Rainer Groh PhD, 2013).

Funkční mechanismus kompresoru natáčejíci statorové lopatky, je nejčastějším zdrojem závad kompresoru. Natáčení statorových lopatek kompresoru umožňuje předcházet vzniku pumpáže a vírového proudění stlačovaného vzduchu tak, že se úhel náběhu statorových lopatek snižuje pod hodnotu aktuálního kritického úhlu náběhu. Kompresorové stupně musí zajišťovat optimální výkon i při náhodném přidření jednoho z rotorových věnců kompresoru do statoru vlivem snížení lokální dynamické tuhosti rotorové hřídele. Kompresor proudového motoru pracuje převážnou část svého fyzického života na kraji své pumpovní hranice (*viz. Obrázek* ). Z těchto důvodů se jednotlivým částem kompresoru zajišťuje pravidelná provozní péče (Doc. Ing. Neštrák, CSc. Ing. Pila Ph.D., 2006; I. J. Day Whittle Laboratory Cambridge, United Kingdom, 1993; Adam KOZAKIEWICZ a , Maciej ADAMCZYK, Maciej MAJCHER, 2022; Prof. Bhaskar Roy, 2015).



## Ovládání satorových lopatek



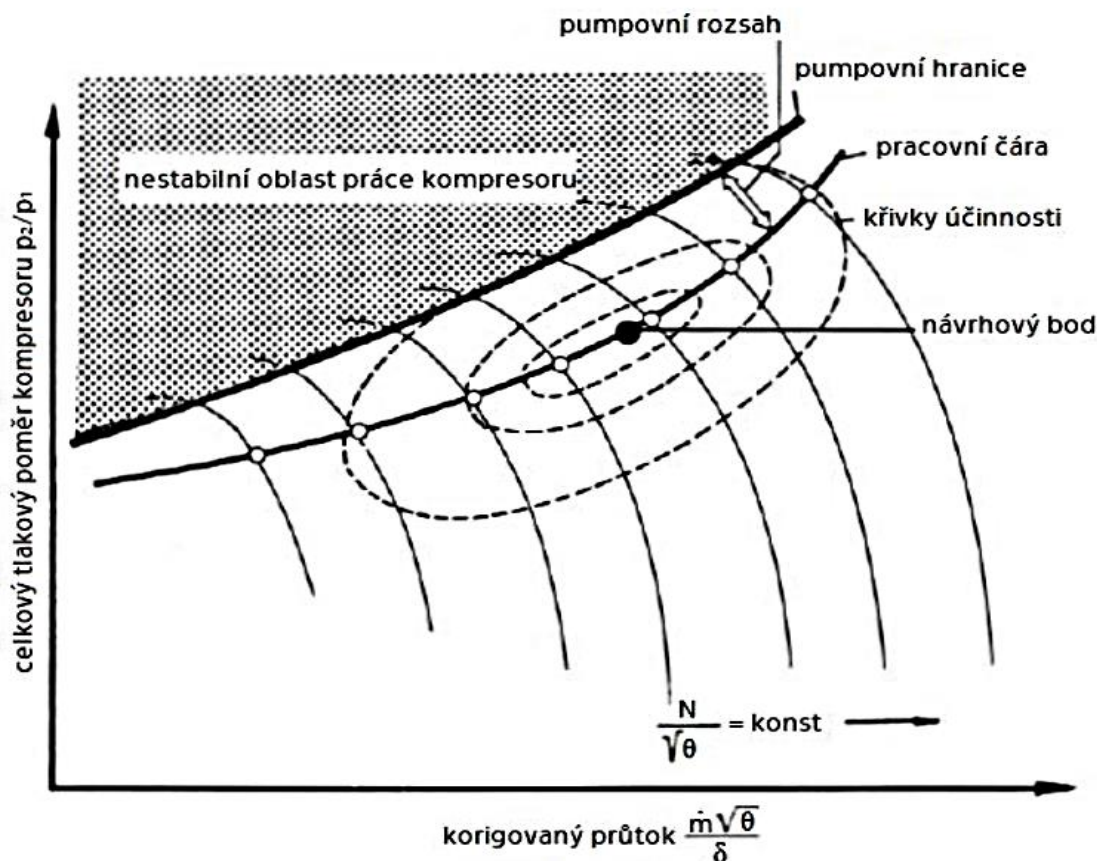
1.) Čep uložení satorové lopatky

2.) Ovládací táhla uložení satorové lopatky

3.) Hydraulicky řízený kolektivní systém nastavení satorových lopatek

Znázornění pracovní oblasti kompresoru v závislosti na průtokovém množství vzduchu





$\dot{m}$ [ $kg \cdot s^{-1}$ ]	hmotnostní průtok vzduchu
$\delta$ [-], $\theta$ [-]	koeficienty pro korekci na standardní podmínky
$N$ [ $min^{-1}$ ]	otáčky kompresoru

Zdroj: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79940/F2-BP-2018-Hejna-Jiri-Mereni%20charakteristik%20modeloveho%20dmychadla.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>

Pro zajištění provozuschopnosti kompresoru a celkové bezpečnosti užívaného letounu v národním a mezinárodním vzdušném prostoru, se aplikuje plánovaná a diagnostická údržba, která vyplývá z letových hodin, akumulčních cyklů a výrobcem stanovených intervalů vypočtených z kalendářního stáří. Následný technický stav letounu a úroveň odborné kvalifikace personálu provádějící jeho údržbu upřesňují civilní a vojenské normy vytvořené na základě smluvních dohod států, využívajících společný vzdušný prostor v rámci těchto kolektivních smluv. Souhrnné podmínky pro zajištění provozuschopnosti stroje s využitím metod nedestruktivní defektoskopie



určují normy a předpisy NAS410:2014, EN4179:2014, Letadlová kvalifikace EASA, AMC a GM k Part-66 včetně dodatků, vojenské předpisy JAR – 66, Nařízení (EK) č. 1321/2014 (Zachování letové způsobilosti). Pravidelná údržba a vhodné metody nedestruktivní defektoskopie zajišťují snížení pravděpodobnosti vzniku poruchy stroje (Václav Legát a kol., 2016; Doc. Ing. Neštrák, CSc. Ing. Pila Ph.D., 2006; Zbyněk Zavadil, 2017; Kosmelová Ivana, 2020).

## **Příloha 2 – Obecné rozdělení metod NDT a jejich podmínky realizace**

Z důvodu prostorové orientace, charakteru a rozměru vady defektoskopicky kontrolovaného materiálu, nelze pro jeho kontrolu aplikovat pouze jeden typ defektoskopické kontroly. Výsledkem defektoskopické zkoušky je stanovit úroveň přítomnosti vad v testovaném materiálu. Za účelem zvýšení účinnosti defektoskopického zkoušení daného materiálu, by měly mít jednotlivé metody nedestruktivního testování rozdílný fyzikálně – chemický princip. Vhodný princip kombinování jednotlivých metod nedestruktivního testování a jejich vzájemná synergie vychází ze znalostí výrobců, zkušeností defektoskopických pracovníků a podmínek které stanovují příslušné normy zajišťující bezpečnost a spolehlivost daného defektoskopicky zkontrolovaného materiálu (Ahmaran, 2006; Giwa Temitayo, 2018; The American Society for Nondestructive Testing, Inc., 2012).

Metody zkoušek nedestruktivní defektoskopie se rozdělují z hlediska předpokládané polohy vady ve zkoušeném materiálu na defektoskopické metody pro kontrolu povrchových a podpovrchových vad. Metody defektoskopických kontrol povrchových vad jsou metody vizuální, kapilární, vířivé, magnetické a zkoušky těsnosti. Metody defektoskopických kontrol podpovrchových vad jsou metody ultrazvukové, termografické a radiografické kontroly. Samotný průběh defektoskopického zkoušení jednotlivými metodami a vyhodnocení jejich výsledků, je zatíženo rušivými vlivy okolního prostředí a elektronickým šumem defektoskopických přístrojů. Rušivé vlivy prostředí jsou intenzivně působící fyzikální stavy prostředí, které ovlivňují účinnost vyslaného defektoskopického signálu či materiálovou podstatu defektoskopického vybavení. Elektronický šum ovlivňuje výslednou hodnotu úchyly výstupních dat



elektronických obvodů defektoskopických přístrojů. Tato šumová charakteristika je závislá na konstrukčním a materiálovém uspořádání defektoskopických přístrojů (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 2004; Abdulmuttalib Abdulkareem Muhsen, 2021; INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA, 2013; Richard a Marcela REGAZZOVÁ, 2013; Jonas HALLBÄCK, 2017; Jiří Barták, 2020).

Z hlediska rozsahu a finančních nákladů na prováděné defektoskopické kontroly, si buďto podnik zajišťuje defektoskopické zkoušky svým odborným personálem sám nebo mu tuto službu zajišťují specializované outsourcingové společnosti zabývající se nedestruktivní defektoskopií. V případě odůvodněného podezření na přítomnost defektu v kontrolované části stroje, se tato periférie stroje demontuje a zasílá na defektoskopické zkoušky do specializovaných laboratoří. Disponuje-li podnik vlastním odborným personálem defektoskopických pracovníků, kteří splňují potřebné typy a úrovně certifikací potřebných defektoskopických zkoušek, které určuje příslušná norma, je podnik schopný buďto vlastními defektoskopickými přístroji či s přístroji zapůjčenými ze specializovaných obchodů provést předepsané defektoskopické zkoušky za minimální dobou odstávky stroje. Délku odstávky výrazně ovlivňuje i přítomnost konstrukčních revizních otvorů u pravidelně kontrolovaných částech stroje. Vhodné konstrukční uspořádání stroje s využitím revizích otvorů omezuje rozsáhlou demontáž a montáž strojních částí z důvodů prováděných defektoskopických kontrol. Častá demontáž a montáž nepříznivě ovlivňuje životnost šroubových spojů (prof. Ing. Štěpánek, DrSc a kolektiv, 1989; Václav Legát a kol., 2016; Ali H. Mutib, 2018; G. Dimitriadis, 2016).

### **Příloha 3 – Historický vývoj ultrazvukové defektoskopie, fyzikální podstata a příklady jejího využití**

Historickým základem akustické emisivity mechanicky kmitajících hmotových částic, jejichž principu se v dnešní době využívá při ultrazvukové defektoskopii, byl fyzikální objev, který popisoval vznik volných povrchových elektrických nábojů při deformaci minerálního křemene, jehož uspořádání krystalů nemá střed symetrie. Tento objev učinil anglický fyzik a objevitel argonového plynu John William Strutt, 3. baron



Rayleigh v roce 1877. Samotné využití akustické emisivity pro nedestruktivní testování kovových materiálů popsal až sovětský fyzik Sergei Jakowlewitsch Sokolow v roce 1929.

Tohoto piezoelektrického jevu krystalů se využívá v ultrazvukových sondách defektoskopických přístrojů. Ultrazvukové sondy jsou nejčastěji tvořené elektroakustickými měniči z feroelektrické keramiky, která má velmi silnou remanentní polarizaci, čímž umožňuje uměle vyvolávat a stabilizovat transformaci elektrické a mechanické energie. Základním materiálem feroelektrických měničů je niobát olova, bariurní titanát, lithiurní sulfát či zirkonátová keramika. Ultrazvukové měniče transformují elektrickou energii signálu defektoskopického přístroje na mechanickou energii kmitajících částic vlnoplochy ultrazvuku a následně toto odražené kmitání ultrazvukových vln, je zpětně transformováno měničem na elektrický signál defektoskopického přístroje. Fyzikální podstata ultrazvukové defektoskopie využívající pasivní ultrazvukové vlny, umožňuje provádět bezkontaktní měření průtočného množství tekutin ve velkých energetických zařízeních přes jejich stěny. Dále bezkontaktní měření ultrazvukové defektoskopie umožňuje zavádět ultrazvukové vlny přes stěny nádob, pro kontrolu hladiny výbušných a jinak agresivních látek. Kromě běžného využití ultrazvukové defektoskopie k měření tloušťek stěn a zjišťování přítomnosti povrchových a podpovrchových vad, lze ultrazvukovou defektoskopií využít i k měření statického tlaku, mechanického napětí a elastických konstant.

## **Příloha 4 – Praktický příklad využití ultrazvukové defektoskopie v letectví**

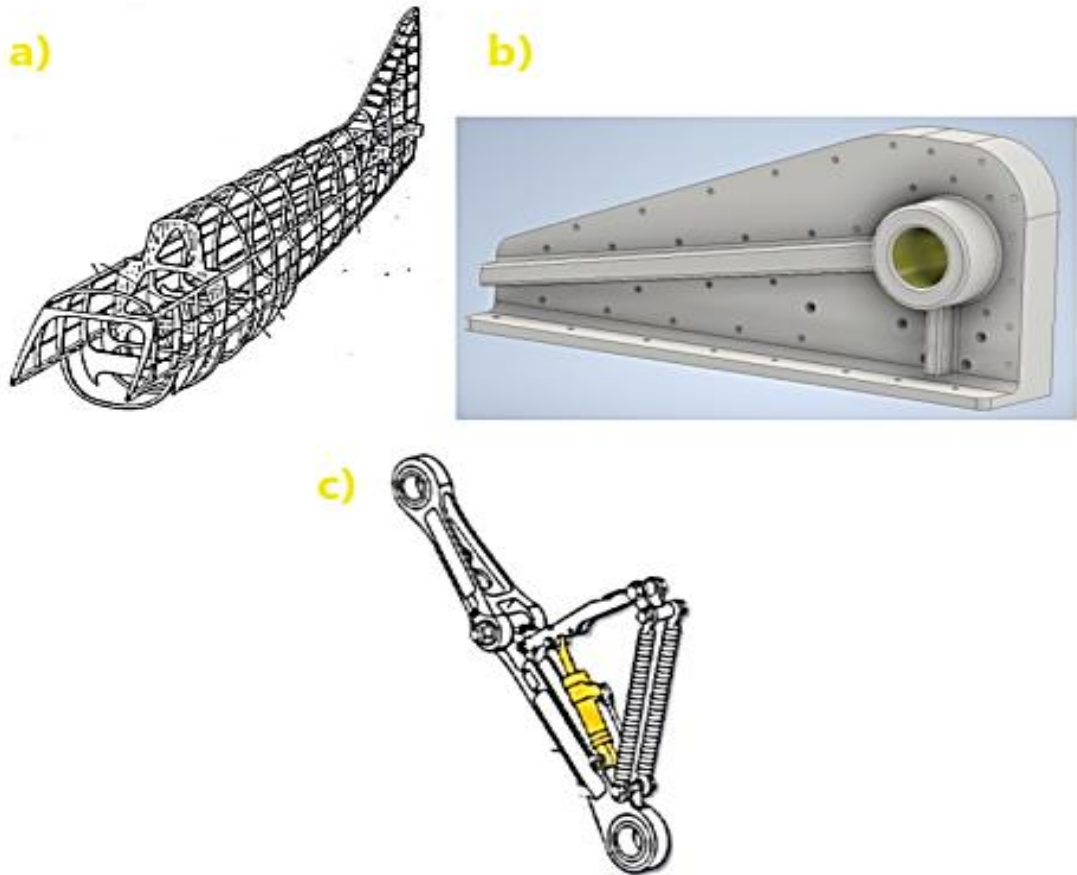
Ultrazvuková defektoskopie se v leteckém provozu využívá především kontrolu konstrukčních nosných částí draku letadla (*viz obrázek*). Samotnou nosnou část trupu letadla tvoří ocelové nosníky různých profilů a výkovky zápusťového kování. Silně namáhané prvky letadla nejsou mnohdy ani demontovatelné, čímž je takováto součást většinou přístupná pro defektoskopického pracovníka pouze z jedné strany. Nejvíce zatěžovanou částí letadla při přistání jsou výkovky pro uchycení osy stojiny





podvozkového kola, ty jsou přišroubovány a přinýtovány k podélné nosné výztuži trupu letadla. Tyto výkrovky jsou vystaveny vysokému stupni zatížení při přistávání.

### Konstrukční namáhané části draku letadla



a) *Podélné a příčné nosné profily trupu letadla*

b) *Výkrovek uložení osy podvozkového kola*

c) *Stojina podvozkového kola*

Zdroj: <https://core.ac.uk/download/pdf/30308692.pdf>

+ Vlastní zpracování Inventor

+ <https://cz.pinterest.com/pin/43417583898880867/>

Maximální hodnota svislého násobku stanovená výrobcem letadla při přistání je 2, 1  
G. Maximální přistávací hmotnost při optimální centráži nákladu činí 5500 kg.



Maximální přistávací rychlost daného letadla je 300 km/h. Překročením limitních hodnot při přistání způsobuje výrazné přetížení nosných částí draku letadla, toto zatížení způsobené pilotem evidují tenzometrická čidla draku, která tyto údaje ukládají do paměti palubního počítače. Nejvíce zatíženou podvozkovou částí letadla v momentu jeho absolutního přistání je výkrovkové uložení zavěšení předového podvozkového kola (viz obrázek).

Výkrovkové uložení zavěšení předového podvozkového kola.



Zdroj: Vlastní zpracování

Vzhledem ke kombinovanému namáhání této části letadla, které je vystaveno statickým a dynamickým silovým účinkům ze stání, pojíždění a tvrdého dosedání v kombinaci se silným korozním působením okolí, dochází k otlacení a šíření trhlin z celého objemu upínacích otvorů výkrovku. S ohledem na geometrický tvar a způsob upevnění výkrovku k nosnému podélnému profilu trupu, který je přetížen tvrdým dosednutím letadla, se vyvolá kritické rázové přetížení základního materiálu výkrovku. Toto přetížení se nejvíce projeví v zesílené kruhové části uložení osy podvozkového



kola. Ve vodorovné ose zesílené kruhové části tohoto výkovku dochází k rozvoji defektů ve směru od vnitřní strany uložení do plochy výkovku. Tato osa je ovlivněna úhlem, který svírá letadlo s přistávací plochou ve fázi letu výdrž a prostorová orientace napětí v zesílené kruhové části uložení je určena směrem letu a jeho úhlu na základě zákona akce a reakce. Další předpokládaný výskyt poškození zesílené části uložení je v jeho svislé ose, to vzniká vlivem příslušné složky výsledného silového působení při přistání. Toto poškození zesílené části se šíří z vnějšího obvodu kruhového uložení ke středu.

Výrobce letadla stanovuje pro defektoskopické zkoušení výkovku provádět přímou vizuální metodu, kapilární s fluorescenčním penetrantem a metodu vířivých proudů. Jako doplňující informaci uvádí výrobce, že poklesne-li celková hodnota tloušťky výkovku při ultrazvukovém měření tloušťky o 0,3 mm, tak je potřeba vyřadit stroj z provozu a odeslat ho výrobcí ke generální kontrole z důvodu podezření na korozi draku. Dále již není výrobcem doporučováno využít ultrazvukovou defektoskopii pro kontrolu výkovku. Ultrazvuková defektoskopie, je v tomto případě jedinou metodou NDT, která umožňuje indikovat případné poškození výkovku v celé jeho tloušťce a možné poškození podélné výztuhy letadla s kterou je výkovek spojen. Veškerá defektoskopická kontrola se provádí z vnitřku podvozkové šachty, a to pouze jenom z jedné strany součásti. Aby byl defektoskopickou kontrolou obsáhnut celý povrch kování, tak musí být provedena demontáž podvozkové nohy. Demontáž podvozkové nohy provádí alespoň čtyři technici po dobu tří normohodin. Nejvyšší stupeň pracnosti při demontáži má proces zvednutí a ustanovení letadla do opravné polohy. Výrobce letadla poskytuje službu defektoskopické kontroly daného výkovku. Z letadla ale musí být demontovány křídla a jiné periférie, které by stěžovali transport nákladu.

## **Příloha 5 – Historický vývoj a fyzikální podstata metody vířivých proudů**

Historickým základem vířivých proudů, co by metody defektoskopického testování, byl objev elektromagnetického pole v roce 1820 francouzským matematikem a fyzikem Françoisem Arago, ten prokázal přítomnost elektromagnetického pole v uzavřeném vodiči a tento jev nazval rotačním magnetismem. Silové působení



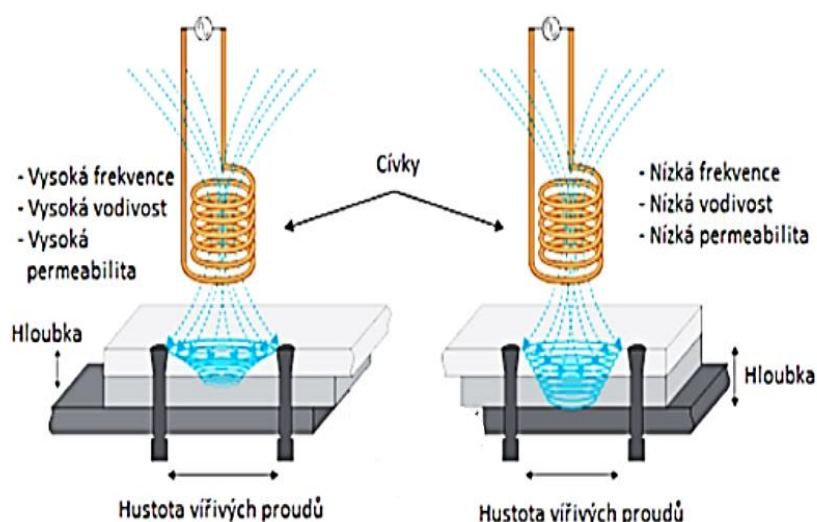
elektromagnetického pole prokázal François Arago při magnetování železných piliny, které byly v blízkosti cívky z válcové spirály měděného drátu, která byla napájena střídavým elektrickým proudem. Objev působení rotačního magnetismu elektricky vodivých materiálu následně v roce 1831 popsal a rozšířil o nové objevy elektromagnetické indukce anglický vědec Michael Faraday. Samotnou technologii vířivých proudů pro využití v průmyslu, popsal a aplikoval v roce 1933 německý profesor Friedrich Förster který pracoval pro společnost Kaiser-Wilhelm-Institut. Friedrich Förster vyvinul v roce 1948 zcela první defektoskopické přístroje, které byly určeny pro třídění kovových materiálu. V roce 1948 následně založil Friedrich Förster v německém Reutlingenu svou vlastní společnost, která se zaměřovala na výrobu defektoskopických přístrojů využívající vířivé proudy, Tato firma existuje na stejném místě dodnes pod názvem *Ústav Dr. Foerster GmbH & Co. KG* a zabývá se vývojem a výrobou defektoskopických přístrojů a poskytováním defektoskopických kontrol s využitím vířivých proudů <https://www.foerstergroup.de/de/deu/>  
<https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/eca-tutorial/intro/history/>.

