

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ  
ELEKTRONIKY**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Nedestruktivní testování parogenerátorů s využitím  
vířivých proudů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš ROLNÍK**  
Osobní číslo: **E14B0088K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Nedestruktivní testování parogenerátoru s využitím vířivých proudů**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zpracujte krátkou rešerši používaných technik nedestruktivního testování.
2. Popište strukturu parogenerátoru a úlohu nedestruktivního testování pomocí vířivých proudů při jeho údržbě.
3. Navrhněte a proveďte experimentální ověření metody nedestruktivního testování s využitím vířivých proudů.
4. Zhodnoťte závěry experimentálního měření.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická


Seznam odborné literatury:

**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

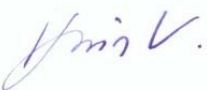
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Karel Slobodník**  
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku nedestruktivního testování parogenerátorů pomocí vířivých proudů. V první části této bakalářské práce je uveden popis nejpoužívanějších metod nedestruktivního zkoušení. Dále je zde popsán princip a konstrukce parogenerátoru včetně komponent zkoušených pomocí vířivých proudů. Na závěr je provedeno experimentální měření, ve kterém si dokážeme spolehlivost výše uvedené metody.

## **Klíčová slova**

NDT, vířivé proudy, sonda, parogenerátor, jaderná elektrárna

## **Abstract**

This bachelor thesis focuses on the issue of non-destructive testing of steam generators by means of eddy currents. The first part of this bachelor thesis describes the most used non-destructive testing methods. Further, there is described the principle and construction of a steam generator, including components tested using eddy currents. In conclusion, experimental measurements are carried out, in which we prove the reliability of the above-mentioned method.

## **Key words**

NDT, eddy currents, probe, steam generator, nuclear power plant

## **Prohlášení**

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 5.6.2017

Tomáš Rolník

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlu Slobodníkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval svému odbornému konzultantovi Michalu Fikrlemu za jeho spolupráci a vedení při experimentálním měření.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>12</b>
<b>2 METODY NDT</b> .....	<b>13</b>
2.1 ZKOUŠENÍ VIZUÁLNÍ METODOU (VT) .....	13
2.1.1 Princip metody VT .....	13
2.1.2 Přímá vizuální metoda .....	14
2.1.3 Nepřímá vizuální metoda .....	14
2.2 ZKOUŠENÍ ULTRAZVUKEM (UT) .....	15
2.2.1 Princip metody .....	15
2.2.2 Použití metody .....	15
2.3 ZKOUŠENÍ KAPILÁRNÍ METODOU (PT) .....	16
2.3.1 Princip metody .....	16
2.3.2 Použití metody .....	16
2.4 ZKOUŠENÍ MAGNETICKOU METODOU PRÁŠKOVOU (MT) .....	16
2.4.1 Princip metody .....	16
2.4.2 Použití metody .....	17
2.5 ZKOUŠENÍ RADIOGRAFICKÉ (RT) .....	17
2.5.1 Princip metody .....	17
2.5.2 Použití metody .....	18
2.5.3 Počítačová a digitální radiografie .....	18
2.6 ZKOUŠENÍ VÍŘIVÝMI PROUDY (ET) .....	19
2.6.1 Princip metody .....	19
2.6.2 Použití metody .....	19
<b>3 PAROGENERÁTORY</b> .....	<b>20</b>
3.1 ROZDĚLENÍ PAROGENERÁTORŮ PRO JE .....	20
3.1.1 Parogenerátor typu tekutý kov – voda .....	20
3.1.2 Parogenerátor typu voda – voda .....	20



3.1.3	Parogenerátor typu plynné médium – voda .....	20
3.2	PRINCIP PAROGENERÁTORŮ PRO JE VVER .....	20
3.3	KONSTRUKCE PAROGENERÁTORŮ PRO JE VVER .....	21
3.3.1	Primární část .....	21
3.3.2	Sekundární část .....	22
3.3.3	Základní technické parametry .....	23
<b>4</b>	<b>ZKOUŠENÍ TEPLOSMĚNNÝCH TRUBEK ET .....</b>	<b>24</b>
4.1	DEGRADACE TEPLOSMĚNNÝCH TRUBEK .....	24
4.1.1	Korozní praskání pod napětím .....	25
4.1.2	Důlková koroze (pitting) .....	25
4.1.3	Poškození v důsledku vibrací trubkového svazku .....	25
4.1.4	Plošná koroze .....	25
4.1.5	Usazeniny na povrchu teplosměnných trubek .....	25
4.2	PARAMETRY TEPLOSMĚNNÝCH TRUBEK .....	26
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ TEPLOSMĚNNÝCH TRUBEK .....</b>	<b>27</b>
5.1	KALIBRACE .....	27
5.1.1	Kalibrační měrka .....	27
5.1.2	Přístroj vířivých proudů .....	28
5.1.3	Sonda vířivých proudů .....	28
5.1.4	Nastavení .....	29
5.2	MĚŘENÍ .....	33
5.2.1	Vzorek č.1 .....	33
5.2.2	Vzorek č.2 .....	36
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>45</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>46</b>