Principem defektoskopické metody vířivých proudů je změna impedance budící cívky v sondě. Sonda defektoskopického přístroje je napájena střídavým proudem se sinusovým průběhem. Tento střídavý proud vyvolává v budící cívce sondy primární magnetické pole, které je časově proměnné a působí svými magnetickými siločarami na testovaný materiál. Testovaný materiál je proměnně magnetován, čímž dochází v závislosti na jeho hustotě, struktuře, krystalografii atomů a rozložení působících elektromagnetických sil v testovaném materiálu k indukci vířivých proudů. Hodnotu indukovaných vířivých proudů ovlivňuje elektrická vodivost testovaného materiálu, jejíž hodnota se mění s jakoukoliv změnou struktury testovaného materiálu. Tato změna struktury může být vyvolána deformací krystalové mřížky testovaného materiálu, čímž dochází ke změně rozložení elektronů na jednotlivých orbitech atomů a současně i ke změně energetického potenciálu atomů. Deformace krystalové mřížky testovaného materiálu působí jako překážky protékajícímu elektrickému náboji, tím dochází ke změně hustoty elektrického náboje vlivem zmenšení průtokové plochy. Hustota elektrického náboje ovlivňuje vznik nového vektorového pole. Indukované sekundární magnetické pole, které je vyvolané vířivými proudy v testovaném



materiálu, působí na základě Lenzova zákona proti směru primárního magnetického pole budící cívky. Hodnota primárního a sekundárního magnetického pole se vektorově sčítá, přičemž se případná vada defektoskopicky testovaného materiálu projeví jako změna hodnoty impedance budící cívky. Impedanci budící cívky ovlivňuje deformace protékajících vířivých proudů skrze testovaný materiál, permeabilita testovaného materiálu, frekvence vířivých proudů, vzdálenost sondy od testovaného povrchu a hloubka vady v testovaném materiálu (viz obrázek )  
<http://scihi.org/francois-arago-magnetism-induction/> (Sedlák, 2012)

Hloubka vniku vířivých proudů do testovaného materiálu



Zdroj: <http://www.edubilla.com/invention/eddy-current/>

## Příloha 6 – Praktická ukázka využití vířivých proudů ke kontrole kolejnic, Státní Správa železnic

Státní podnik Správa železnic provádí defektoskopické kontroly silově namáhaných železnic pomocí automatizovaného systému WPG NT TRACKSCAN MIRA 40 (viz obrázek ) s implementovaným systémem defektoskopie vířivých proudů. Defektoskopický stroj WPG NT je produktem firmy *PLR Prüftechnik Linke & Rühle GmbH*®. Defektoskopický stroj vířivých proudů je Správou železnic využíván pro



defektoskopické kontroly pojezdových hran železničních kolejí se zaměřením na vady Head Checking. Vady Head Checking představují velké množství rovnoběžně řazených šikmých trhlin na kontaktních plochách kolejí. Tyto vady jsou projevem únavového poškození. V závislosti na smyslu zatížení dané kolejové trati, se rozvíjí charakter těchto šikmých trhlin do povrchové delaminace jednotlivých vrstev koleje. Následně nastává vlivem delaminace zatěžovaných kolejí k propojování jednotlivých šikmých trhlin a v samotném důsledku je nosný průřez kolejí natolik zeslaben, že se rozvíjí únavové lomy kolejnic <https://www.tudc.cz/index.php/diagnosticke-prostredky/wpgnt/> <https://www.plr-magdeburg.de/o.red.c/plr.php> <https://www.dgzfp.de/> <https://magnaflux.eu/>.





## Defektoskopický stroj WPG NT TRACKSCAN MIRA 40



a) Defektoskopický stroj pro kontrolu železnic WPG NT TRACKSCAN MIRA 40

b) Konstrukční uspořádání sond vířivých proudů na pojezdovém ústrojí stroje WPG

c) Vady Head Checking znázorněné pomocí kapilární metody NDT

1.) Sondy vířivých proudů stroje WPG. Typ sondy HC-10 NT o frekvenčním rozsahu 50 až 200 kHz, pod úhly  $45^\circ$  -  $18,5^\circ$  -  $15,3^\circ$  -  $7,5^\circ$ , přípustná vzdálenost sond od kolejí je od 0,25 do 2,5 mm

2.) Pojezdové ústrojí stroje WPG tvořené vodícími kolečky





3.) Teleskopický trubkový rám stroje WPG s možným rozchodem od 1000 až 1435 mm

4.) Odolný notebook Panasonic s označením CF-19 a krytím IP65

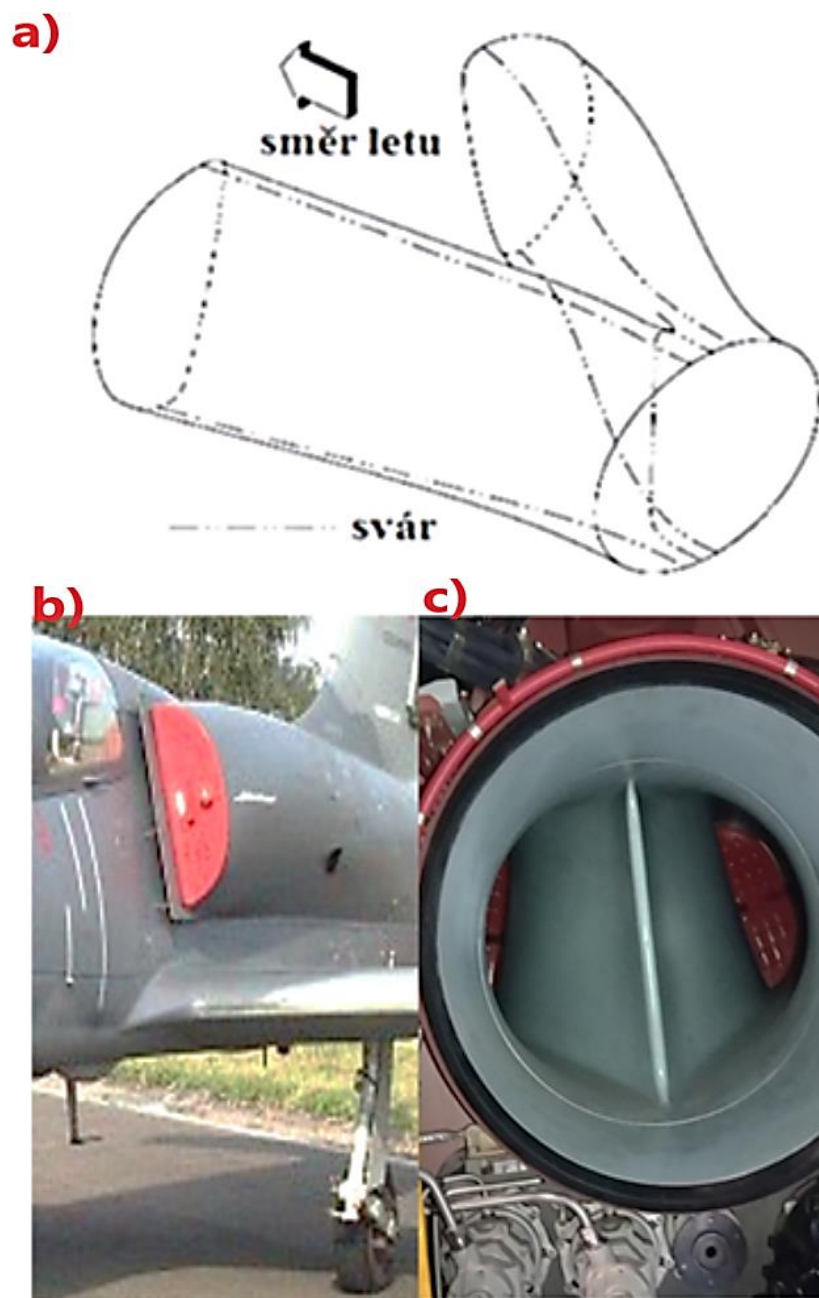
Zdroj: <https://www.tudc.cz/index.php/diagnosticke-prostredky/wpgnt/>

## **Příloha 7 – Praktický příklad využití defektoskopické metody vířivých proudů v letectví**

Praktickým příkladem využití defektoskopické metody vířivých proudů v letectví, je defektoskopická kontrola spojitosti nýtových a svarových spojů vzduchovodu u proudového motoru. Vzduchovody nadzvukových a podzvukových letadel jsou konstrukčním prvkem draku, který zajišťuje snížení rychlosti náporově stlačeného vzduchu, který je nasáván kompresorem proudového motoru. Vstup do vzduchovodu je vystaven vysokému tlakovému namáhání, které se přenáší do zbylé části konfuzorního tvaru vzduchovodu a dále do kotvících nýtů a svarů. Hodnota tlakového zatížení vzduchovodu je úměrná hodnotě rychlosti letu, kdy s rostoucí rychlostí rostou i složky škodlivého odporu. Mezi nejvýznamnější odporové složky, které zatěžují spoje vzduchovodu, jsou interferenční a tvarový odpor. V případě interferenčního odporu dochází ke ztloustnutí mezní vrstvy obtékaného vzduchovodu z důvodu narůstajícího tření mezi jednotlivými mezními vrstvami okolních částí letounu obtékaného vzduchovodu. Interferenční odpor způsobuje zatížení spojů vzduchovodu po celé jeho délce. Tvarový neboli třecí odpor způsobuje nejvyšší míru zatížení vzduchovodu, a to z důvodu bodu rozpojení obtékajících proudnic, které v tomto bodě vytvářejí velké tlakové pole orientované proti směru pohybu letadla. Nýtové spoje vzduchovodu se nacházejí na jeho vnější části a svarové spoje na jeho vnitřní části (*viz obrázek*).



## Vířivoproudá defektoskopie vzduchovodu letadla



- a) Schématické znázornění svarových spojů vzduchovodu pro metodu ndt s využitím vířivých proudů.
- b) Vnější pohled na vzduchovod letadla
- c) Vnitřní pohled na vzduchovod letadla z motorového prostoru

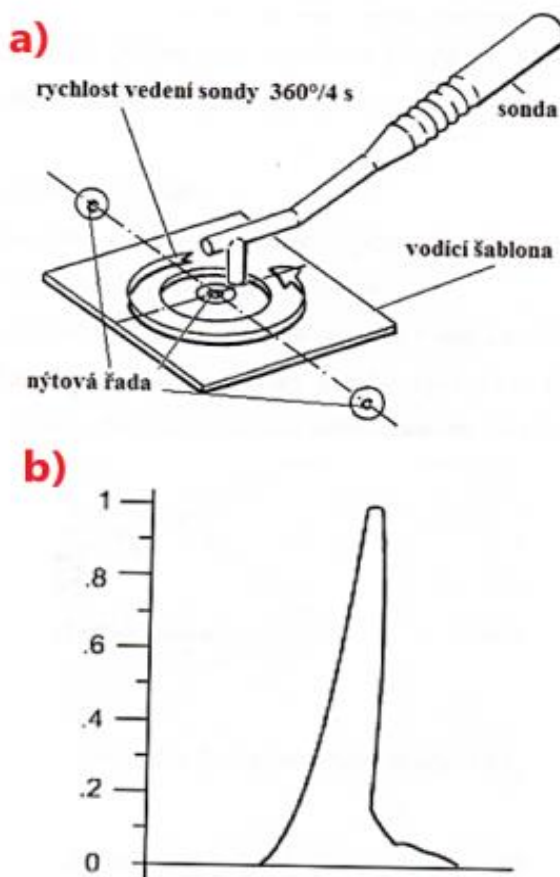
Zdroj: Technická dokumentace výrobce + vlastní zpracování



Výrobce daného letadla určuje, aby byly při defektoskopické kontrole vířivými proudy použity speciální vymežující šablony, které zajišťují správnou polohu defektoskopické sondy vůči kontrolovanému nýtu či svaru. Technologická dokumentace vydaná výrobcem daného letadla pro kontrolu vířivými proudy, určuje celý postup defektoskopické kontroly i s jejím možným výsledkem. Podle pokynů výrobce je provedené vynulování sondy a kalibrace defektoskopického přístroje. Po přiložení a vycentrování elastické silikonové šablony na střed kontrolovaného nýtu je vymezen kontrolní prostor (*viz obrázek*). Následně se provede krouživý pohyb ve vymezeném prostoru šablony se sondou defektoskopu o 360° za dobu 4 sekund. Tímto způsobem jsou zkontrolovány všechny nýty vzduchovodu. Nevykazuje-li kontrolovaný nýt v průběhu jeho defektoskopického zkoušení defekt, tak defektoskopický přístroj vyhodnotí vyslaný signál jako šum. Jeví-li nýt či případně jeho lůžko charakter poškození, tak amplituda signálu během jedné otáčky kontrolní sondy výrazně vzroste a opět poklesne. Kontrola nýtových spojů vzduchovodů je provedena po celé jeho délce. Nýty, které byly defektoskopickou zkouškou vyhodnoceny jako vadné, jsou označeny křídovým fixem a stroj je následně odeslán výrobcem na kompletní prohlídku vzduchovodné části draku.



## Předepsaný postup vířivoproudé kontroly nýtových spojů vzduchovodu



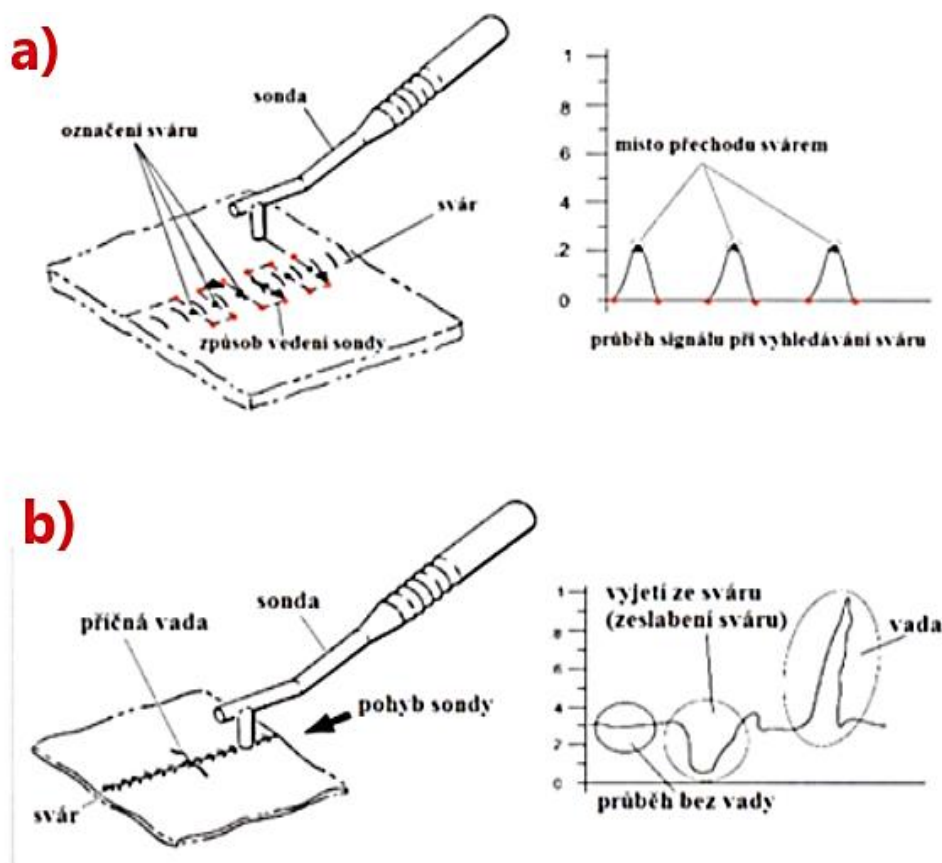
Zdroj: Technická dokumentace výrobce letadla ABC

Následná defektoskopická kontrola svarů ve vnitřních prostorech vzduchovodu by měla být provedena opět s použitím vodící šablony. Provozovatel letadla svévolně, zavedl úpravu technologického postupu kontroly svarových spojů vzduchovodu (*viz obrázek*). Tato úprava technologického postupu kontroly nevyžaduje použití vodící šablony pro sondu defektoskopu. Úprava tohoto technologického postupu byla zavedena z důvodu nepohodlné kontroly svaru ve vnitřním stísněném prostoru vzduchovodu. Dalším podmíněným důvodem k úpravě technologického postupu byla nedostatečná délka datového vodiče sondy defektoskopického přístroje. Podle pokynů upravené technologické dokumentace se provede kalibrace defektoskopického přístroje a následně se vykonává meandrovitý pohyb sondy přes svarový spoj, přičemž v místě svaru, kde vykazuje defektoskopický přístroj nejvyšší hodnotu amplitudy, se provede označení místa pomocí křídly. Takto se provede kontrola svaru po celé jeho



délce. Označené body se následně křídou protnou. Vzniklá křivka by měla imitovat střed svaru. Následně je provedeno vynulování sondy. Po vynulování sondy je prováděná samotná defektoskopická kontrola na výskyt příčných vad v kontrolovaném svaru tak, že je sonda tažena po vyznačené křivce, která imituje střed svaru. Možné výsledky defektoskopického zkoušení jsou uvedeny v upraveném technologickém postupu.

Předepsaný postup vířivoproudé kontroly svarových spojů vzduchovodu



Zdroj: Technická dokumentace letadla ABC

Dále se metoda vířivých proudů využívá pro kontrolu spojitosti a koroze kotvících nýtů nosného potahu letadla. Tento potah pomáhá nosným prvkům draku letadla vyrovnávat napětí v konstrukci stroje. Nosný potah dopravních letadel je tvořen z hliníkových slitin, které jsou při výrobě letadla kotveny do příčných a podélných nosníků trupu a křídel. Následně je tento nýťový spoj utěsněn epoxidovým lepidlem. Takovéto konstrukční uspořádání letadla společně s klimatizační jednotkou, zajišťuje





funkci přetlakových přepážek, které vytváří v letadle stabilní tlak, ten je důležitý jak pro zajištění životních funkcí posádky ve výškových letech, tak i podporuje odolnost draku letadla proti jeho plastické deformaci způsobené tlakovým spádem. Při nesprávné údržbě (viz obrázek ) a diagnostické kontrole nýtových spojů na letadle, dochází vlivem cyklického přetížení letadla k překročení materiálové únosnosti nýtů vlivem smykového namáhání s následným projevem tlakového spádu.

### Následky nevhodně prováděné diagnostické údržby





- a) *Letadlo Boeing 737-200 Aloha let 243 – utržení stropní částí trupu vlivem explozivní dekomprese. Nosný průřez nýtů byl zeslaben působící korozí a smykovým napětím. K poškození došlo vlivem nevhodné údržby stroje. Díky pilotnímu umění kapitána řídící letadlo došlo pouze k úmrtí jednoho cestujícího, který byl z paluby vysán dekompresí.*
- b) *Počítačová simulace nehody letadla Boeing 747SR let Japan Airlines 123. Simulace znázorňuje postupnou explozivní dekompresi, která postupuje od ocasní plochy letadla směrem k jeho přídi.*
- c) *Trosky letadla Boeing 747SR let Japan Airlines 123. Havárie letadla nastala z důvodu nevhodně provedené renovaci nosného potahu, jehož jednotlivé řady byly během překlátování ukotveny pouze jednou řadou nýtů. Na vzniku této havárie má svůj podíl i nevhodně provedená údržba. K destruktivnímu poškození letadla v ocasní ploše došlo až po sedmi letech od provedené renovace. Jedná se o nejsmrtelnější havárii dopravního letectví. Z celkového počtu 524 cestujících bylo usmrceno 520.*

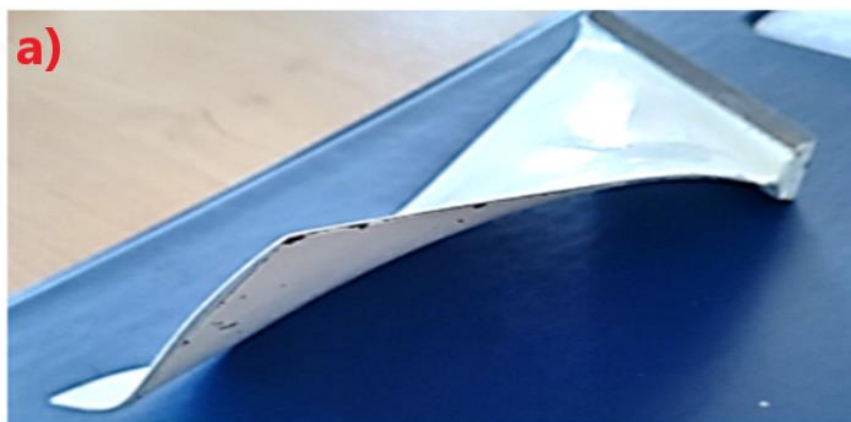
Zdroj: [https://www.researchgate.net/figure/Boeing-737-200-Aloha-Flight-243-showing-significant-structural-failure3\\_fig2\\_305881922](https://www.researchgate.net/figure/Boeing-737-200-Aloha-Flight-243-showing-significant-structural-failure3_fig2_305881922) +  
<https://cz.pinterest.com/pin/499195939926942869/> +  
<https://m.blog.naver.com/PostView.naver?isHttpsRedirect=true&blogId=ywjuhn&logNo=130074579292>

Neméně významnou kontrolou, ve které se využívá defektoskopie vířivých proudů, je kontrola statorových a rotorových lopatek (*viz obrázek*) vysokotlakých a nízkotlakých kompresorových (*viz obrázek*) a turbínových stupňů proudového a turbortulového motoru. Lopatky proudových motorů jsou obecně tvořeny z korozi-vzdorných a žárupevných slitin titanu, chromu a niklu. Nejčastějšími metodami nedestruktivní defektoskopie, které se využívají pro kontrolu lopatek jsou, přímá a nepřímá vizuální metoda, kapilární metoda, magnetická prášková metoda, ultrazvuková metoda a metoda vířivých proudů. Defektoskopické kontroly lopatek se provádějí za účelem měření tloušťky a indikace jejího možného poškození.





## Objekty vířivoproudé defektoskopie – kompresorové lopatky



a) *Lopatky nízkotlakého kompresoru*

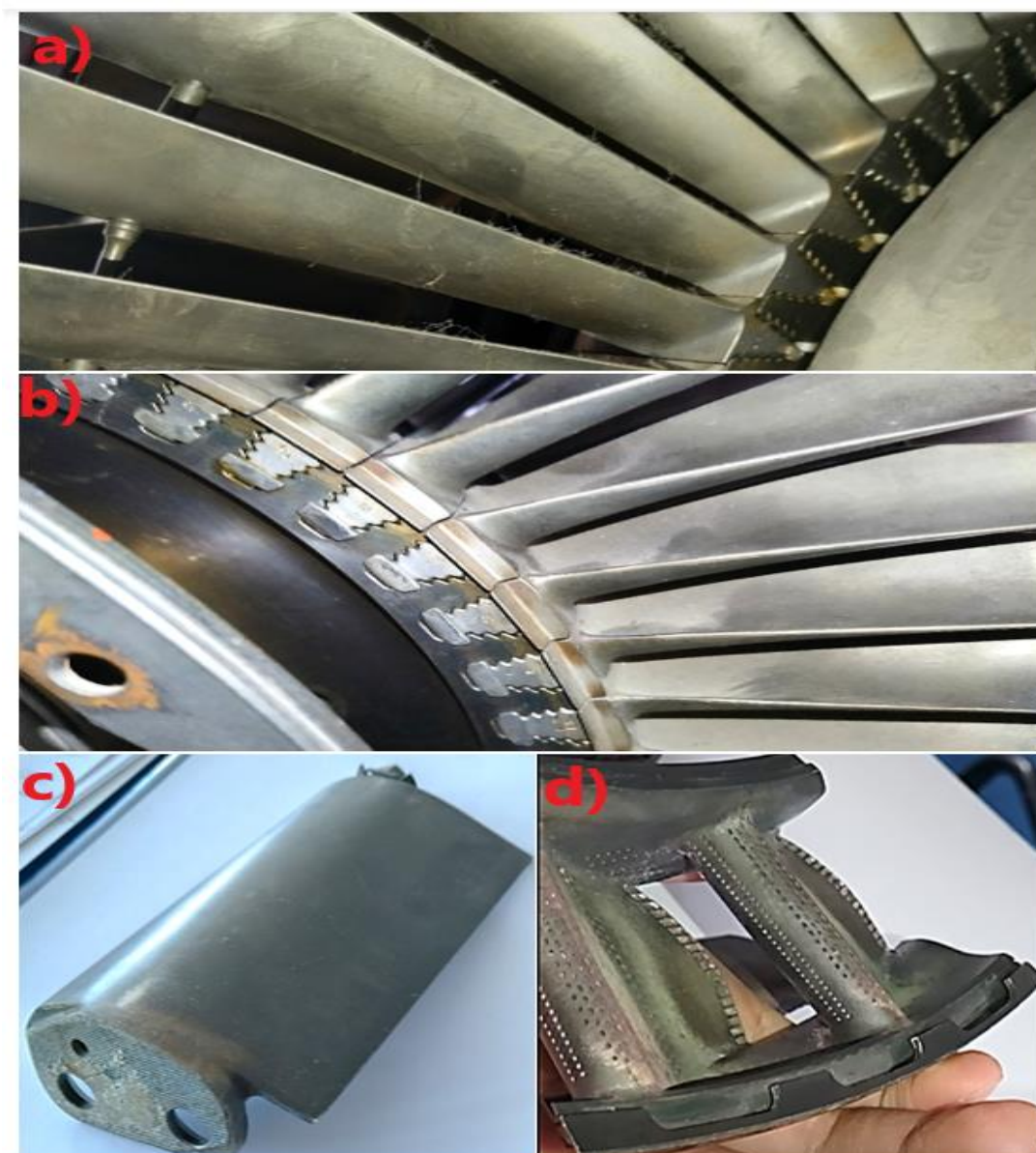
b) *Lopatky středotlakého kompresoru*

c) *Lopatky vysokotlakého kompresoru*

Zdroj: Vlastní zpracování



## Objekty vířivoproudé defektoskopie – turbínové lopatky



- a) *Lopatky nízkotlaké turbíny*
- b) *Lopatky středotlaké turbíny*
- c) *Lopatky vysokotlaké turbíny*
- d) *Lopatky vysokotlaké turbíny, skládané*

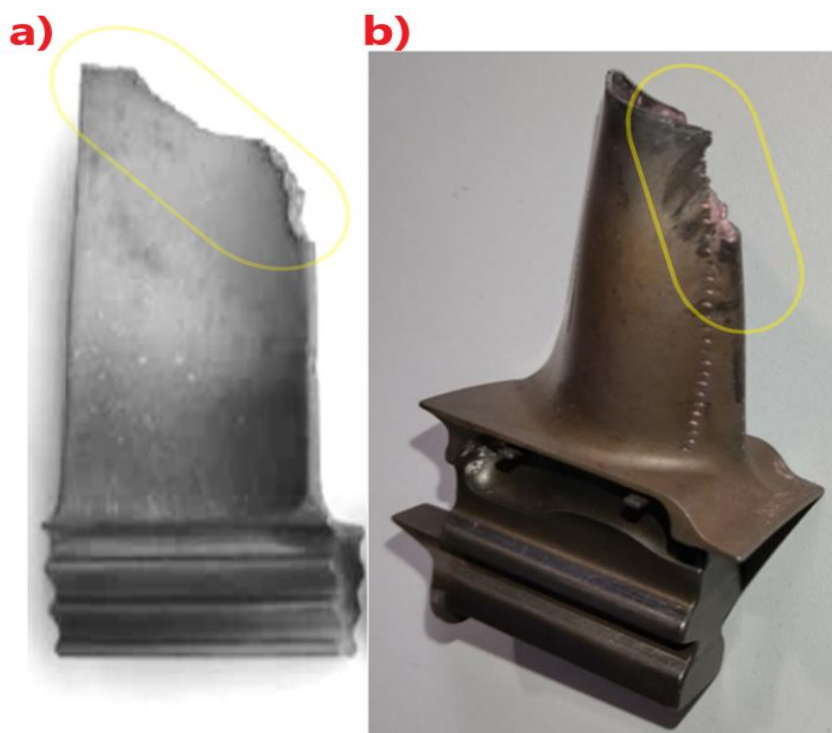
Zdroj: Vlastní zpracování

Nejčastější příčinou poškození kompresorových lopatek je náraz cizího tělesa do rotorového věnce kompresoru. K tomuto poškození lopatek dochází často a jeho



příčinou není pouze náhodná srážka s nasátým ptactvem. Nejčastější příčinou takového poškození kompresoru je vlivem selhání zásad údržby, které poruší pracovník při práci na letecké technice. K porušení zásad údržby na letecké technice dojde nejen tím, že pracovník vykonávající nejen údržbu kompresoru, opomene jakýkoliv materiál či nářadí v kompresoru samotném či v prostoru nebezpečné zóny kompresorového sání. Takto nasátý předmět způsobí fatální poškození kompresoru, který již tak v určitých pracovních fázích pracuje na hranicích svých možností (*viz obrázek*). Při nárazu cizího objektu na list kompresorové lopatky, dojde ke křehkému lomu lopatky a ta takto poškodí ostatní kompresorové stupně. Tyto úlomky kompresorových lopatek jsou nasáty až do otevřených spalovacích prostorů, kde dojde nejčastěji k jejich natavení na stěnu spalovacích prostorů. Ve výjimečných případech se tyto úlomky dostanou až do plynové turbíny, kde mohou způsobit fatální poškození turbínových lopatek propulzoru letadla.

Ojedinelé nasátí předmětu přes celý motor



a) Poškozená kompresorová lopatka vysokotlakého stupně

b) Poškozená turbínová lopatka vysokotlakého stupně

Zdroj: Vlastní zpracování



Vysoce rizikovým poškozením lopatek je titanový požár. Kompresorové a turbínové lopatky se z velké části skládají z titanu, molybdenu, chromu, niklu a jiných příměsí. Důležitým podílem této slitiny je titan. Titan, jakožto konstrukční materiál má důležitý význam ve strojních částech, které jsou zatěžovány buďto extrémně vysokou nebo nízkou teplotou. Díky vysokému pasivačnímu koeficientu oxidu titaničitého o hodnotě 2, 44 jednotek, vysoké pevnosti, tvrdosti, měrné hmotnosti a termodynamické stabilitě, jsou sloučeniny titanu ideálním žáruvzdorným materiálem pro výrobu lopatek. Dojde-li ale během letu k ulomení lopatky, nejčastěji lopatky kompresoru, tak je tento titanový úlomek unášen po směru proudění stlačovaného vzduchu a je odstředivou silou tlačěn ke stěně kompresorového pouzdra. Nejčastěji způsobí tento úlomek pouze další lomové poškození lopatek následujících kompresorových stupňů a následně jsou tyto úlomky nasáty do spalovacích prostorů, kde dochází k jejich hoření. Dojde-li ale k zaklínění takového úlomku mezi hrot kompresorové lopatky a pouzdra kompresoru, tak nastane v důsledku tření titanový požár. Titanový požár proudového motoru způsobený vklíněným úlomkem titanové lopatky často rychle uhasne, protože dojde pohybem rotorového věnce k odmrštění tohoto hořícího kovu. Typickým příznakem poškození kompresorových lopatek vlivem titanového požáru jsou ohořelé špičky lopatek, list lopatek má hrubou a šedou povrchovou zoxidovanou strukturu (*viz obrázky*). Vlivem titanového požáru dojde k výraznému zkřehnutí titanových lopatek. Jestliže nejsou lopatky výrazně poškozené, ale jeví známky titanového požáru, tak je provedena jejich defektoskopická kontrola s využitím ultrazvukové metody a metody vířivých proudů. Ultrazvukovou metodou se měří tloušťka listu poškozené lopatky. Metodou vířivých proudů se kontrolují lopatky na přítomnost tepelných trhlin.

### Kontrola tepelně ovlivněných lopatek





Zdroj: Vlastní zpracování

Ve výjimečných případech může nastat rozsáhlý titanový požár proudového motoru. Zahoření proudového motoru v takovémto rozsahu, který způsobil titanový požár, uvede celý pohonný agregát letadla do havarijního stavu. Příčinou takového poškození jsou buďto konstrukční nedostatky motoru, ale ve většině případech je na vině nedostatečná údržba motoru a jeho velké provozní zatížení. Vlivem lokálního poklesu dynamické tuhosti hnané hřídele kompresoru či vlivem sílcích torzních kmitů hřídele (*viz obrázek*), nastane přidření rotorového věnce do statoru a následný titanový požár má charakter plošného poškození, které způsobí absolutní destrukci kompresoru proudového motoru. Důsledným prováděním údržby a diagnostiky hnané hřídele kompresoru se toto riziko poškození výrazně minimalizuje. U hnané hřídele



kompresoru je prováděna kontrola rovinnosti a souososti za pomocí speciálních přípravků.

### Příčina torzních kmitů



a) Rotorový věnec kompresoru a hnaná hřídel tepelně ovlivněného kompresoru

b) Následek titanového požáru. Letecká nehoda letounu L-39 dne 16. prosince 2010

Zdroj: Vlastní zpracování + <https://acr.army.cz/informacni-servis/zpravodajstvi/po-jednom-roce-a-mesici-od-letecke-nehody-zahajily-provoz->

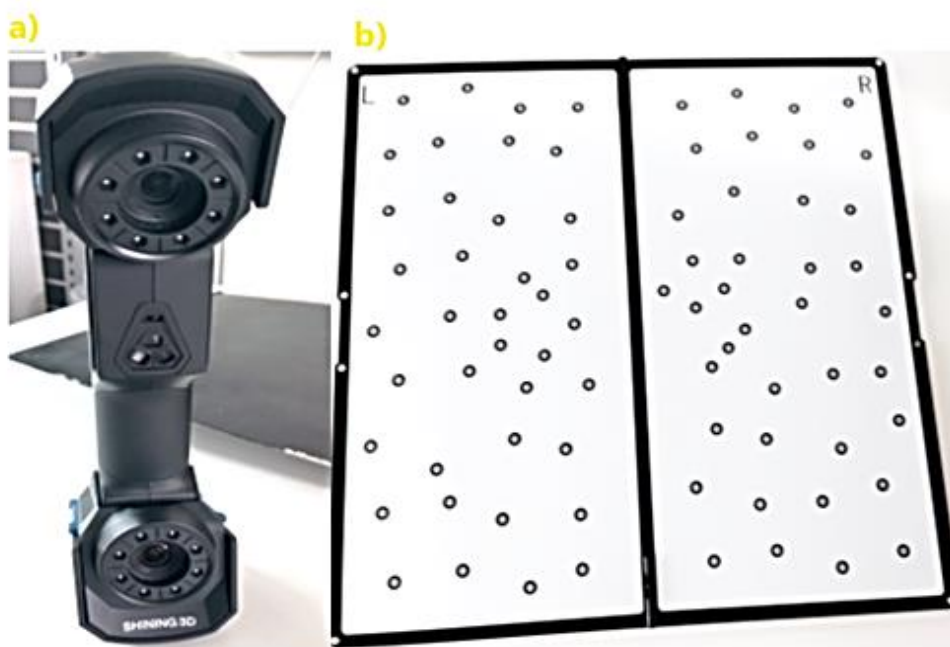


[cvicne-proudove-letouny-l-39-za-64723/](https://www.lidovky.cz/ceska-pozice/kdo-zavinil-pad-cvicneho-bitevniku-l-39.A110627_042515_pozice_21659) + [https://www.lidovky.cz/ceska-pozice/kdo-zavinil-pad-cvicneho-bitevniku-l-39.A110627\\_042515\\_pozice\\_21659](https://www.lidovky.cz/ceska-pozice/kdo-zavinil-pad-cvicneho-bitevniku-l-39.A110627_042515_pozice_21659)

## Příloha 8 – Proces laserové metrologie etalonového listu firmou 3D Wiser

Etalon vrtulového listu byl v prostředí aplikačního centra firmy 3D Wiser skenován novým ručním skenerem Shining 3D EinScan HX. V okamžiku laserového skenování etalonu nebyl tento ruční skener ještě uveden na Českém trhu. Ruční skener Shining v sobě kombinuje modré LED osvětlení a modrý laser. Modré osvětlení slouží pro zajištění dostatečné intenzity osvětlení při rychlém skenování součásti. Skenování pomocí laserového zdroje vykazuje kvalitnější výsledky reflexního snímání součástí i za zhoršených světelných provozních podmínek. Před samotným skenováním etalonu, provedl odborný personál firmy 3D Wiser kalibraci (viz obrázek ) ručního skeneru na výrobcem dodávané kalibrační tabuli, jejíž odrazová plocha byla tvořena obrysovými značkami.

Kalibrace skeneru Shining 3D EinScan HX



a) Ručním skenerem Shining 3D EinScan HX

b) Kalibrační tabule s odrazovými body

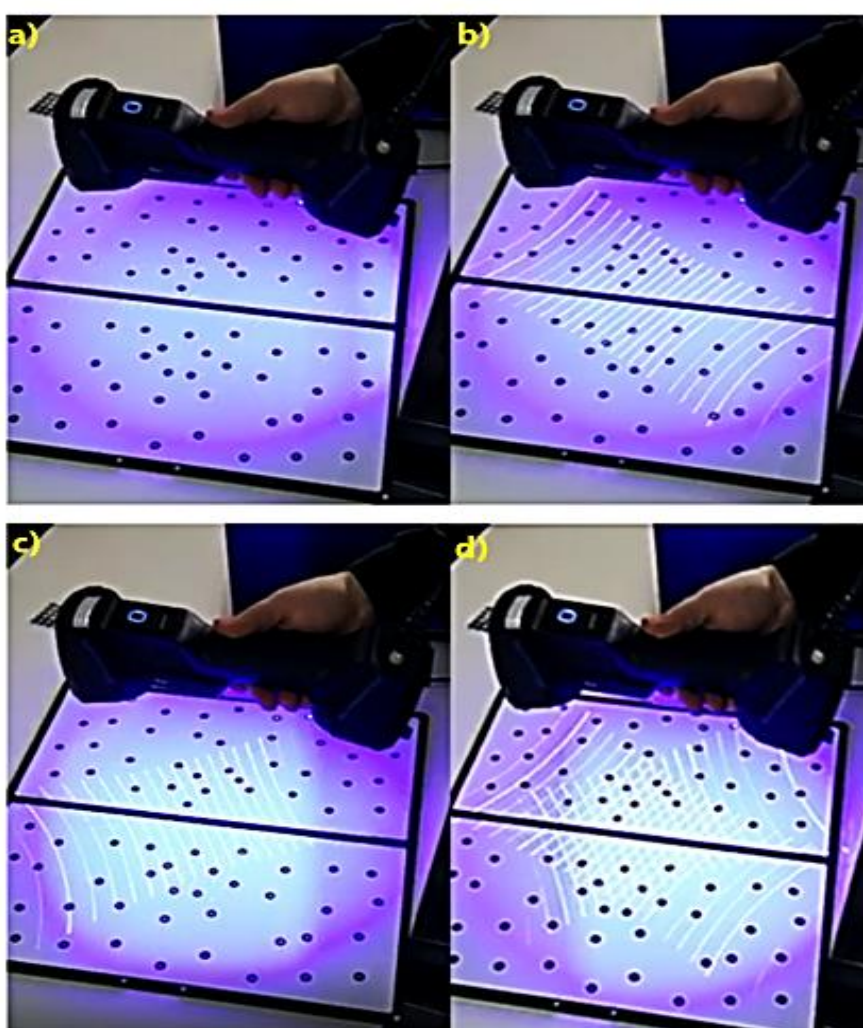




Zdroj: Vlastní zpracování

Ruční skener Shining a jeho software, byl prostřednictvím přenosového kabelu propojen s pracovním notebookem, ve kterém byla nainstalovaná aplikace pro softwarové ovládání laserového skenování. Ruční skener byl v pracovní vzdálenosti 470 mm kolmo před kalibrační tabulí uveden do módu kalibračního snímání odrazových bodů (viz obrázek).

Sekvenční fáze kalibrace skeneru Shining 3D EinScan HX



- a) *Sekvence osvětlení odrazových bodů*
- b) *Sekvence laserového snímání na základě hodnoty intenzity osvětlení*
- c) *Sekvence optimalizace osvětlení na základě hodnoty reflexní odrazivosti snímaných bodů při laserovém snímání*



d) *Hlavní sekvence laserového snímání. Zintenzivnění plošného laserového snímání vzhledem k optimalizaci osvětlení*

Zdroj: Vlastní zpracování

Účelovým pohybem ručního skeneru v pracovní vzdálenosti před kalibrační tabulí, se postupně načítalo procentuální pokrytí ozářené plochy, kterou zobrazovala aplikace v notebooku. Při kalibračním módu došlo k ideálnímu nastavení rychlosti a frekvence snímání s určitou objemovou přesností. Po dosažení 100 % pokrytí kalibrační plochy došlo prostřednictvím aplikace v notebooku k samovolnému ukončení kalibračního módu a samovolnému vypnutí skenerových zářičů (viz obrázek).

Proces konfigurace softwaru při kalibraci skeneru Shining 3D EinScan HX



1.) *Okrajové body softwaru vymezující celkový obrys a plochu snímané kalibrační tabule. Jsou-li značky červené, tak nedošlo ještě ke zdárnému vypočtení snímané plochy.*



*2.) Stupnice softwaru vymezující celkové propojení jednotlivých kontur na ploše snímané kalibrační tabule se sítí odrazových značek. Jednotlivá pole softwarové stupnice představují 10 % pokrytí a propojení bodů na ploše snímaného objektu. Mód kalibrace či mód pracovního snímání je samovolně softwarem ukončen po dosažení 100 % pokrytí snímané plochy.*

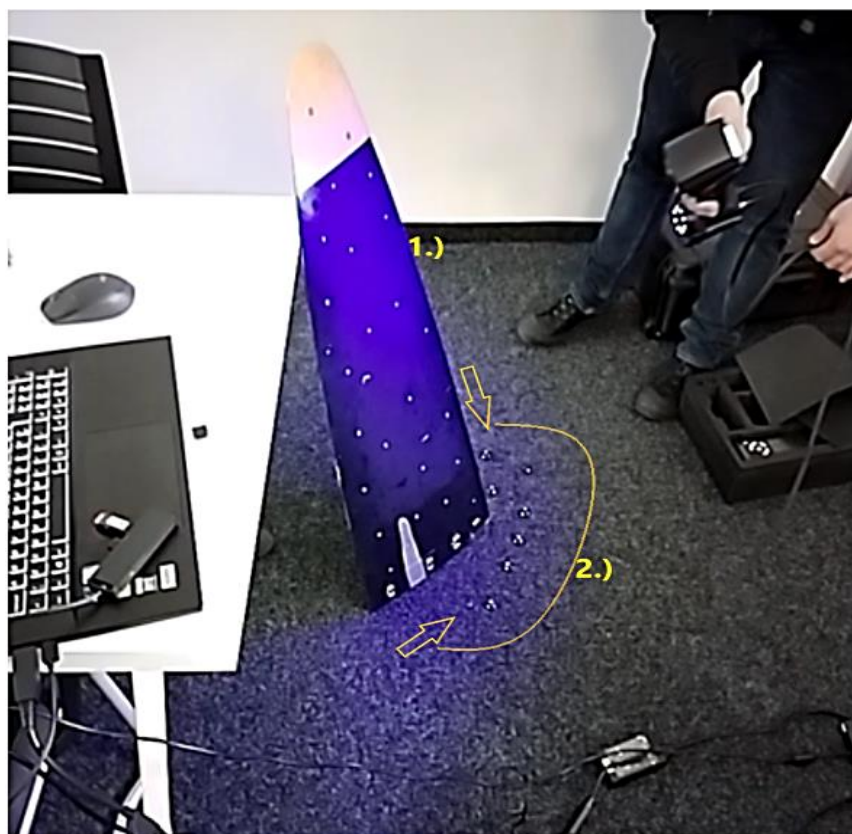
*3.) Model skenované plochy*

Zdroj: Vlastní zpracování

Po kalibraci ručního skeneru provedl odborný personál firmy 3D Wieser zhodnocení tvarové způsobilosti etalonového listu pro jeho laserové skenování. Následně byla na etalon po celé jeho ploše z obou stran, nalepena síť odrazových bodů ve formě reflexních nálepek. Za účelem zkvalitnění laserového snímání byl na etalon aplikován film reflexního aerosolu ve spreji. Tento nástřik zajišťoval společně s odrazovými značkami zvýraznění skenovaného etalonu pro laserové odrazové snímání. Následně byl etalon ustaven na kraj pracovního stolu tak, aby bylo možné v průběhu skenování obsáhnout všechny jeho měřené plochy. Následně byl prostor okolo vrtulového listu vymezen odrazovými prvky. Tyto odrazové prvky určovali polohu skenovaného vrtulového listu vůči nevypočtové ploše v prostoru pracoviště (*viz obrázek*).