## **Seznam symbolů a zkratek**

$\eta$ .....	činitel zaplnění
Ds [mm] .....	průměr cívký
Di [mm] .....	průměr vzorku
$\delta$ [mm] .....	standardní hloubka vniku
$\sigma$ [MS/m] .....	konduktivita
$\mu_r$ [-] .....	relativní permeabilita
f [Hz] .....	frekvence
NDT .....	Nedestruktivní zkoušení
VT .....	Vizuální metoda
PT .....	Kapilární metoda
MT .....	Magnetická metoda
RT .....	Radiografická metoda
ET .....	Metoda vířivými proudy
PA .....	Phased array
TOFD .....	technika měření doby průchodu difrakčních vln
ETE .....	Jaderná elektrárna Temelín
EDU .....	Jaderná elektrárna Dukovany
FBR .....	Rychlý množivý reaktor
VVER .....	Tlakovodní reaktor (ruský typ)
PWR .....	Tlakovodní reaktor
TNR .....	Tlaková nádoba reaktoru

## Seznam obrázků

<i>OBRÁZEK 1: ZÁZNAM KALIBRAČNÍ MĚRKY (V HORNÍ POLOVINĚ JSOU DIFERENCIÁLNÍ KANÁLY A VE SPODNÍ POLOVINĚ KANÁLY ABSOLUTNÍ) .....</i>	<i>27</i>
<i>OBRÁZEK 2: PŘÍSTROJ MS 5800 OD FIRMY ZETEC <sup>[8]</sup> .....</i>	<i>28</i>
<i>OBRÁZEK 3: SONDA VÍŘIVÝCH PROUDŮ „BOBBIN“ .....</i>	<i>28</i>
<i>OBRÁZEK 4: KALIBRACE DIFERENCIÁLNÍCH KANÁLŮ .....</i>	<i>30</i>
<i>OBRÁZEK 5: KALIBRACE ABSOLUTNÍCH KANÁLŮ .....</i>	<i>30</i>
<i>OBRÁZEK 6: FÁZOVÁ VYHODNOCOVACÍ KŘIVKA PRO DIFERENCIÁLNÍ KANÁL 400 KHZ .....</i>	<i>31</i>
<i>OBRÁZEK 7: FÁZOVÁ VYHODNOCOVACÍ KŘIVKA PRO DIFERENCIÁLNÍ KANÁL 200 KHZ .....</i>	<i>31</i>
<i>OBRÁZEK 8: FÁZOVÁ VYHODNOCOVACÍ KŘIVKA PRO DIFERENCIÁLNÍ KANÁL 100 KHZ .....</i>	<i>32</i>
<i>OBRÁZEK 9: FÁZOVÁ VYHODNOCOVACÍ KŘIVKA PRO DIFERENCIÁLNÍ KANÁL 25 KHZ .....</i>	<i>32</i>
<i>OBRÁZEK 10: FÁZOVÁ VYHODNOCOVACÍ KŘIVKA PRO MIXOVANÝ KANÁL M1(200-25KHZ) .....</i>	<i>32</i>
<i>OBRÁZEK 11: ZÁZNAM VZORKU Č. 1 .....</i>	<i>33</i>
<i>OBRÁZEK 12: POPIS ROZLOŽENÍ PLOCHY .....</i>	<i>34</i>
<i>OBRÁZEK 13: SIGNÁL OHYBU TEPLOSMĚNNÉ TRUBKY .....</i>	<i>36</i>
<i>OBRÁZEK 14: ZÁZNAM INDIKACE „PITTING“ 25% ID .....</i>	<i>37</i>
<i>OBRÁZEK 15: ZÁZNAM INDIKACE „PITTING“ 30% ID .....</i>	<i>37</i>
<i>OBRÁZEK 16: ZÁZNAM INDIKACE „PITTING“ 50% ID .....</i>	<i>38</i>
<i>OBRÁZEK 17: ZÁZNAM INDIKACE „PITTING“ 75% ID .....</i>	<i>38</i>
<i>OBRÁZEK 18: ZÁZNAM INDIKACE „WEAR 25%“ .....</i>	<i>39</i>
<i>OBRÁZEK 19: ZÁZNAM INDIKACE „WEAR 50%“ .....</i>	<i>39</i>
<i>OBRÁZEK 20: ZÁZNAM INDIKACE „WEAR 75%“ .....</i>	<i>40</i>
<i>OBRÁZEK 21: ZÁZNAM INDIKACE „WEAR 25% POD IMITACÍ PODPĚRY“ .....</i>	<i>41</i>
<i>OBRÁZEK 22: ZÁZNAM INDIKACE „1 x 100%“ .....</i>	<i>42</i>
<i>OBRÁZEK 23: ZÁZNAM INDIKACE „4 x 20%“ .....</i>	<i>42</i>
<i>OBRÁZEK 24: ZÁZNAM INDIKACE „4 x 60%“ .....</i>	<i>43</i>
<i>OBRÁZEK 25: ZÁZNAM INDIKACE „4 x 100%“ .....</i>	<i>43</i>
<i>OBRÁZEK 26: ZÁZNAM INDIKACE „4 x 20%“ POD SIMULOVANOU PODPĚRNOU DESKOU .....</i>	<i>44</i>