## Průběh laserového skenování



- 1.) *Etalon s odrazovými lepicími body a povrchovým nástřikem*
- 2.) *Oblast odrazových prvků pro vymezení měřeného prostoru*

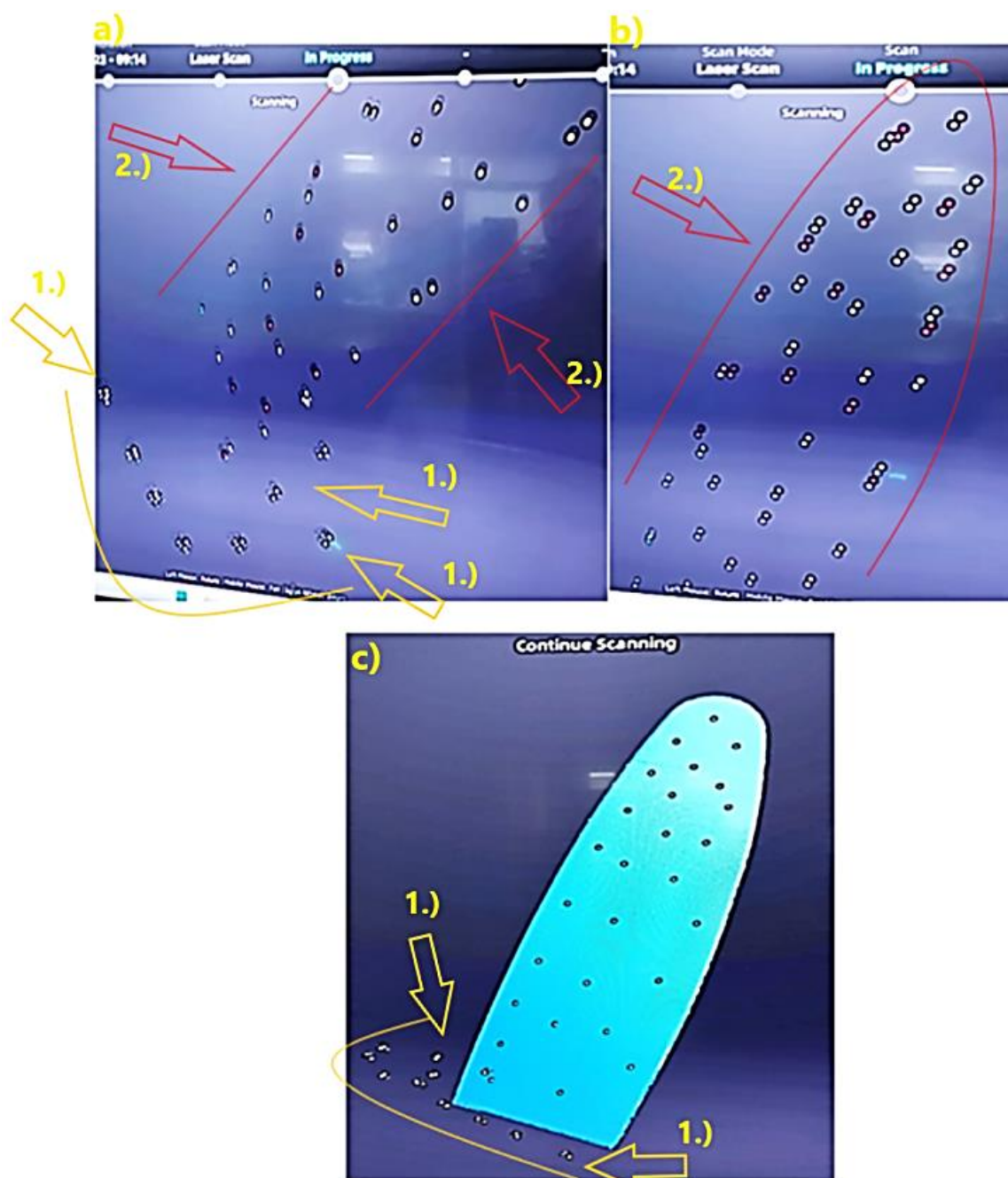
Zdroj: Vlastní zpracování

Lepící reflexní body, povrchový nástřik etalonu odrazovým aerosolem a vymezovací odrazové prvky zajišťovali v průběhu laserového skenování vysoce přesné zobrazení souřadnicových bodů etalonu v modulárním softwaru notebooku, do kterého se data v průběhu měření přenášela. Po dosažení 100 % pokrytí snímaného etalonu laserem a softwarovém dopočítání potřebných souřadnic, se proces skenování příkazem softwaru ukončil. Tímto byl proces laserového skenování etalonu ukončen. Následně byly z etalonu odstraněny lepicí odrazové body a povrchový reflexní nástřik etalonu byl setřen utěrkou z mikrovlákna. Proces laserového skenování, který zahrnoval kalibraci ručního skeneru, tvarové zhodnocení etalonu a jeho přípravu pro měření, laserové snímání, mentoring a očištění etalonu, trval přibližně čtyřicet minut. Laserové skenování etalonu bylo uskutečněno 23. 11. 2022 (*viz obrázek*).





## Softwarová modulace skenovaného etalonu



a) Snímané souřadnice kořenové části etalonu

b) Snímané souřadnice střední a vrcholové části etalonu

c) Výsledný model STL skenovaného etalonu po propojení souřadnic

1.) Oblast odrazových prvků

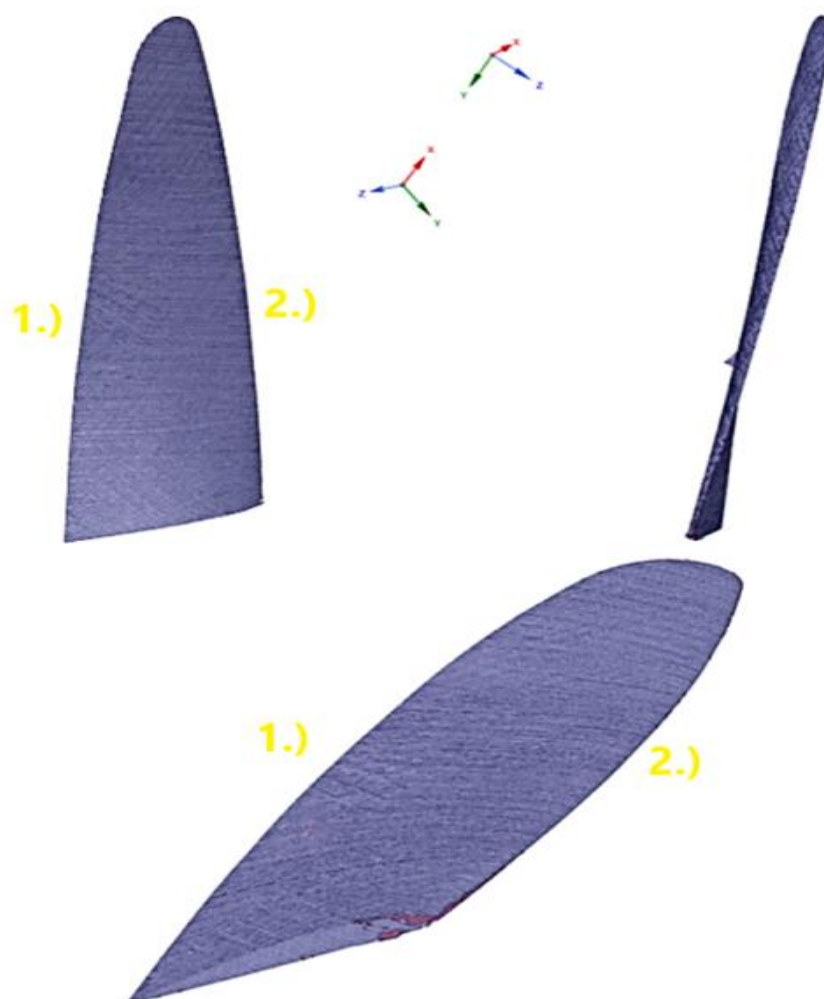
2.) Pomocné kontury vymezující obrys skenovaného etalonu s odrazovými body

Zdroj: Vlastní zpracování



Pracovník firmy 3D Wiesru následně provedl po laserovém skenování etalonu okamžité vyhodnocení souřadnic softwarovou metodou vrcholových trojúhelníků a vytvořil prvotní náhled měřeného etalonu ve formátu STL modelu. Model STL je možné spustit ve většině aplikací CAD (*viz obrázek*).

Model STL z laserového skenování etalonového listu



1.) *Odtoková hrana etalonu*

2.) *Náběžná hrana etalonu*

Zdroj: Vlastní zpracování





## Příloha 9 – Technické parametry magnetického tloušťkoměru laku PCE-CT28 a zdrojová data měřících pokusů

Technické parametry měřiče tloušťky laku PCE – CT 28

<b>Technické parametry měřiče tloušťky laku PCE - CT 28</b>	
<b>měřicí rozsah [μm]</b>	od 0 do 1250
<b>přesnost měření [%]</b>	±2
<b>nejmenší možná měřená plocha [mm]</b>	6 x 6
<b>přípustná okolní teplota [°C]</b>	od 0 do + 50
<b>nejmenší tloušťka základního materiálu [mm]</b>	60
<b>funkce F</b>	měření tloušťky laku, barvy, plastu na železných kovech
<b>funkce N</b>	měření tloušťky laku, barvy, plastu na neželezných kovech

Zdroj: Manuál pro obsluhu přístroje PCE-CT28 (R.A.E.E. – N° 001932)

Naměřená zdrojová data tloušťky laku



měřicí pokus č.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
tloušťka nátěru [μm]	102	128	131	134	135	130	134	145	141	140

měřicí pokus č.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.
tloušťka nátěru [μm]	141	152	148	147	148	149	147	147	166	171

měřicí pokus č.	21.	22.	23.	24.	25.	26.	27.	28.	29.	30.
tloušťka nátěru [μm]	174	189	189	189	187	185	187	186	185	171

měřicí pokus č.	31.	32.	33.	34.	35.	36.	37.	38.	39.	40.
tloušťka nátěru [μm]	173	171	171	174	173	172	172	125	128	120

měřicí pokus č.	41.	42.	43.	44.	45.	46.	47.	48.	49.	50.
tloušťka nátěru [μm]	104	101	106	100	109	102	105	128	121	127

měřicí pokus č.	51.	52.	53.	54.	55.	56.	57.	58.	59.	60.
tloušťka nátěru [μm]	129	124	139	141	137	104	119	154	152	124

měřicí pokus č.	61.	62.	63.	64.	65.	66.	67.	68.	69.	70.
tloušťka nátěru [μm]	175	174	159	158	147	139	167	164	160	162

měřicí pokus č.	71.	72.	73.	74.	75.	76.	77.	78.	79.	80.
tloušťka nátěru [μm]	175	178	175	176	168	162	164	151	155	149

měřicí pokus č.	81.	82.	83.	84.	85.	86.	87.	88.	89.	90.
tloušťka nátěru [μm]	125	134	120	117	136	132	108	109	102	108

měřicí pokus č.	91.	92.	93.	94.	95.	96.	97.	98.	99.	100.
tloušťka nátěru [μm]	105	109	108	113	112	112	110	116	121	118

Zdroj: Vlastní zpracování

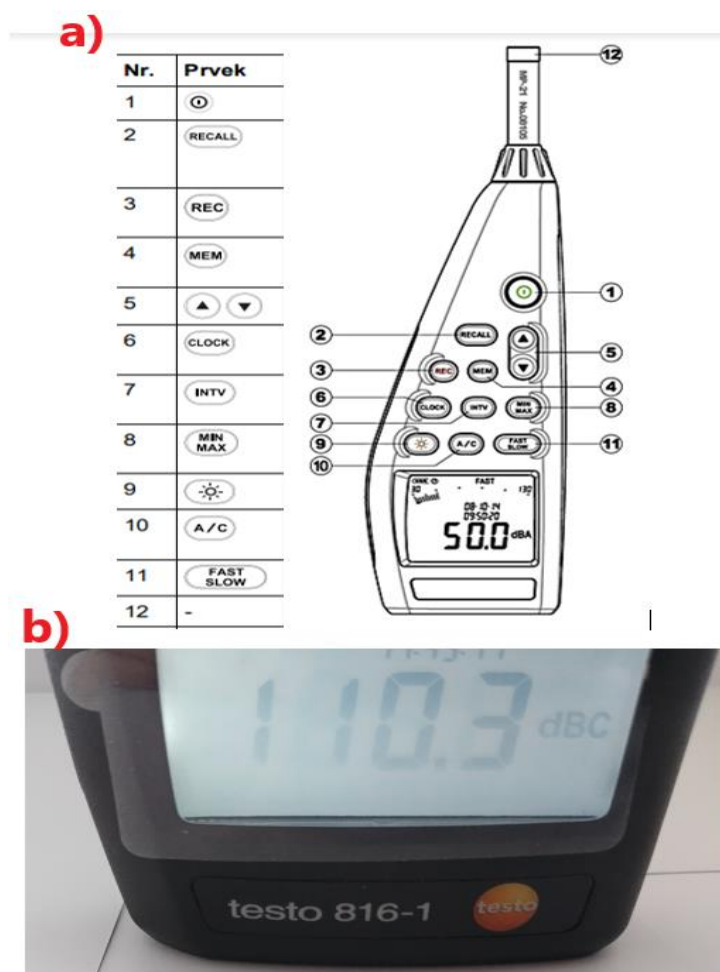
## **Příloha 10 – Ovládací prvky Hlukoměru Testo 816-1, důvod snímání hlukové expozice a jeho předpokládaný vliv na průběh defektoskopie**

Měřicí pracoviště se nachází přibližně 20 metrů od aktivních letadel a vrtulníků s turbovrtulovými a proudovými motory. Motory těchto strojů jsou na tomto letišti uváděny při přistání a vzletu do vyšších výkonnostních pracovních charakteristik. Součástí údržby letadel a vrtulníků je i provádění motorových zkoušek. Motorové zkoušky trvají v rozsahu od patnácti minut až do třiceti minut. V průběhu motorové zkoušky, se podle typu stroje dosahuje i maximální výkonové charakteristiky motoru



po dobu pěti minut. Veškeré stroje podstupující motorovou zkoušku jsou zabrzděné v blízkosti jejich hangáru, a to z důvodu nenarušování leteckého provozu. Vrtulové stroje jsou z důvodu bezpečí a jejich možného rozjetí, zabrzděny pouze jejich vlastními brzdami. Letouny s proudovými motory jsou ukotvovány řetězy za speciální kotvící body. Z důvodu intenzivního hluku, který by mohl ovlivnit průběh a výsledky defektoskopického měření, bylo využito hlukoměru Testo 816-1 (viz obrázek).

Ovládací prvky Hlukoměru Testo 816-1



- 1) Zapnutí/ vypnutí
- 2) Zobrazení uložených dat v paměti přístroje
- 3) Spuštění automatického ukládání naměřených dat do paměti přístroje
- 4) Manuální ukládání naměřených dat do paměti přístroje
- 5) Změna náhledu na uloženou hodnotu



- 6) *Změna nastavovaných parametrů*
- 7) *Nastavení intervalu*
- 8) *Funkce MIN/MAX*
- 9) *Zapnutí/ vypnutí podsvícení*
- 10) *Změna frekvence*
- 11) *Změna hodnocení času*

Zdroj: Vlastní zpracování + manuál pro obsluhu

Vnitřní vojenské předpisy pro správu letišť povolují zatížení příslušníků inženýrské letecké služby hlukovou expozicí o hodnotě 110 dB maximálně po dobu 10 minut a nejvyšší hodnotou zatížení je 140 dB. Motorové zkoušky trvají minimálně 15 minut. Zákonem stanovené podmínky a limity hlukové expozice, určuje Nařízení vlády č. 148/2006 Sb. – Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. Nařízení definuje, jako ekvivalentní hladinu hluku 85 dB a jako průměrnou nejvyšší možnou hodnotu 107 dB v závislosti na čase. Špičkovou hodnotou je 140 dB. Hluk, je jakýkoliv rušivý nežádoucí zvuk, který je projevem pracujícího stroje v pracovním prostředí a jeho okolí (viz tabulka ) (Letiště Praha, a.s, 2011).



## Tabulkové hodnoty hluku

<b>Bezpečný rozsah:</b>	
<b>0 dB</b>	práh slyšení lidského ucha
<b>10 dB</b>	vzdálený šum listí při slabém vánku
<b>20 dB</b>	tikot náramkových hodinek, volná příroda v bezvětří
<b>30 dB</b>	tichý šepot
<b>40 dB</b>	šum v tichém bytě, déšť, tlumený hovor, tichá myčka
<b>50 dB</b>	denní ulice, tišší pračka
<b>60 dB</b>	běžná mluva
<b>70 dB</b>	motor automobilu, hlučná ulice, vyzvánění telefonu
<b>Rizikový rozsah hluku:</b>	
<b>80 dB</b>	křik, rušný provoz, fén na vlasy, vysavač
<b>90 dB</b>	rozjetý vlak, hlasitá hudba, odfukovač listí
<b>100 dB</b>	motorová pila, sbíječka, motorka na maximum
<b>Škodlivý rozsah hluku:</b>	
<b>110 dB</b>	diskotéka, hlučný koncert
<b>120 dB</b>	start letadla, pyrotechnický výstřel
<b>130 dB</b>	výbuch granátu
<b>140 dB</b>	proudový motor letadla zblízka, střelba ve vzdálenosti 1 m

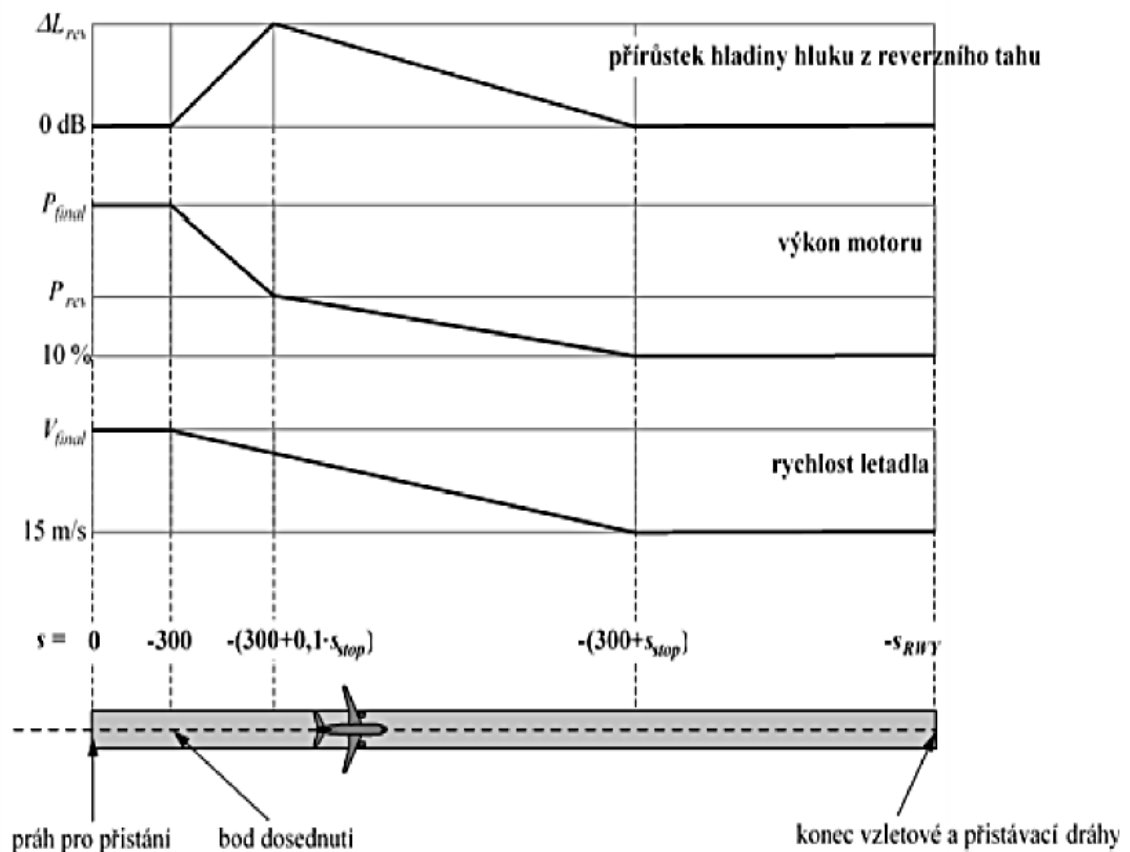
Zdroj: Vlastní zpracování + [https://www.earplugs.cz/tezka-veda/priklady-hladin-hluku/?gclid=Cj0KCQjwiZqhBhCJARIsACHHEH\\_ZmorP8KnxfCxZSRKs6XlfnnHZMoAiKqKsngFOZnRHp6yKgrPo6waAtRNEALw\\_wcB](https://www.earplugs.cz/tezka-veda/priklady-hladin-hluku/?gclid=Cj0KCQjwiZqhBhCJARIsACHHEH_ZmorP8KnxfCxZSRKs6XlfnnHZMoAiKqKsngFOZnRHp6yKgrPo6waAtRNEALw_wcB)

Z hlediska vzniku a pohybu akustické energie okolním prostředím, se hluk rozděluje na složku mechanického a aerodynamického hluku. Mechanická složka hluku vzniká kmitáním povrchu tělesa, které způsobí akustický rozruch hmotového prostředí okolí. Při kmitavém pohybu tělesa nastává transformace jeho mechanické energie na energii akustickou, ta se šíří okolním prostředím ve formě akustických vln o různé frekvenci a amplitudě. Hodnotu a charakter šířící se akustické energie ovlivňuje tvar, rozměr a



pohybový stav kmitajícího se tělesa. Aerodynamická složka hluku vzniká vlivem tření tekutiny, která obtéká povrch daného tělesa. Vlivem tlakového spádu tekutiny obtékající těleso, nastává tlakový rozruch prostředí, který je příčinou akustických vln šířících se prostředím, např. volná turbulence výfukových plynů z výtokové trysky proudového motoru. Takovýto akustický projev má negativní vliv na obsluhu daného stroje (viz obrázek ), na živé organismy v okolí, na okolní stroje a jejich strojní části jako např. elektroniku a avioniku. Z hlediska provozní péče o stroj, může být ale takovýto hlukový projev prvotním diagnostickým signálem, který upozorňuje na změnu technického stavu daného stroje (Rifat, 2022).

### Obecný model expozice hluku při přistání a odletu letadla



Zdroj: <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/CS/TXT/HTML/?uri=OJ:L:2021:269:FULL&from=MT>

Vzhledem k fyzikální podstatě a intenzitě generovaného hluku, jehož zdrojem budou turbovrtulové a proudové motory, které budou v průběhu defektoskopického měření aktivní, se předpokládá možné ovlivnění výsledků především ultrazvukové





defektoskopie. Důvodem této myšlenky je, že by mohl výrazný hluk motorů ovlivnit funkční hodnotu rychlosti šířících se ultrazvukových vln prostředím od sondy k etalonu. K ovlivnění rychlosti vyslaného ultrazvuku dojde nejspíše již v počátku jeho vygenerování piezoelektrickým měničem sondy. K tomuto ovlivnění by mohlo dojít změnou tlaku vzduchu, kterou způsobí parazitativní zvukové vlny hluku motorů, čímž by mohlo dojít k ovlivnění již počáteční hodnoty akustického tlaku vyslaného ultrazvukového vlnění. Předpokládá se, že by mohla tato tlaková změna způsobena parazitativním rozkmitáním molekul prostředí způsobit úplný útlum ultrazvukových vln. Z důvodu zvýšení přesnosti ultrazvukového měření a zvýraznění této možné odchylky, podstoupila obsluha provádějící tento výzkum, školení ultrazvukové defektoskopie v rozsahu UT1, UT2 a UT3 se zaměřením na tuto možnou odchylku. Hluková expozice bude snímána i v průběhu defektoskopického měření s využitím vířivých proudů, zde se ale nepředpokládá tak výrazné ovlivnění výsledků měření.

## **Příloha 11 – Tepelné podmínky na pracovišti a ovládací prvky na termovizní kameře**

Měřící pracoviště, které se nachází v plechovém hangáru dopravního letiště Praha – Kbely, je v letních měsících výrazně zatíženo působením akumulujícího se tepla ve vnitřních prostorech. Toto akumulující se teplo výrazně zatěžuje měřící pracoviště. Z tohoto důvodu bylo realizováno doplňkové měření teplotní závislosti defektoskopicky kontrolovaného etalonu. Povrchová teplota vady etalonu, byla měřena pomocí termovizní kamery. Termovizní kamerou (*viz obrázek*) byla snímána hodnota elektromagnetického záření, kterou etalon emitoval do prostředí. Emisivita je elektromagnetická energie materiálů, tu materiály emitují ze svého objemu a povrchu do svého okolí ve formě elektromagnetického záření o dané vlnové délce, která odpovídá reálné teplotě daného materiálu v závislosti na jeho tepelné vodivosti.

Termovizní kamera BOSCH GTC 400 C



a) Přední pohled na Termovizní kameru BOSCH GTC 400 C

b) Zadní pohled na Termovizní kameru BOSCH GTC 400 C

1.) Tlačítko menu, potvrzení

2.) Tlačítko, směrové šipky, nastavení hodnot kalibrace

3.) Tlačítko zamrznutí obrazovky

Zdroj: Vlastní zpracování

## **Příloha 12 - Teoretický rozbor a praktické využití defektoskopických metod na uživatelské úrovni, ultrazvukové školení**

Před samotným výzkumem ultrazvukové defektoskopie listového etalonu, byly uskutečněny konzultace, mentoring a školení ve firmě R&R NDT s. r. o. v Tuklatech u Prahy. Důvodem konzultací bylo minimalizovat chyby měření, které by mohly být



způsobené obsluhou ultrazvukového defektoskopu Krautkramer Branson USN 52, a získat tak co nejpřesnější data při ultrazvukové defektoskopii etalonu. Dalším důvodem pro toto školení byla hluková expozice na měřícím pracovišti Praha – Kbely. Z tohoto důvodu bylo školení zaměřeno na rušící vlivy prostředí v rozsahu úrovně UT1, UT2 a UT3. Tyto defektoskopická školení nebyla uskutečněna za účelem získání osvědčení defektoskopického pracovníka dané úrovně. Cílem těchto školení bylo pouze získat praktické znalosti o kalibraci ultrazvukového defektoskopu při působení vnějších vlivů. Konzultace byly vedeny panem Ing. Pavlem Prosem, který je společně s panem Ing. Richardem Regazzo, CSc. spoluzakladatelem firmy R&R NDT s. r. o. Konzultace a mentoring byly rozděleny do tří bloků. V prvním bloku bylo potřeba získat obecné znalosti z praktické ultrazvukové defektoskopie. Tyto znalosti byly získány samostudiem z poskytnuté literatury, která slouží ve firmě TESTIMA, spol. s r. o., jako studijní podpora pro studenty ultrazvukové defektoskopie úrovně UT1, UT2 a UT3. Autorem této publikace je pan Ing. Pros. V druhém bloku byla vedena odborná konzultace pro ujasnění si podmínek ultrazvukové defektoskopie s následnou kalibrací historického analogového ultrazvukového defektoskopu Krautkramer Branson (*viz obrázek*) a pochopení potřebných fyzikálních vztahů, které ovlivňují generování a šíření ultrazvukových vln. Následně bylo uskutečněno porovnávací měření s využitím analogového a digitálního defektoskopu.

Ultrazvukové školení ve firmě R&R NDT s. r. o. – Porovnání analogového a ultrazvukového defektoskopického přístroje



1.) *Digitální Krautkramer Branson USM 36*

2.) *Analogový Krautkramer Branson analogový, označení nezjištěné*

Zdroj: Vlastní zpracování

U tohoto analogového defektoskopu bylo zapotřebí provádět veškeré vypočítání a nastavení hodnot potřebných pro měření. Moderní defektoskopické přístroje si díky instalovaným softwarům umí většinu potřebných parametrů vypočítat sami. Moderní ultrazvukové defektoskopické přístroje (*viz obrázek*) dělají samotnou ultrazvukovou defektoskopii uživatelsky přívětivější. Kalibrace analogového ultrazvukového defektoskopu trvá nezkušenému pracovníkovi minimálně 2,5 hodiny, oproti tomu kalibrace digitálního defektoskopu zabere maximálně 20 minut.



Ultrazvukové školení ve firmě R&R NDT s. r. o. – Defektoskopické zkoušení etalonového listu pomocí moderního defektoskopu Krautkramer Branson USM 35



Zdroj: Vlastní zpracování

Ve třetím bloku školení byla uskutečněna série ultrazvukových měření pouze na samotném etalonovém listu s využitím analogového Krautkramer Branson, Krautkramer Branson USM 35, Krautkramer Branson USM 36 a nejmodernější verzi s označením USM 35X S Lemo, která je inovací USM 35 (viz obrázek ).





Ultrazvukové školení ve firmě R&R NDT s. r. o. – Defektoskopické zkoušení etalonového listu pomocí Krautkramer Branson USM 36 a Krautkramer Branson USM 35X S Lemo

a)



b)



1.) *Krautkramer Branson USM 36*

2.) *Krautkramer Branson USM 35X S Lemo*

Zdroj: Vlastní zpracování





Pan Ing. Pros je aktivním defektoskopickým pracovníkem, který vykonává ultrazvukové zkoušení veškerých konstrukčních materiálů po celém světě. Nejpravidelnější oblastí, kde provádí ultrazvukové zkoušení je Izrael. Dále pan Ing. Pros zajišťuje firmě TESTIMA, spol. s r. o. outsourcingovou službu, jako hlavní lektor školení a inspektor zkoušení pro ultrazvukové školení defektoskopických pracovníků všech stupňů.

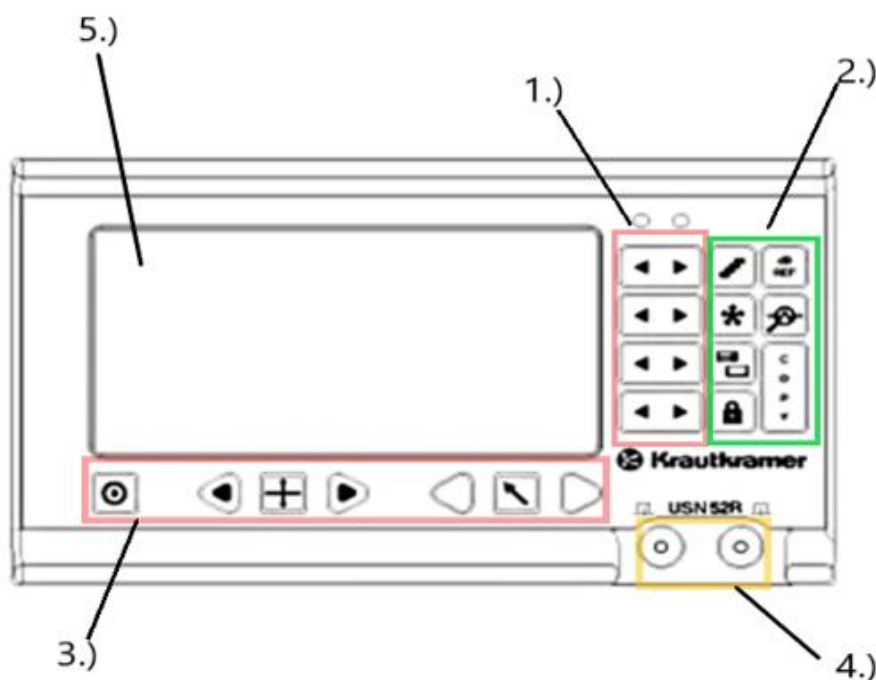
Dále byly za účelem zvýšení přesnosti výsledků kvalitativní ultrazvukové defektoskopie absolvovány konzultace s panem Ing. Tomášem Příbylem, který je jako kontrolor letadel senior – NDT ve společnosti Czech Airlines Technics, a.s. Pravidelné konzultace a odborné školení byla prováděna pod dozorem kpt. Ing. Ondřeje Vajsary – vedoucí defektoskopického týmu Praha – Kbely.

### **Příloha 13 – Obecný popis, ovládací prvky a architektura ultrazvukového defektoskopu Krautkramer Branson USN 52R**

Použitý defektoskopický přístroj s typovým označením USN 52 – R (*viz obrázek*), je přenosný ultrazvukový defektoskop s dobře čitelným displejem. Přístroj umožňuje provádět mobilní ultrazvukovou defektoskopii v terénu přímo u stroje nebo je možné využít síťové napájení. Bateriové napájení přístroje zajišťuje 6 kusů baterií Ni – Cd o hodnotě jedné baterie 1,2 V – 4,5 Ah. Bateriové napájení přístroje umožňuje jeho činnost průměrně po dobu 35 minut.



## Ovládací prvky ultrazvukového defektoskopu UNS 52 R



- 1.) Funkční klávesy pro změnu nastavení a hodnoty přístroje
- 2.) Speciální klávesy pro okamžité vyvolání speciálních funkcí – změna hodnoty decibelů, ukládání hodnoty echa, zamrznutí obrazovky, kopírování měřené hodnoty, uzamknutí hodnot, zoom a lupa
- 3.) Funkční klávesy pro přepínání mezi provozními úrovněmi
- 4.) Připojovací konektory pro datový kabel sondy



5.) *Elektronický přístroj (poznámka: nelze určit konkrétní typ displeje. Výrobce nikde neuvádí typ displeje svých defektoskopických přístrojů. Nespornou publikovatelnou výhodou defektoskopických přístrojů Krautkramer Branson je čitelnost displeje při intenzivním osvětlení okolního prostředí a při pozorování z různých úhlů)*

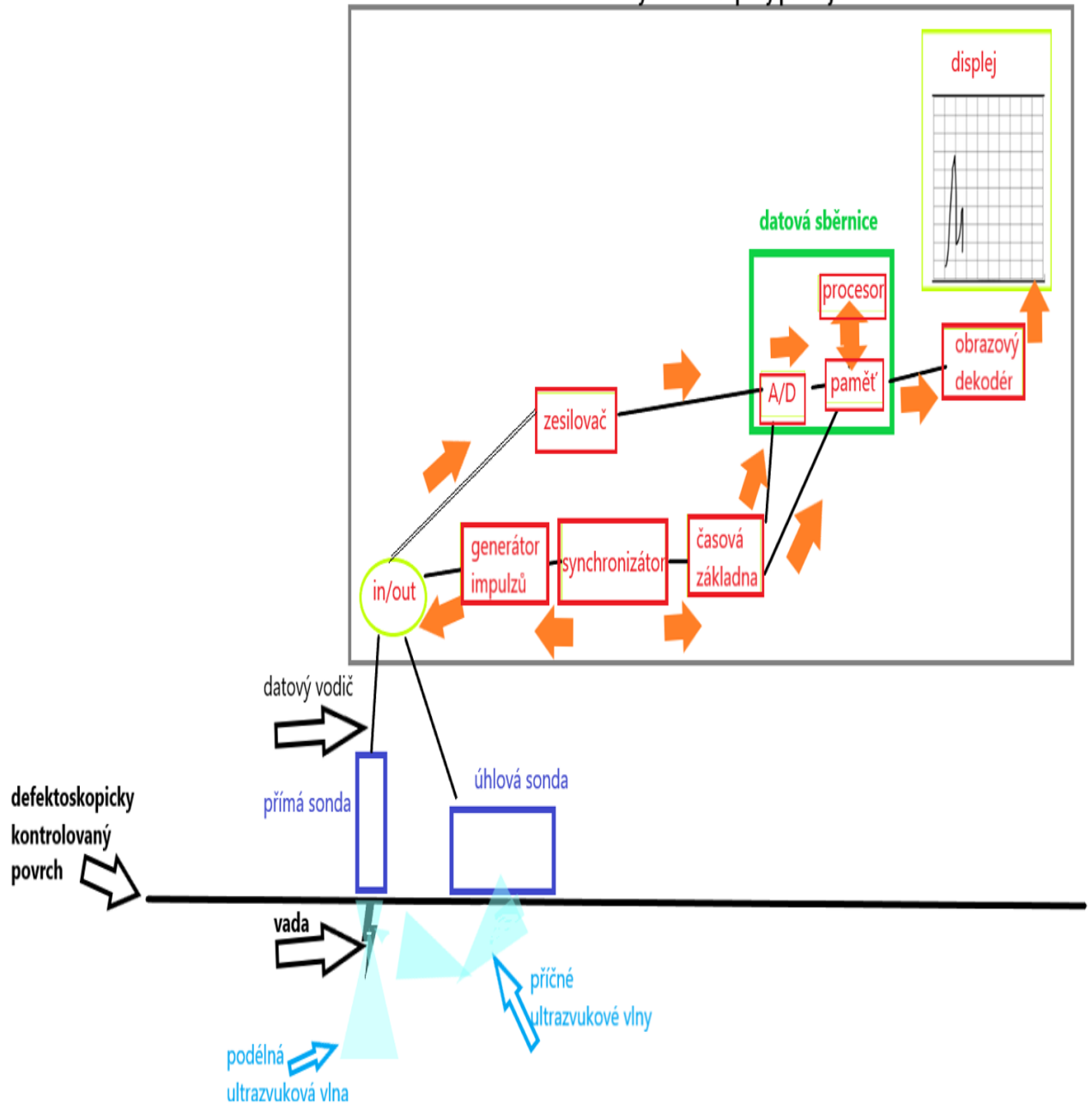
Zdroj: Vlastní zpracování + manuál pro obsluhu USN52 – R

Ultrazvukový defektoskop USN 52–R je digitální přístroj pro ultrazvukovou defektoskopii, který byl vyroben v roce 1999, a přesto poskytuje obdobné výkonnostní parametry jako dnešní moderní ultrazvukové defektoskopy stejné značky. Architektura (viz obrázek ) a výkonnost ultrazvukového defektoskopu je tedy v porovnání s moderními přístroji totožná, pouze postrádá výkonný software, který by zajišťoval uživatelskou přívětivost ultrazvukového měření ve smyslu automatického dopočítávání potřebných hodnot. Podle použité ultrazvukové sondy, ultrazvukové metody měření a nastavených hodnot, lze využít defektoskop USN 52–R k indikování, lokalizaci a vyhodnocení materiálových vad a k měření tloušťek stěn.

Architektura ultrazvukového defektoskopického přístroje USN 52 – R



ultrazvukový defektoskopický přístroj USN52



Zdroj: Vlastní zpracování

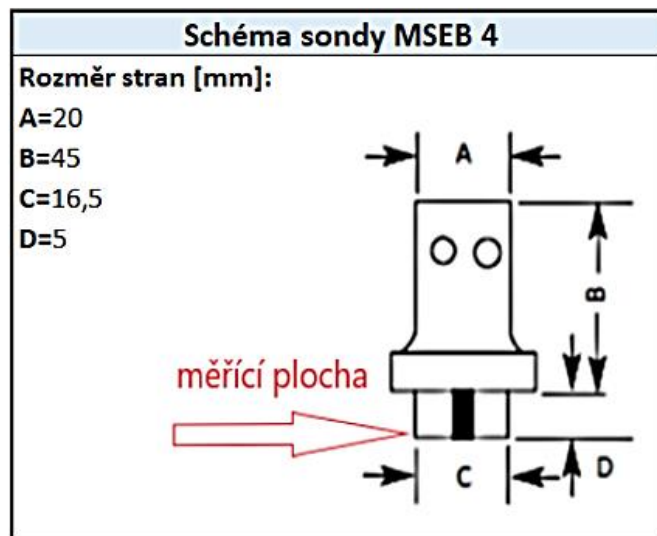
## Příloha 14 – Obrázky, schématické uspořádání a obecné parametry použitých ultrazvukových sond

Během ultrazvukového měření byla použita přímá dvouměničová sonda s Alpha stíněním (viz obrázek), jednoměničová úhlová sonda s Alpha stíněním a 45° úhlovým ultrazvukovým svazkem (viz obrázek), jednoměničová úhlová sonda s Alpha stíněním



a 60° úhlovým ultrazvukovým svazkem (viz obrázek ), jednoměničová úhlová sonda s Alpha stíněním a 70° úhlovým ultrazvukovým svazkem (viz obrázek ), jednoměničová úhlová sonda s Gama stíněním a 90° úhlovým ultrazvukovým svazkem (viz obrázek ).

Ultrazvuková kontaktní dvou měničová sonda typu MSEB4 a její schématické znázornění



Zdroj: Vlastní zpracování

Ultrazvuková kontaktní jedno měničová sonda typu MWB45-4



Zdroj: Vlastní zpracování

Ultrazvuková kontaktní jedno měničová sonda typu MWB70-4



Zdroj: Vlastní zpracování

Ultrazvuková kontaktní jedno měničová sonda typu MWB60-4



Zdroj: Vlastní zpracování

Ultrazvuková kontaktní jedno měničová sonda typu MSW-QC





Zdroj: Vlastní zpracování



Tloušťka akustických měničů všech používaných sond je přibližně  $d_m = 0,65$  mm. Tento rozměr byl vypočítán ze vztahu půl vlnové délky podélných vln v měniči (*viz rovnice*). Tento vztah obdobně platí i pro příčné vlny. Podmínkou je hodnota jmenovité frekvence dané sondy, tu mají všechny sondy stejnou.

$$d_m = \frac{\lambda_L}{2}$$

$d_m$  – tloušťka měniče [mm]

$\lambda_L$  – vlnová délka podélné vlny v měniči [mm]

Zdroj: Pros ... . . .

Umělá vada, která bude defektoskopicky zkoumána je orientována vůči směru pohybu ultrazvukové sondy, jako vada povrchová plošná. Defektoskopicky zkoušený povrch etalonového listu je geometricky velmi členitý. Z důvodu těchto omezujících podmínek měření byla využita univerzální ultrazvuková metoda, a to metoda impulzně odrazová neboli A – scan metoda. A – scan metoda poskytuje velmi přesné výsledky ultrazvukové defektoskopie pro hledání vad materiálů. Hodnota zpětného vadového echa u této metody vyjadřuje vzdálenost ultrazvukového měniče od možného defektu v závislosti na čase mezi vyslaným a odraženým ultrazvukovým svazkem. Další důležitou hodnotou tohoto zpětného vadového echa je jeho hodnota amplitudy. Tato metoda musela být použita i z důvodu, že měřený etalonový list, nesplňuje podmínku rovnoběžnosti vzájemně kontrolovaných protilehlých povrchů. Ultrazvuková defektoskopie tedy byla prováděna odrazovou metodou, s využitím pouze jedné sondy. Z důvodu průkazných výsledků vzájemného porovnání jednotlivých sond, byly při defektoskopickém měření použity sondy se zcela rozdílnými ultrazvukovými a technickými vlastnostmi

Z hlediska konstrukce použitých sond (*viz schéma*), byly použity Alpha a Gamma sondy. Alpha sondy jsou vysoce tlumené sondy, které vysílají krátké impulsy ultrazvukových vln a zpětné echo se poté na displeji ultrazvukového defektoskopu

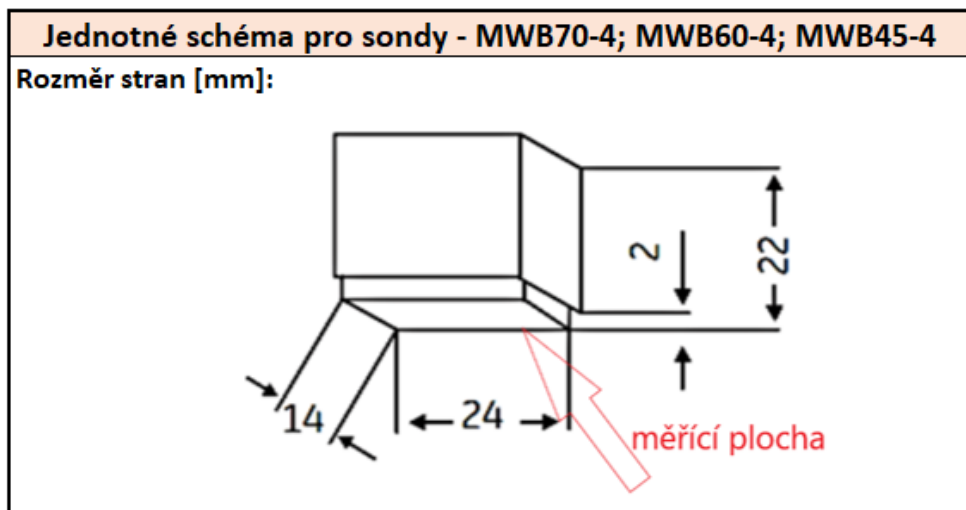


projeví jako úzký vrcholový signál. Oproti Alpha sondám jsou Gamma sondy tlumeny jen velmi málo, ale naopak vysílají mnohem delší svazky ultrazvukových impulsů, které se jako zpětné echo projeví na displeji ultrazvukového defektoskopu, jako výrazně široký vrcholový signál.

Schéma sondy MSW - Quick Change

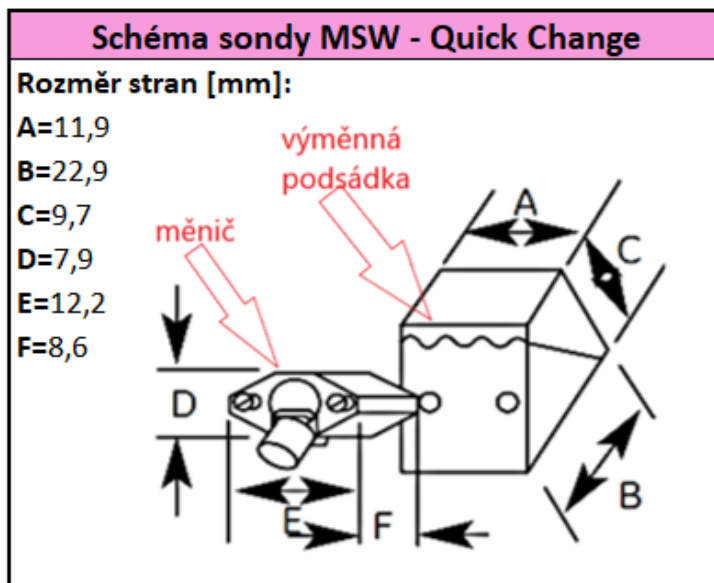
Zdroj: Katalogový list výrobce

Jednotné schéma pro sondy – MWB70-4; MWB60-4; MWB45-4



Zdroj: Katalogový list výrobce

Schéma sondy MSW – Quick Change



Zdroj: Katalogový list výrobce

## Příloha 15 – Typ akustické vazby, stanovení její tloušťky a její aplikování

Použitý vazební prostředek má ideální přilnavost na kovově hladkém povrchu etalonového listu, na kterém působí jako inhibitor. Častým problémem kontaktní ultrazvukové defektoskopie je právě nevhodně zvolený akustický prostředek. Olej SAE20 ideálně smáčí měřený povrch etalonu. Díky této roztékavosti oleje, se snadno upravuje optimální tloušťka vazebního prostředku. Ta byla stanovena vzhledem k počtu měřících cyklů pro všechny ultrazvukové sondy jednotně. Následný proces stanovení optimální tloušťky vazebního prostředku oleje SAE20, vyplývá z poznatků a mnohačetných měřících pokusů pana Ing. Prose. Vazební prostředek se vylije z láhve na měřící plochu etalonu. K aplikaci kontaktního prostředku by se neměl používat štětec. Důvodem nevhodného použití štětců je, že se tahem štětce vytvoří nerovnoměrná tloušťka vazebního prostředku vlivem různě orientovaných chlupů štětce. Dále se při aplikaci vazebního prostředku štětcem uvolňují jednotlivé chlupy, které v samotném důsledku ovlivňují spojitost prozvučení vazebního prostředku. Z tohoto důvodu a důvodu sériového měření byla tloušťka vazebního prostředku po



jejím rozlítí na měřené ploše upravena tahem delší hrany plastové eurofolie. Tímto aplikačním prostředkem bylo dosaženo jednotné tloušťky vazebního prostředku  $d_v \approx 0,22$ . Tento aplikační prostředek umožňoval jednotně kopírovat nepravidelný povrch etalonového listu.

Ideální tloušťka vazebního prostředku je  $d_v = 0$  mm. Této hodnoty nelze dosáhnout. Proto byla stanovena optimální tloušťka vazebního prostředku  $d_v = 0,22$  mm, ta je rovna půl násobku vlnové délky a zaručuje tak kvalitní prozvučení. Tato optimální tloušťka stanovena z rovnice (viz rovnice 3) pro obecné stanovení maximálního průchodu ultrazvukových vln skrze akustickou vazbu.

$$c_L(\text{motorový olej SAE 20}) = 1740 \text{ m/s při teplotě oleje } 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$f(\text{sonda přímá MSEB4}) = 4 \text{ MHz}$$

Tloušťka akustické vazby

$$\lambda_L = \frac{c_L}{f} = \frac{1,74}{4} = 0,435$$

$$d_v = \frac{\lambda_L}{2} = 0,2175 \approx 0,22$$

$c_L$  - rychlost šíření podélných longitudinálních ultrazvukových vln [mm/s]

$\lambda_L$  - vlnová délka podélných longitudinálních ultrazvukových vln [m]

$f$  - frekvence vysílací sondy [MHz]

$d_v$  - tloušťka vazebního prostředku [mm]



## **Příloha 16 – Obecný postup kalibrace ultrazvukového defektoskopického přístroje pro potřeby kvalitativního měření na etalonovém listu**

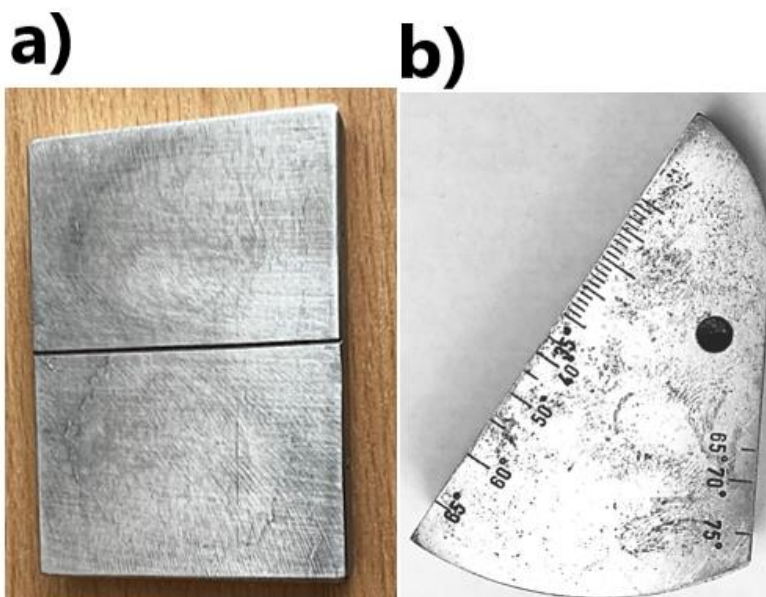
Kompletní kalibrace defektoskopického přístroje se provedla pouze před začátkem defektoskopického měření. V průběhu měření byly použity sondy vysílající podélné a příčné ultrazvukové vlny. Z tohoto důvodu museli být provedeny dvě rozdílné kalibrace. Při samotné defektoskopii bylo již jen toto nastavení pro danou sondu aktivováno. Kalibrace ultrazvukových defektoskopů se doporučuje podle norem ČSN EN ISO 2400 a ČSN EN ISO 7963 provádět na ocelových etalonových měrkách K1, K2, schodových měrkách a spárových měrkách. Výrobce defektoskopického přístroje ale doporučuje ideálně provádět kalibraci na zakázkovém identickém etalonu, který chemickým složením odpovídá defektoskopicky kontrolovanému materiálu.

*Pro všechny kalibrační postupy použijte kalibrační blok se známou tloušťkou, vyrobené ze stejného materiálu a mající stejnou teplotu jako váš testovaný objekt Krautkramer USN 52R/USN 52L . Issue 05, 02/00 .5kapitola -23 strana*

Kalibrace defektoskopického přístroje USN 52R byla u všech sond provedena pouze na zakázkových etalonových měrkách vyrobených pro vojenský defektoskopický tým Praha – Kbely. Tyto měrky jsou vyrobeny z hliníkové slitiny typu 2024-T8XX. Postupy kalibrace byly uskutečněny u podstatných parametrů ve shodě s postupy podle norem ČSN EN ISO 2400, ČSN EN ISO 7963 a získaných zkušeností v ultrazvukové defektoskopii: *pro přesné nastavení rozsahu časové základny je důležité, aby koncová echa byla vždy nastavena na stejnou výšku změnou dB, například na 80% rastru (Ing. Pavel Pros), jeden měnič – jedna tloušťka a dva měniče – dvě tloušťky (pan Jaroslav Dvořák, Echo-Test Praha).*

Ultrazvukové kalibrační měrky





- a) *Spárová kalibrační měrka pro podélné vlny typu ultrazvuková kalibrační měrka, zhotovená v souladu s ANSI/AWS, MIL-STD*
- b) *Úhlová kalibrační měrka pro příčné vlny typu ultrazvuková kalibrační měrka, zhotovená v souladu s ANSI/AWS, ČSN EN ISO 7963, MIL-STD*

Zdroj: Vlastní zpracování

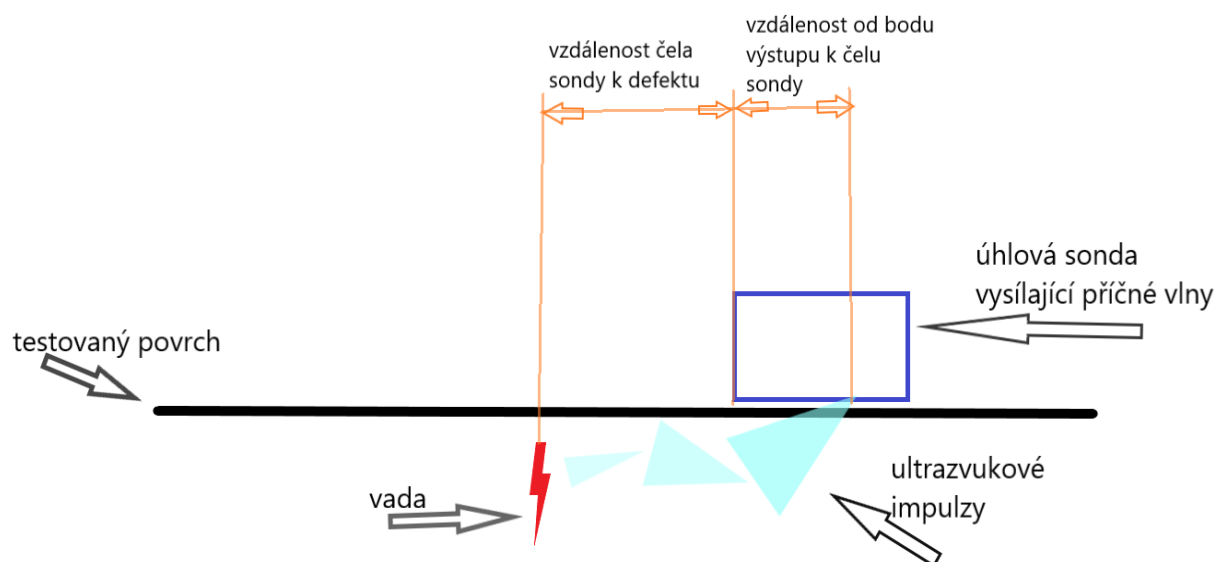
Podle pokynů uvedených v manuálu pro obsluhu přístroje, byla provedena základní kalibrace přístroje pro všechny sondy pomocí funkce AutoCal. Tato funkce umožňuje provést po připojení jakékoliv sondy kontrolu jejích parametrů a automaticky vykonat základní typ nastavení přístroje. Podmínkou této automatické kalibrace je, že musí obsluha nastavit na rastru přístroje minimálně dvě kalibrační echa. Tato pozice ech se určuje na ose X tzv. na zvukové dráze, o které bude dále pojednáváno jako o  $n$  dílcích určující vzdálenost. Veškeré další postupy kalibrace byly zcela rozdílné, a to v závislosti na druhu šíření ultrazvukových vln danou sondou a nastavení časové základny pro dané vlnění.

Správná hodnota časové základny je důležitým parametrem pro identifikování a přesné lokalizování vady. Předmětem tohoto ultrazvukového měření je vadu pouze identifikovat, proto nebyl při kalibraci časové základny zohledněn bod výstupu ze sondy. Bod výstupu neboli index sondy je místo na měřicí ploše sondy, kde ultrazvukové impulzy opouští prostor sondy a vnikají do jiného rozhraní. Bod výstupu



je důležitou hodnotou pro naprosto přesné určení časové základny, která se celkově skládá v podélném směru z bodu výstupu, poměru vzdálenosti bodu výstupu k čelu sondy a od čela sondy k místu vady (*viz schéma* ).

Složky časové základny v podélné ose, princip platný pro podélné vlny pod úhlem šíření a příčné vlny



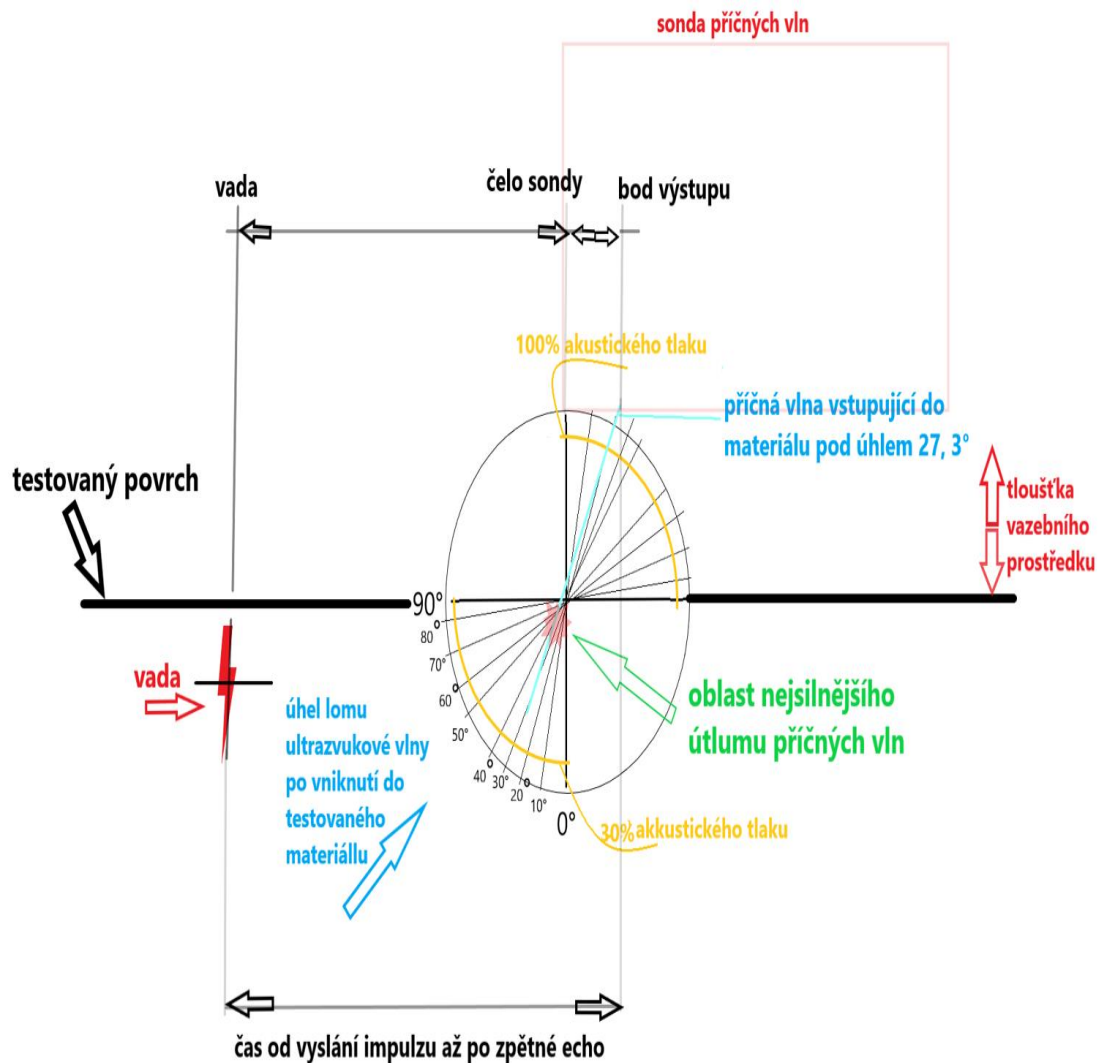
Zdroj: Vlastní zpracování

Hodnotu časové základny tedy vyjadřuje prostorová vzdálenost ultrazvukového měniče od možného defektu v závislosti na čase a úbytku akustického tlaku mezi vyslaným a odraženým ultrazvukovým svazkem a následně na displeji přístroje vyjádřené hodnotě amplitudy. Tento princip je podstatou ultrazvukového snímání jakéhokoliv zájmového bodu (*viz schéma* ). V případě tohoto kvalitativního měření je základem metody A – scanování. Tato metoda umožňuje zobrazit výsledek jednorozměrného signálu výchylek kontrolního ultrazvuku. Dále z tohoto principu vychází veškeré prostorové metody scanování jako 2D scanování, 3D scanování a 4D scanování. Dynamické víceprostorové metody scanování 3D a 4D se využívají především ve zdravotnictví, ale jejich výsledek je pouze softwarovou úpravou výsledků



2D scanování. Metoda 2D scanování neboli B – scanování se běžně v ultrazvukové defektoskopii využívá.

Funkční schéma prostorového ultrazvukového měření, platný obecný princip pro podélné a příčné vlny



Zdroj: Vlastní zpracování

Pro kalibraci defektoskopického přístroje na vysílání podélných vln, byla k datovému kabelu defektoskopického přístroje připojena dvouměničová přímá sonda typu MSEB4 se zakázkově vyrobenou předsádkou o tloušťce měřící plochy 30 mm (viz



*obrázek* ). Předsádka je vyrobena z polykarbonátu, který je pružný a nijak při nasazování nepoškozuje tělo ultrazvukové sondy. Polykarbonát je UV stabilní a jeho struktura umožňuje propouštět vlnění různých frekvencí bez jejich útlumu. Tato předsádka byla zapůjčena firmou R&R z důvodu zvýšení přesnosti ultrazvukové defektoskopie.

Předsádky přímých sond



a)



b)



a) Varianta úhlové 45° předsádky pro přímé sondy podélných vln, která se využívá pro ultrazvukovou defektoskopii tenkostěnných tlakových nádob ve firmě Lovochemie a.s.

b) Zapůjčená předsádka pro přímou sondu MSEB4

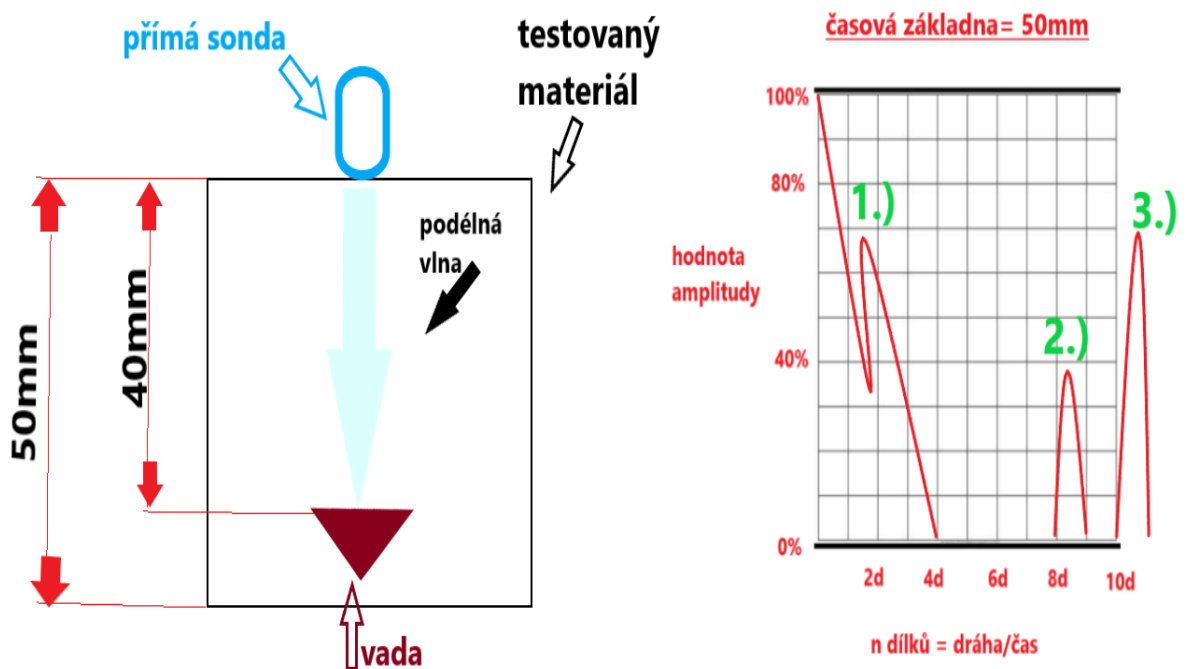
Zdroj: Vlastní zpracování + R&R

Následně byla zahájena samotná kalibrace ultrazvukového defektoskopu pomocí přímé sondy s předsádkou. Po aktivaci napájení defektoskopického přístroje byla v softwarovém prostředí přístroje nastavena tabulková hodnota rychlosti podélných vln v hliníku  $c_L=6,32$  km/s. Poté bylo provedeno nastavení časové základny.



Hodnota časové základny byla nastavena pro podélné vlny v hodnotě  $s_B = 50$  mm. Echogram neboli rastr defektoskopického přístroje může mít nastavené různé poměry zobrazování jako např 5x5, 10x10 dílků. Při tomto defektoskopickém měření bude použit pouze rastr v poměru 10 x 10 dílků. Nastavená hodnota časové základny přiřazuje daným dílkům rastru různou hodnotu prostorové vzdálenosti od čela sondy k hledané vadě. Důvodem takovéto vady, která vznikla již v procesu kalibrace, jsou opomenuté okrajové podmínky pro šíření ultrazvukových vln. Podle postupů stanovených výrobcem se očekává následující mechanismus měření. Je-li nastavena hodnota časové základny  $s_B = 50$  mm a rychlost šíření vln pro dvou měničovou sondu, tak se předpokládá, že jakékoliv tvarové echo na pozici určitého dílku vypovídá o tom, že ultrazvuk prošel mrtvým pásmem, pronikl rozhraním do povrchu testovaného materiálu, byla indikovaná vada a poslední tvarové echo je odraženým echem od rozhraní testovaného materiálu (viz schéma).

Praktická ukázka mylné podstaty kalibrace ultrazvukové defektoskopie na nekonečném odrazeči s využitím přímé sondy



1. Echo představuje vysílací impuls, který definuje mrtvé pásmo. Většina přímých sond není proto pro hloubky 20mm účinná
2. Echo je vadovým echem umělé vady
3. Echo je koncovým echem





Zdroj: Vlastní zpracování

Podle postupů výrobce se následně upraví pouze manuálním posuvem vadové a koncové echo na takové pozice dílků rastru, které odpovídají reálné vzdálenosti vady a koncové vzdálenosti etalonu. Tyto vzdálenosti jsou změřeny buďto přímo pomocí mechanických měřidel či jsou tyto vzdálenosti uvedeny v průvodní zprávě etalonu.

Takováto úvaha kalibrace je pro praktickou ultrazvukovou defektoskopii zcela nevhodná a lze jí najít i v některých literárních pramenech o podstatě šíření podélných vln. Tento postup kalibrace je zatížen velikou chybou, a to z důvodů jako je neregulovatelný šum prostředí, nekonstantní tloušťka testovaného materiálu a jakost jeho povrchu, chyba oběhu ultrazvuku změnou dráhy vůči odrazovému místu a změna průměru ultrazvukového svazku při průchodu rozhraním.

Při kalibraci ultrazvukového defektoskopického přístroje USN52 – R, byl zohledněn anharmonický pokles akustického tlaku vysílaných impulsů vlivem neregulovatelného šumu prostředí (*viz* ), mrtvé frekvenční pásmo sondy MSEB4 podle vyzařovacího diagramu (*viz schéma* ) a rozdílná rychlost ultrazvuku v plexiskle předsádky a hliníkovém etalonu. Jednoznačná čitelnost všech tvarových ech na rastru displeje, byla zajištěna v souladu s podmínkou čitelnosti tím, že byla-li nedodržená šířka echa, tak o to více byla zvýšena intenzita kalibrovaných ech na rozdíl 12 dB vůči registrovanému šumu během kalibrace, to znamená že byla výška kalibrovaných amplitud zesílena více než na 100% rastru, přibližně 120 %. Postup této kalibrace byl proveden na základě matematické úvahy. *Firma Krautkramer uvádí, že přípustnost vady lze prokázat pouze, pokud je odstup mezi vysílacím impulsem a vadovým echem alespoň 6 dB a není ovlivněná samotná šířka echa.*



### Matematická úvaha:

#### LEGENDA:

1. VSE – 1. vstupní echo
2. VSE – 2. vstupní echo
1. KE – 1. kontrolní echo
2. KE – 1. kontrolní echo

#### DÁNO:

$$t_1 = 30 \text{ mm}$$

$$t_2 = 20 \text{ mm}$$

$$\text{v plexiskle} \quad c_{L1} = 2730 \text{ m/s}$$

$$\text{v hliníku} \quad c_{L2} = 6320 \text{ m/s}$$

#### Výpočet pozice 1. VSE na základě zbytečné dráhy ultrazvuku v předsádce:

$$1. VSE = \frac{t_1 * c_{L2}}{c_{L1}} = \frac{30 * 6320}{2730} = 69,5 \text{ mm} \approx 70 \text{ mm}$$

#### Výpočet pozice 2. VSE:

$$2.VSE = 2 * 1.VSE = 140 \text{ mm}$$



### Celková dráha ultrazvuku pro 1.KE:

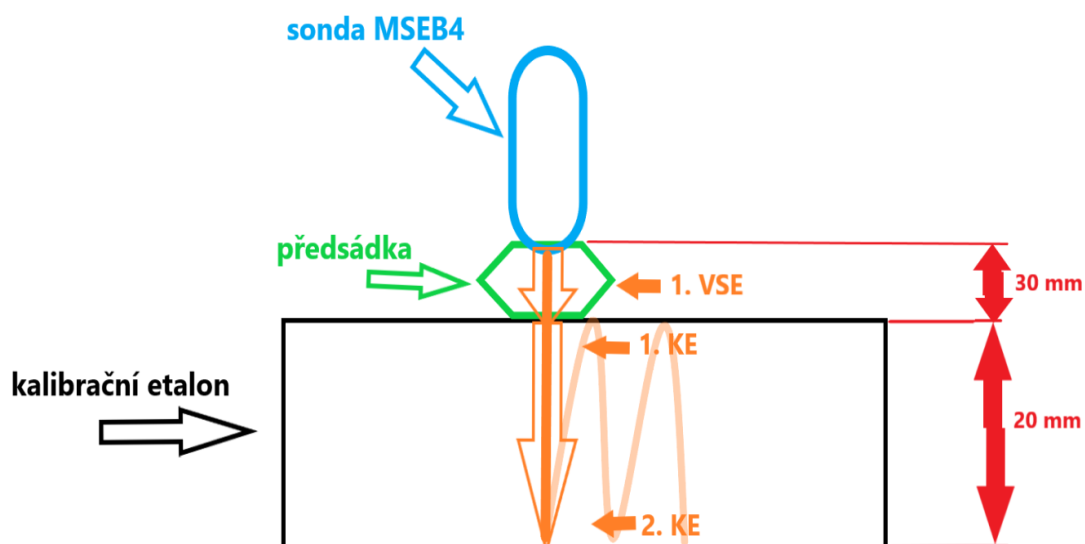
$$1.KE = t_2 + 1.VSE = 20 + 70 = 90 \text{ mm}$$

### Celková dráha ultrazvuku pro 2.KE:

$$2.KE = 2 * t_2 + 1.VSE = 2 * 20 + 70 = 110 \text{ mm}$$

Na základě provedené matematické úvahy o rozdílných rychlostech ultrazvuku šířícího se v plexiskle a hliníku během ultrazvukové defektoskopie, který se šíří testovaným materiálem impulsně (*viz schéma*), se následně provedla manuální kalibrace daných ech.

Kalibrace pro průchod podélných vln přes dvě rozhraní



Zdroj: Vlastní zpracování



Tato kalibrace posuvu impulsů byla provedena za takovým účelem, aby poloha daných ech odpovídala reálné vzdálenosti jednotlivých rozhraní, přes které se šíří ultrazvuk. Poloha prvního vstupního echa se nastavila na začátek rastru, na polohu nula, tímto se odrušilo snímání vysílacího impulsu a jiných tvarových ech, která nejsou pro defektoskopii potřebná a posunuly se mimo rastr. Poloha prvního koncového neboli kontrolního echa, se posunula na pozici rastru o časové základně 50 mm na polohu pátého dílku rastru. Tato poloha odpovídá vzdálenosti ultrazvuku, který v 30 mm předsádce má 10 mm mrtvou zónu, za kterou vystupuje jako 1.VSE od kterého je povrch testovaného materiálu vzdálen na 20 mm, proto je echo ustanoveno na tuto pozici. Druhé kontrolní echo je umístěno na pozici rastru, která odpovídá vzdálenosti protilehlé strany etalonu, tedy na desátý dílek, který odpovídá vzdálenosti 20 mm od 1.KE (viz schéma ).

Znázornění kalibrace na echogramu



*1.VSE – první vstupní echo*

*1.KE – první kontrolní echo*

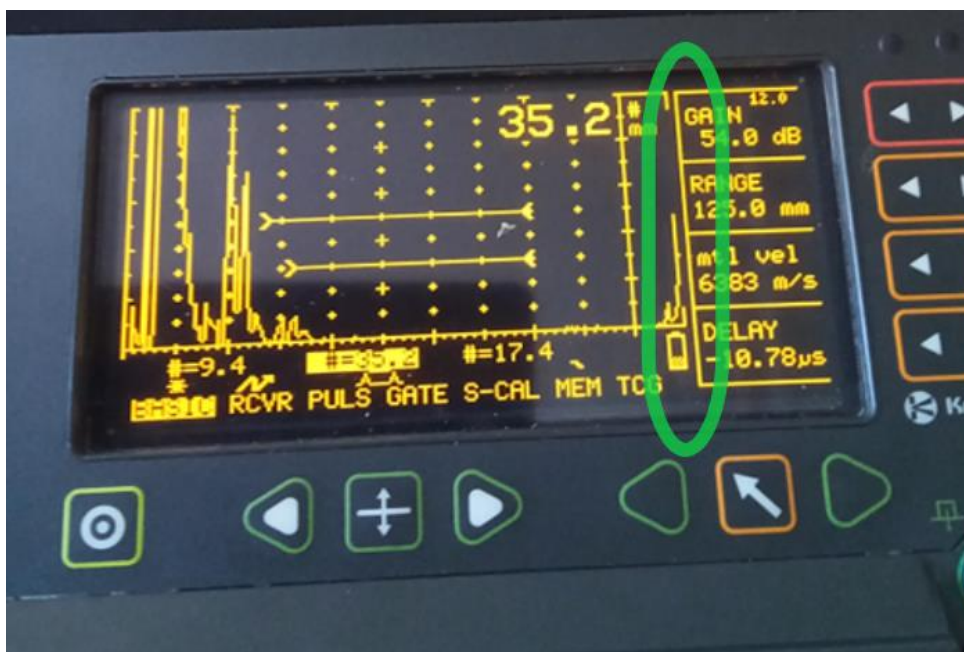
*2.KE – druhé kontrolní echo*



Zdroj: Vlastní zpracování

Následně byla hodnota 1.VSE zesílena přes hodnotu 100 % rastru kvůli čitelnosti jakékoliv případné vady. Hodnota 1.KE byla zesílena na hodnotu 80 % rastru a hodnota 2.KE také. Pozice 2.KE je sice již mimo rastr, ale na displeji je vidět (viz obrázek). Tímto byla provedena kalibrace za účelem maximalizovat přesnost ultrazvukové defektoskopie. Obdobný postup byl implementován i pro kalibraci příčných vln.

Ukázka čitelnosti tvarových ech mimo rastr



*Poznámka: znázorněné echo je pouze ukázkou čitelnosti ech i mimo pozici rastru.*

Zdroj: Vlastní zpracování

Samotná kvalitativní ultrazvuková defektoskopie bude prováděna na etalonovém listě, jehož přesné rozměry nejsou stanoveny. Je ale možné provést orientační změření jeho tloušťky v místě kontrované vady. Naměřená tloušťka etalonového listu v místě vady, byla stanovena na 20 mm. Provedená kalibrace ultrazvukového přístroje byla ověřena i na tomto etalonovém listě před začátkem samotného měření. Pozice umělé vady se nachází od povrchu do hloubky 0,5 mm, tento prostor je vyplněn vzduchem. Následné ověření kalibrace nastaveného přístroje byla na etalonovém listě úspěšná a



vada se detekovala v pozici 1. KE, jeho pokřivením. Zjistitelnost a určení vady vlivem změny profilu echa, bylo ověřeno i matematickou úvahou.

### Určení vady vlivem změny profilu echa:

- Metoda čtyř půl vln vrcholu:
- Hloubka vady  $h_1 = 0,5 \text{ mm}$

$$\lambda = \frac{c_{L2}}{f} = \frac{6,32}{4} = 1,58 \text{ mm}$$

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{1,58}{4} = 0,395 \text{ mm} \approx 0,4 \text{ mm}$$

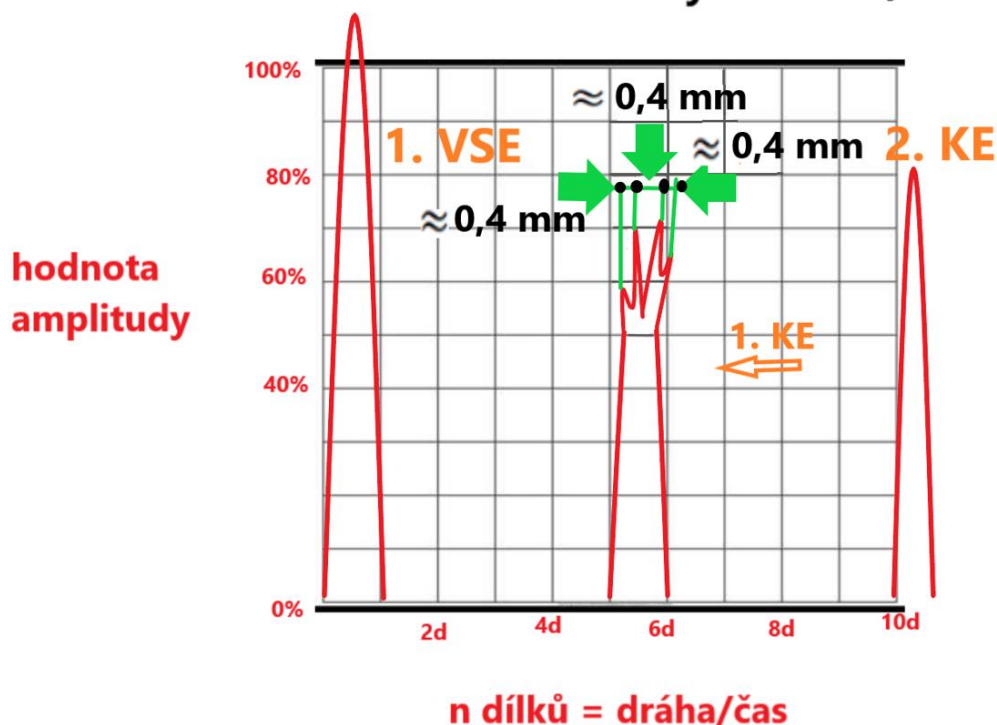
$$h_1 > \frac{\lambda}{4}$$

Metoda určení vady pomocí metody čtyř půlvln vrcholu





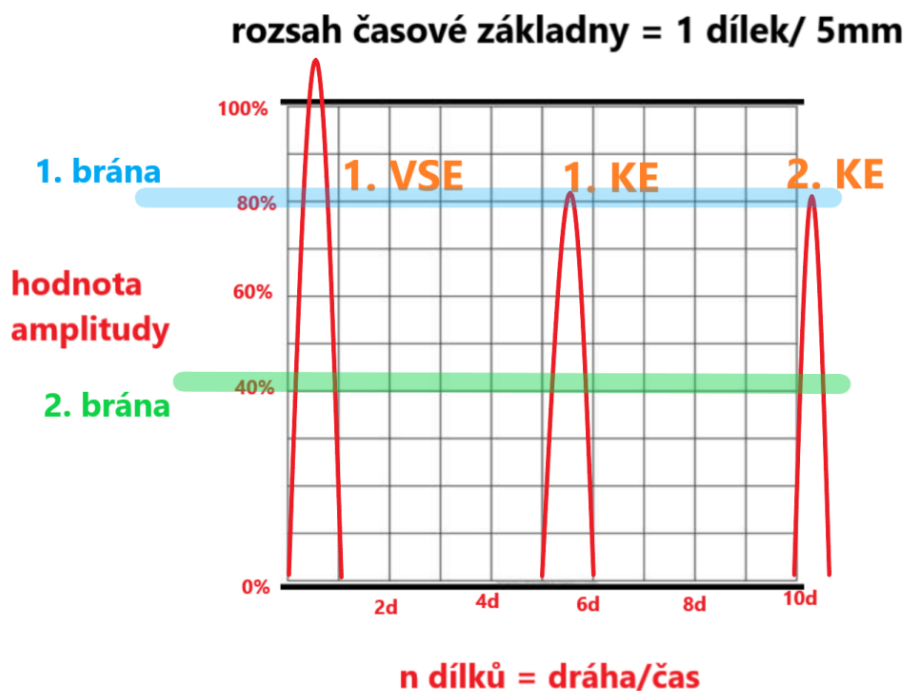
### rozsah časové základny = 1 dílek/ 5mm



Zdroj: Vlastní zpracování

Takto provedená kalibrace by měla zajišťovat odhalení jakékoliv vady, hned bezprostředně pod plochou předsádky. Aby nedošlo v průběhu ultrazvukového měření k zamaskování měřené vady, tak byly na rastru defektoskopu aktivovány pomocné indikační přímký neboli brány (*viz schéma*). Tyto brány umožňují indikovat na základě předešlé kalibrace, požadované echo, které by se mohlo při ultrazvukovém měření skrýt v akustickém šumu. Do pozice 80 % rastru byla ustanovena 1.první brána a do pozice 40 % rastru 2. brána. Výsledkem kvalitativního měření je odečtená výška vadového echa na rastru. Klesne-li vadové echo pod druhou bránu, tak je hodnota vady také zaznamenána, ale již není brána v úvahu jako prokazatelná, protože je ovlivněna šumem prostředí.

Rozsah čitelnosti vad



Zdroj: Vlastní zpracování

Následně byla tato kalibrace pro podélné vlny ukončena a nastavení bylo uloženo a uzamčeno v paměti přístroje. Obdobná kalibrace byla provedena i pro úhlové sondy.

Po připojení jednoměničové úhlové sondy si software ultrazvukového defektoskopu dopočítal hodnotu potřebného akustického tlaku na základě jmenovité frekvence sondy. Tato hodnota akustického tlaku byla následně manuálně upravena. Tento zásah do nastavení byl proveden nad rámec postupů stanovených manuálem pro obsluhu přístroje, ale vycházel ze zkušeností získaných z ultrazvukového školení u pana Ing. Prose. Jakékoliv nastavení ultrazvukového přístroje je nejlepší ověřovat přímo na defektoskopicky kontrolovaném předmětu, a to z důvodu jeho výjimečného povrchového nátěru, materiálového složení a jeho technologických procesů tváření a obrábění, které zapříčiní změnu krystalografické mřížky tohoto testovaného materiálu. O této výrazné vadě pojednával již H.L. Carson: IIW Doc: VC – 130–68/OE. <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/42/022/42022192.pdf>

*výkonné řady ultrazvukových kalibračních bloků při určování indexu sondy a úhlu paprsku sond se smykovou vlnou a zjistili, že geometrické tvary různých bloků v*

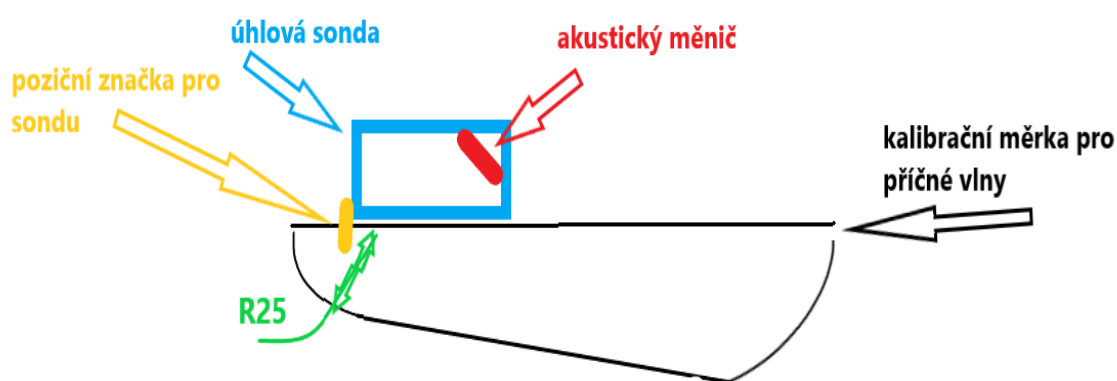


*kombinaci s nedostatkem uniformity v ultrazvukovém paprsku, jsou hlavními faktory při vytváření rozdílných získaných výsledků.*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0029102167900151>

Kalibrace defektoskopického přístroje USN 52 R pro příčné vlny, byla provedena obdobným postupem a ve shodě s důležitými body norem tak, jako byla provedena u podélných vln. Sondy které vysílají příčné vlny, neboli podélné vlny pod úhlem jsou sonda MWB70-4 (viz obrázek), MWB60-4 (viz obrázek), MWB45-4 (viz obrázek) a sonda povrchových vln MSW-QC (viz obrázek). Kalibrace těchto sond byla provedena jednotně a následným stručným postupem. Po připojení sondy MWB45-4 k datovému kabelu byla nastavena na ultrazvukovém přístroji hodnota rychlosti příčných ultrazvukových vln v hliníku  $c_T=3,13$  km/s. Poté byl na úhlovou měрку typu K2, která je vyrobená z hliníku, nanesen vazební prostředek. V defektoskopickém přístroji byla nastavená hodnota časové základny  $s_B=100$  mm. Na těle úhlové měrky je vyznačena poziční značka pro jednotlivé druhy úhlových sond, které vojenské letiště Praha – Kbely využívají. Kalibrace příčných vln ultrazvuku je zatížena nezanedbatelnou chybou, o této skutečnosti pojednával již v roce 1968 H. L. Carson.

Schéma sondy příčných vln pro rádiusovou kalibraci



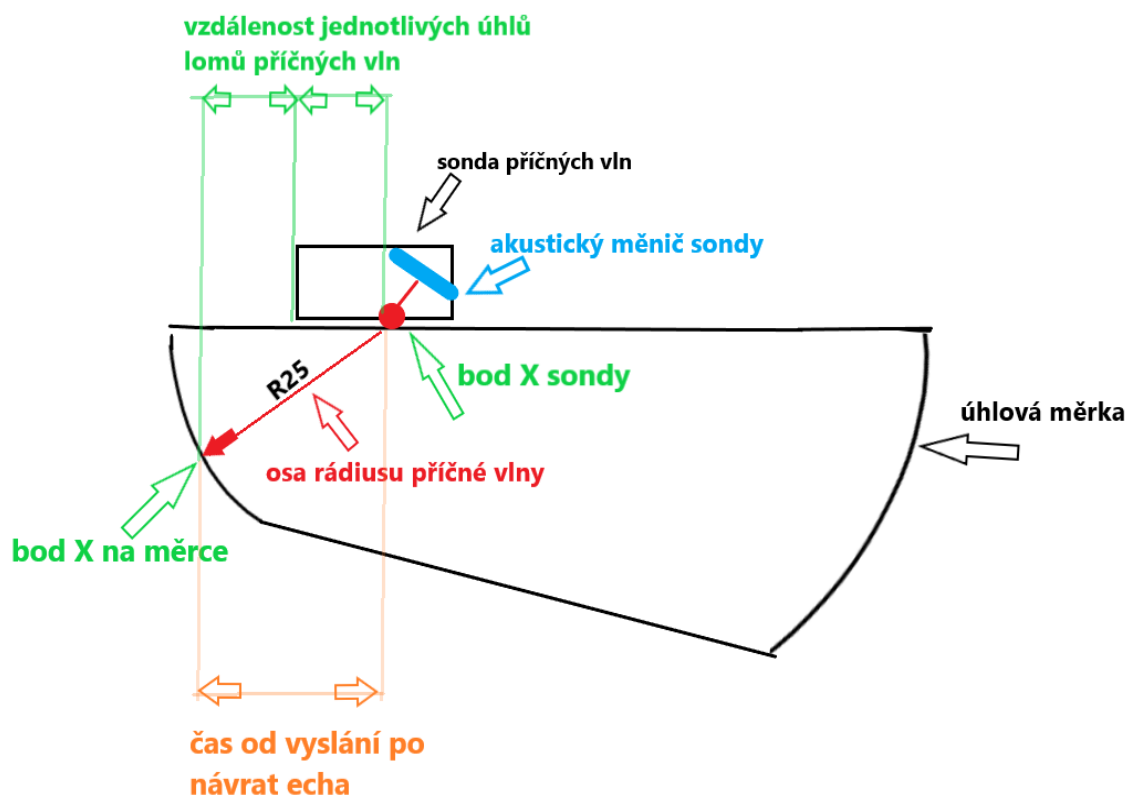
Zdroj: Vlastní zpracování

Po přiložení sondy k povrchu měrky bylo uskutečněno ověření správnosti kalibrace, která je z části dopočítávána i softwarem přístroje. Má-li ultrazvukový přístroj platnou certifikaci a není nijak poškozen, tak by měl být software přístroje schopen po připojení



určité sondy rozpoznat její jmenovitou frekvenci a charakter vysílaných vln. Tím je automaticky nastavována i hodnota akustického tlaku. Toto automatické nastavování parametrů defektoskopického přístroje je nevhodné využívat především při kalibraci příčných ultrazvukových vln. V tomto případě je kompletní nastavení a ověření správné kalibrace přístroje velmi složitá. Podstatou tohoto kvalitativního měření je vadu pouze identifikovat, nikoliv lokalizovat. S ohledem na tuto skutečnost byla provedena kalibrace a její ověření pouze podle podstaty vztahu vzdálenosti osy rádiusu od X bodu výstupu ze sondy k X bodu výstupu a odrazu na úhlové měrce (viz schéma ).

Schéma vztahu časové základny



Zdroj: Vlastní zpracování

Rozsah časové základny na rádiusu R25 mm je  $s_B=100$  mm. Podle normalizovaných postupů byla kalibrace prováděna pro příčné vlny podle rozdílu doby průchodu od prvního koncového echa k druhému koncovému echu. Sonda byla tahem přesunuta na pozici osy rádiusu R25 a výška echa byla upravena přes hodnotu 100 % rastru. Po této úpravě echa byla sonda uvedena do mírného dopředného a zpětného pohybu



v minimální vzdálenosti od rádiusu R25. Důvodem tohoto pohybu bylo získat na měřicí ploše rastru defektoskopického přístroje více tvarových ech, a následně kalibrovat taková echa, která odpovídají pro odraz od rádiusu R25 a dráze ultrazvuku v měřce 25 mm. Tyto echa byla zesílena na hodnotu 80 % rastru. Následně byla provedena manuální úprava pozici impulsů a byly aktivovány dvě kontrolní brány (*viz schéma*). Pro kalibraci věch úhlových sond platí, že musí být v takové vzdálenosti od protilehlého rozhraní, kde je první koncové echo maximální.

Echogram kalibrace pro úhlové sondy



*Poznámka: metoda kalibrace na základě lokalizace vady v jednom svazku. Pozice prvního kontrolního echa je nositelem správné rychlosti.*

Zdroj: Vlastní zpracování

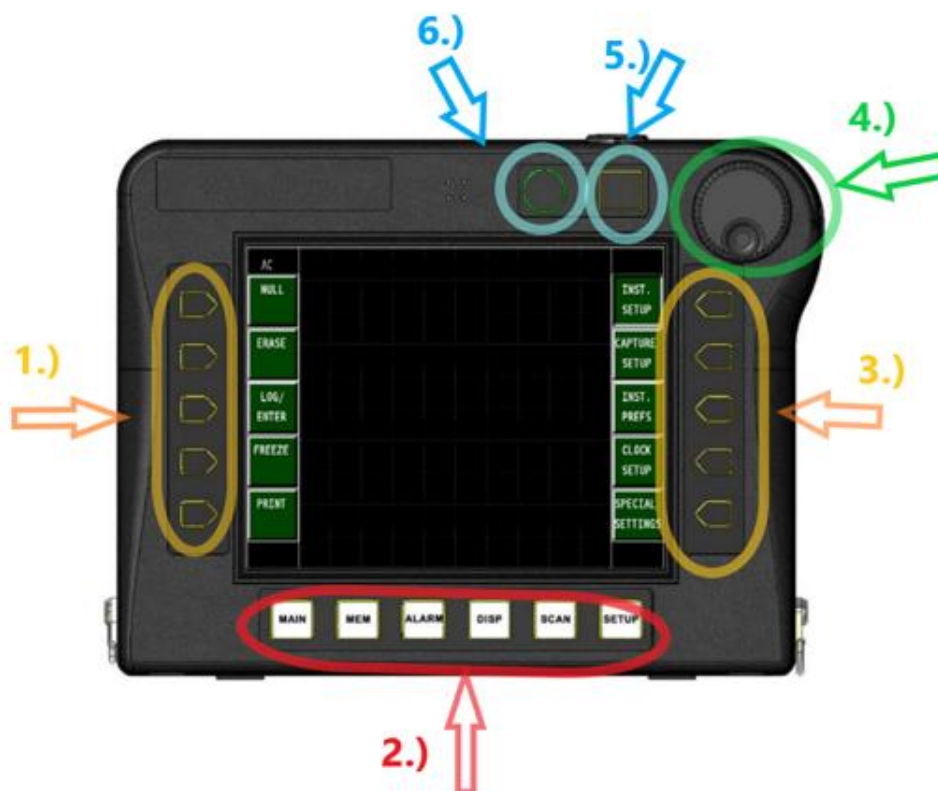
## Příloha 17 – Obecný popis, ovládací prvky a architektura defektoskopického přístroje Nortec 500D



Tento defektoskopický přístroj vířivých proudů (*viz obrázek* ), byl zapůjčen pro potřeby výzkumného měření vojenským dopravním letišťem Praha – Kbely.

Olympus Nortec 500D





- 1) Funkční klávesy pro změnu parametrů přístroje
- 2) Speciální klávesy pro okamžitou aktivaci provozní nabídky přístroje – například tlačítko MEM pro vyvolání uložených funkcí a předdefinovaných parametrů
- 3) Funkční klávesy pro přepínání mezi provozními úrovněmi

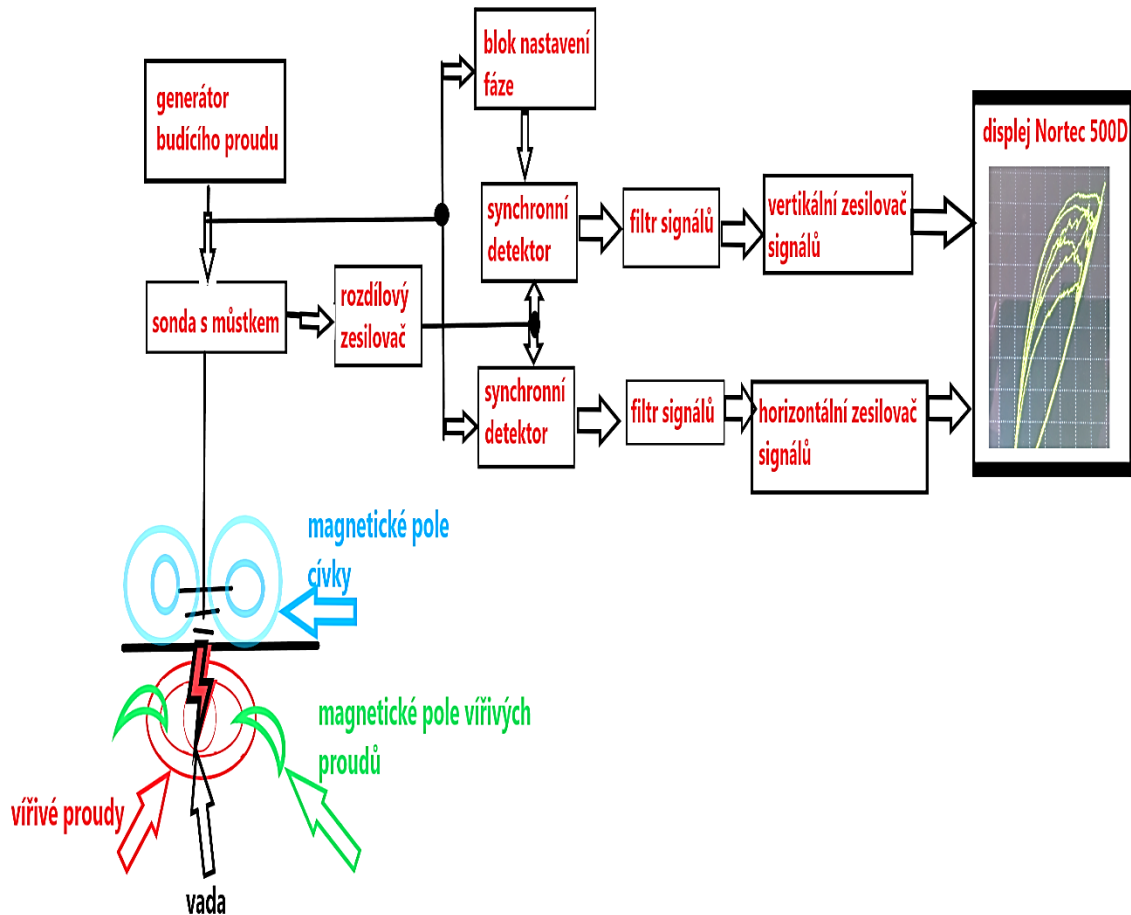


- 4) *Ovládací prvek SmartKnob – slouží k regulaci funkcí*
- 5) *Tlačítko Lock Out Button – deaktivuje veškeré automatické funkce defektoskopu, které pomáhají při kalibraci a měření*
- 6) *Tlačítko napájení*

Zdroj: Vlastní zpracování

Architektura (viz schéma ) tohoto moderního defektoskopického přístroje vířivých proudů, obsahuje mnoho pomocných funkcí a systémů, které usnadňují provádění defektoskopie. Nortec 500D, jako jediný z řady defektoskopů Nortec 500 umožňuje funkci duální frekvence. Tato funkce umožňuje nastavit na defektoskopickém přístroji dvě zcela rozdílné hodnoty frekvence vysílacího signálu a tím pokrýt větší objem defektoskopicky zkoumaného materiálu. Toto multiplexování je umožněno nastavením rozdílných hodnot amplitud a fází vysílaných signálů. V tomto přístroji je již automaticky nastavena funkce lift – off, což je funkce filtrů rušivých vlivů, které působí na hodnotu vysílacího signálu. Uživatelsky nejpřívětivější funkcí je PowerLink, tato funkce zajišťuje po připojení jakékoliv sondy její rozpoznání, za předpokladu že tuto funkci daná sonda podporuje. Funkce PowerLink umožňuje kompletní kalibraci přístroje, anulování sondy a okamžitou možnost provádět defektoskopii na zvoleném materiálu. Přístroj je opatřen digitálními filtry a rozdílovými zesilovači, které zajišťují maximální přesnost měření s minimálním ovlivněním naměřeného výsledku.

Architektura defektoskopického přístroje Nortec 500D

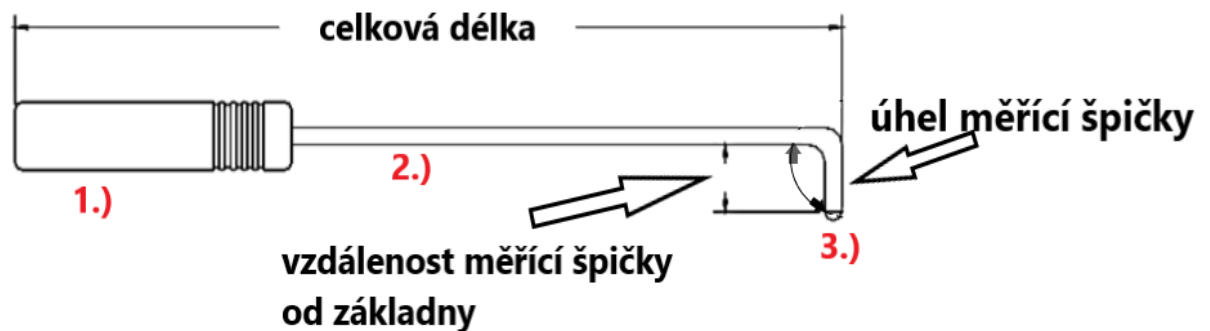


Zdroj: Vlastní zpracování

## Příloha 18 - Obrázky, schématické uspořádání a obecné parametry vřívoproudých sond

Veškeré sondy, které byly použity při kvalitativní defektoskopii vřívých proudů byly sondy tužkové (viz schéma).

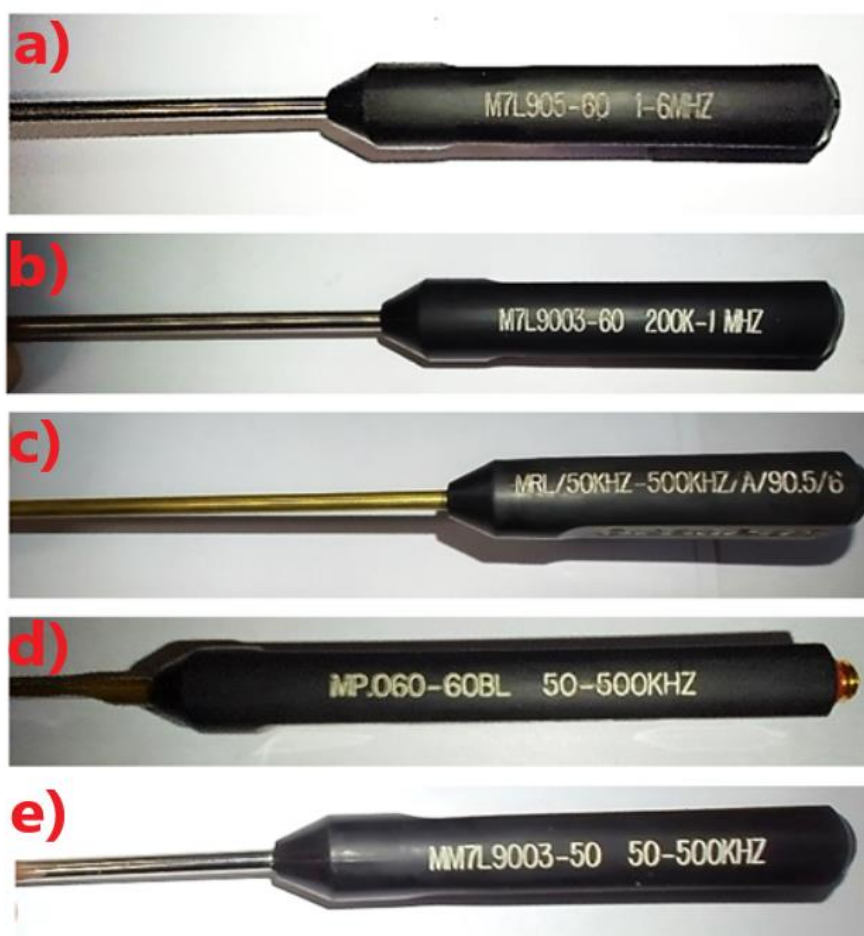
Jednotné schéma





- 1.) *Rukojeť sondy*
- 2.) *Odnímatelná kovová hřídel*
- 3.) *Měřící hrot sondy*

Tyto sondy od výrobce Nortec®, podporují funkci PowerLink se společným využitím defektoskopického přístroje Olympus Nortec 500D. Funkce PowerLink umožňuje po připojení jakékoliv z použitých sond k defektoskopickému přístroji, provést kompletní automatickou kalibraci defektoskopického přístroje na základě naprogramovaného ID čipu v sondě. Jako jednotný datový kabel byl použit 16pinový LEMO kabel s BNC konektorem. Specifickým využitím těchto sond je schopnost měření vodivosti, tloušťky povlaků, detekce povrchových či lehce podpovrchových trhlin. Referenční cívka použitých sond je cívka vnitřní obvodově vinutá.





- a) sonda vířivých proudů M7L905-60
- b) sonda vířivých proudů M7L9003-60
- c) sonda vířivých proudů MRL/A/90.5 /6
- d) sonda vířivých proudů MP.060-60BL
- e) sonda vířivých proudů MM7L9003-50

## **Příloha 19 – Obecný postup kalibrace vířivoproudého defektoskopického přístroje pro potřeby kvalitativního měření na etalonovém listu**

Po zapnutí defektoskopického přístroje Nortec 500D a připojení sondy *MP.060-60BL* se na displeji přístroje zobrazilo hlášení o aktivaci funkce PowerLink, která byla obsluhou potvrzena. Následně byla obsluhou subjektivně upravena hodnota napájení sondy ze standardní hodnoty špičkového napětí 6V na nejvyšší možnou hodnotu napájení 12V. Takováto úprava napájení sondy ze standardní úrovně na vysokou úroveň, se provádí z důvodu nedostatečného zisku vadového echa na displeji, při testování velmi drobných defektů, při špatné vodivosti materiálu, při intenzivním šumu a při požadavku na vyšší hloubku průniku vířivých proudů.

Po zvýšení hodnoty napájení sond byla aktivována funkce Preamb. Tato funkce slouží jako předzesilovač vysílaných vířivých proudů, který ještě umožní z pěti násobit hodnotu vysílaného signálu sondy vířivých proudů, ale jen s podmínkou maximálního možného rozdílu zisku do 14 dB. Poté byla aktivována funkce Úhel synchronizace. Tato funkce upravuje zobrazení vadového echa s ohledem na polohu sondy, kterou drží obsluha defektoskopického přístroje. Tato funkce je vhodná kvůli představě defektoskopického pracovníka o poloze a rozměru vady. Dále tato funkce umožňuje při detekci vady, u které jsou snímány pouze hrany a na displeji je vada vidět pouze v okrajích rastru, tak provede samovolně synchronizaci úhlu o 180° a zvýrazní tak vadu přímo uprostřed displeje.



Z důvodu minimalizování chybných výsledků měření, které by mohli být způsobeny obsluhou přístroje v momentě zápichu sondy na povrchu testovaného materiálu, kdy dojde k vytvoření vadového šumu signálu, byla aktivována funkce Continuous Null. Tato funkce aktivuje výkonné nízkofrekvenční a vysokofrekvenční filtry, které umožňují vynulovat požadovaný bod sondy. V tomto případě to byl bod zápichu sondy, kdy došlo vlivem obsluhy k pokrívování zobrazovaného signálu.

Poté byla navolena na defektoskopickém přístroji přednastavená hodnota měrné elektrické vodivosti pro hliníkovou slitinu 2024-T8XX. Tato hliníková slitina se využívá na konstrukčních částech vojenských letadel. Funkce PowerLink poté provedla aktualizaci samotestu nastavení sondy. Výrobce doporučena hodnota frekvence 200 kHz byla snížena na hodnotu 190 kHz, s výjimkou sondy M7L905-60. U sondy M7L905-60 byla nastavena frekvence na hodnotu 1 MHz, z důvodu jejího frekvenčního rozsahu. Fázový úhel byl podle výrobce nastaven na hodnotu 78°. Horizontální zisk byl nastaven na hodnotu 65 dB a vertikální zisk na 72 dB. Následně bylo provedeno ověření kalibrace defektoskopického přístroje na trhlinovém etalonu. Výsledek kalibračního měření byl velmi uspokojivý, a to i přes silné působení rušivých vlivů v daném momentě. Z důvodu tohoto šumu byla na defektoskopickém přístroji aktivována ještě funkce Waterfall. Tato funkce vodopádu signálů umožňuje skládat jednotlivé po sobě jdoucí měřící cykly a zobrazit tak celý proces jednotlivých výsledků měření. Po aktivování funkce na požadavek zobrazení výsledků si jsou vůči sobě echa mírně posunuty s odchylkou ve vertikální a horizontální rovině. Funkce Waterfall nijak neovlivňuje samotný výsledek průběžného měření, protože tato hodnota průměrné odchylky jednotlivých měřících cyklů není aktuálně vidět a slouží pouze pro vizuální zhodnocení ztrátivosti signálu v průběhu měření.

## **Příloha 20 – Zdrojová data defektoskopického měření**

Zdrojová data ultrazvukové defektoskopie a doplňkového měření rušivých vlivů



Pokus č.:	Ultrazvuk: Intezity zpětného signálu - výška rastru (%):					Teplota (°C):	Hluková expozice (dB):
	MSEB 4	MWB 70-4	MWB 60-4	MWB 45-4	MSW		
1	80	70	60	70	80	19,1	81,5
2	80	70	60	80	70	19,2	82,7
3	70	60	80	70	50	19,6	81,9
4	80	80	50	60	60	19,9	81,5
5	70	60	70	60	60	20,2	83,1
6	60	70	80	70	80	20,5	82,7
7	80	50	60	80	50	20,9	83,0
8	70	60	60	60	50	21,0	84,0
9	60	60	70	60	80	21,1	83,5
10	70	50	50	80	70	21,4	88,4
11	80	50	80	60	70	21,4	81,9
12	70	70	70	60	60	21,6	83,2
13	60	70	60	50	70	22,5	84,1
14	70	60	60	70	80	23,0	82,6
15	50	60	60	70	70	23,3	83,1
16	60	50	50	50	60	23,6	86,1
17	50	50	60	50	50	23,7	84,3
18	60	60	60	40	60	23,9	92,6
19	80	70	70	50	60	24,2	83,1
20	70	40	40	60	50	24,6	94,1
21	30	30	20	30	30	25,0	122,7
22	50	20	30	40	20	25,2	121,8
23	50	20	20	40	40	25,3	124,7
24	50	20	20	20	20	25,9	124,6
25	60	30	60	70	60	26,2	88,3
26	80	70	70	70	80	26,4	85,1
27	70	70	60	80	80	26,5	83,1
28	70	70	50	70	60	26,5	84,1
29	80	80	60	60	50	26,8	85,5
30	80	60	70	80	80	26,6	82,7
31	60	40	60	60	40	26,7	94,6
32	60	40	50	40	40	26,7	97,1
33	50	30	50	40	40	26,9	99,5
34	30	40	60	50	60	26,4	98,6
35	50	40	30	30	60	26,1	113,5
36	30	20	20	30	20	26,0	123,7
37	40	30	20	20	20	25,5	121,8
38	40	20	20	40	40	25,2	120,8
39	30	30	40	40	30	24,9	121,9
40	40	40	30	20	20	24,3	123,5
41	50	60	40	50	40	24,6	118,4
42	60	60	50	50	50	24,3	117,7
43	70	70	60	70	60	22,4	94,1
44	80	80	70	60	70	21,5	88,3
45	80	70	70	70	80	20,6	83,1
46	80	60	80	60	80	19,3	81,7
47	70	80	80	60	70	19,2	84,2
48	70	50	70	70	60	19,5	85,1
49	60	60	50	80	70	19,3	81,1
50	80	80	70	60	80	19,1	81,3

Zdroj: Vlastní zpracování

Zdrojová data defektoskopie vířivých proudů a doplňkového měření rušivých vlivů





Pokus č.:	Vířivé proudy: Intezity zpětného signálu - výška rastru (%):					Teplota (°C):	Hluková expozice (dB):
	MP.060- 60BL	MRL/A /90.5 /6	M7L9003- 60	MM7L9003- 50	M7L905-60		
1	60	80	60	70	80	28,2	81,5
2	70	80	70	70	70	28,4	82,7
3	70	70	50	60	80	28,5	81,9
4	50	50	60	80	70	28,8	95,4
5	70	60	60	40	70	29,1	95,2
6	60	60	20	20	80	29,2	98,2
7	70	50	50	50	60	29,3	85,7
8	80	50	50	60	50	29,6	81,5
9	70	30	40	70	80	29,8	93,7
10	70	40	40	60	70	30,2	93,4
11	60	70	60	50	80	30,2	92,9
12	70	70	50	50	80	30,3	96,3
13	60	50	20	60	70	30,7	97,1
14	50	40	20	10	80	30,9	115,4
15	60	40	40	30	70	31,0	124,9
16	60	50	30	20	70	31,1	118,9
17	50	40	20	20	50	31,4	116,0
18	80	40	30	20	60	31,5	110,8
19	40	50	30	40	60	31,7	122,4
20	70	30	20	20	50	31,9	119,3
21	50	50	30	20	70	31,9	121,4
22	50	40	40	30	60	32,0	115,6
23	60	60	30	40	70	32,4	117,9
24	50	50	30	60	70	32,7	111,2
25	60	70	40	50	70	33,0	112,5
26	80	60	20	60	80	33,2	121,1
27	60	70	40	40	70	33,3	98,5
28	50	50	50	40	70	33,6	95,3
29	50	60	60	20	70	33,8	83,3
30	70	60	50	40	70	34,0	81,7
31	60	50	50	50	80	33,9	82,1
32	60	20	60	30	70	34,1	81,2
33	40	40	40	20	70	33,7	83,4
34	70	70	30	50	60	33,6	84,4
35	60	50	30	60	70	33,5	85,8
36	70	60	40	60	60	33,5	97,4
37	60	30	50	60	70	33,3	101,8
38	70	80	30	40	80	33,1	101,6
39	70	50	40	50	70	32,8	114,0
40	60	30	40	60	80	32,7	113,4
41	70	60	60	20	60	32,4	113,2
42	50	20	30	50	60	32,0	111,7
43	70	60	30	40	40	31,7	110,8
44	20	70	40	50	70	31,4	117,1
45	50	30	70	50	70	31,3	116,3
46	60	60	40	50	80	31,1	109,8
47	70	80	60	40	80	29,8	96,3
48	70	30	40	60	70	29,5	93,4
49	80	40	70	50	80	29,3	88,6
50	70	70	70	70	80	28,9	84,1

Zdroj: Vlastní zpracování



## Příloha 3 – Vrtulový disk AV – 72 RU

Armáda Československé republiky zakoupila 3. března roku 1967 dva kusy letadel Antonov An – 24 V, které sloužili především jako vládní a dopravní letadla. Následně v roce 1971 zakoupila další čtyři kusy letadla s označením An – 26 s instalovanou zadní nákladovou rampou pro vojenské účely. Zakoupené typy letadel Antonov, byly osazeny Cestovní rychlost letadla Antonov je přibližně 450 km/ h s možným doletem od 650 km do 1 000 km. Poslední dochovaný kus letadla Antonov, provedl dne 8. 12. 2005 na dopravním letišti Praha – Kbely poslední slavnostní vzlet, provozní doba tohoto konkrétního letadla činila 10 712 letových hodin.

<https://www.vhu.cz/exhibit/antonov-an-24-v-vyr-c-07109/>



a) Antonov An – 24 V

b) Antonov An – 26

Zdroj: <https://www.aeroweb.cz/clanky/2840-v-prazskych-kbelich-dnes-naposledy-vzletl-antonov-an-26-acr>

+ <https://www.vhu.cz/exhibit/antonov-an-24-v-vyr-c-07109/>

Z důvodu efektivního využití jmenovitých otáček, které generuje letecký motor, musí být vrtulový list po celé své délce vhodně profilován. Důvodem profilového zkroucení



listů je rozdílná hodnota úhlové rychlosti v jednotlivých segmentech listu. Hodnota úhlové rychlosti vzhledem ke středu osy rotace ovlivňuje hodnotu Reynoldsova čísla proudícího vzduchu obtékajícího vrtulový list. Z tohoto důvodu je vrtulový list po celé své délce v příčných řezech různě profilován tak, aby špička vrtulového listu nedosahovala hodnot nadzvukové rychlosti a nevznikala tak úplavová oblast vírového proudění vlivem překročení kritického úhlu náběhu, což by mělo za následek ztrátu vztlaku. Z hlediska materiálové podstaty je letecká vrtule silně namáhána momentem hnací hřídele, odporovými silovými složkami prostředí a odlétávajícími abrazivními částicemi při přistání. Z důvodu silného namáhání jsou jednotlivé vrtulové listy pravidelně defektoskopicky kontrolovány.