## **1 Úvod**

Nedestruktivní zkoušení (NDT) je nedílnou součástí našich životů. Prospěch, který nedestruktivní zkoušení přináší, spočívá v tom, že předchází neštěstím a katastrofám a tím zachraňuje mnoho lidských životů a zabraňuje nespočetným zraněním. Chrání nejrůznější díla lidí a prodlužuje jejich životnost na dobu několika generací. NDT dává možnost bezpečného cestování, práci v zajímavém odvětví průmyslu a důvěru v bezpečné životní prostředí. Bez NDT kontroly by nebyla zajištěna bezporuchovost, spolehlivost a bezpečnost v letectví, v jaderné energetice, v chemickém průmyslu, ale i např. u mostů a přehrad. V jaderné energetice je NDT zkoušení nedílnou součástí provozních prohlídek pro zjištění zbývající životnosti komponentů a ujistění se, že nedochází k neočekávanému zhoršení kvality komponentů s nepříznivými následky. V tomto ohledu je parogenerátor v jaderné energetice podrobován přísným NDT kontrolám a princip těchto kontrol bude v této bakalářské práci nastíněn.

## **2 Metody NDT**

Mezi nejčastěji používané metody nedestruktivního zkoušení patří:

- Zkoušení vizuální (VT)
- Zkoušení kapilární (PT)
- Zkoušení magnetickou metodou práškovou (MT)
- Zkoušení radiografické (RT)
- Zkoušení ultrazvukem (UT)
- Zkoušení vířivými proudy (ET)
- Zkoušení infračervenou termografií (TT)
- Zkoušení akustickou emisí (AT)
- Zkoušení těsností (LT)

### **2.1 Zkoušení vizuální metodou (VT)**

#### **2.1.1 Princip metody VT**

Vizuální kontrola je velmi účinná metoda ke zjišťování zjevných vad na povrchu kontrolovaných částí (případně i jejich vnitřních vad, pokud se na prohlíženém povrchu zjevně projevují).

Základní podmínkou jsou znalosti pracovníka provádějícího kontrolu o typu a poloze vad, které mají být zjišťovány, kritéria hodnocení a jak lze parametry vady změřit. Kromě odborných znalostí jsou důležitou podmínkou zrakové schopnosti pracovníka. Protože jsou tyto schopnosti závislé jak na vnějších podmínkách (kvalita povrchu, směru a intenzitě osvětlení), tak na fyzickém a psychickém stavu pracovníka, je nutné zrakové schopnosti soustavně sledovat a ověřovat. V pravidelných intervalech je proto nutno sledovat především zrakovou ostrost a akomodační schopnost pracovníka.

Podle přístupnosti kontrolovaných míst dělíme pak vizuální metodu na přímou a nepřímou. [2]

### **2.1.2 Přímá vizuální metoda**

Přímou vizuální kontrolu lze aplikovat na všechny přístupné povrchy materiálů a výrobků za předpokladu dostatečného osvětlení (min 500 lux ve vhodném směru). Provádí se pouhým okem a k detailnější prohlídce vymezených oblastí lze použít případně lupy (se zvětšením cca 3-6x). [1]

### **2.1.3 Nepřímá vizuální metoda**

Umožňuje užitím speciálních zařízení především endoskopů vizuální zkoušení nepřístupných povrchů, jako například jsou vnitřní stěny uzavřených prostorů, vývrty, chemicky nebo radioaktivně zamořené prostory apod.

Endoskopy jsou pro tyto účely konstrukčně uzpůsobeny tak, že vyšetřovanou oblast umožňují jak osvětlit, tak prohlížet. Nejvýznamnější uplatnění našly endoskopy především v těchto případech:

- vyšetřování vad na vnitřním povrchu trubek a nátrubků o malých průměrech
- vyšetřování vad v osově oblasti u vrtaných turbinových a generátorových rotorů
- revize spalovacích prostorů motorů, kde vhodně konstruovaný endoskop lze zavést do vnitřního prostoru otvorem pro svíčku bez demontáže, revize mazacích kanálků, nalezení a vyjmutí uvolněných částí z motoru (např. spadlou podložku lze pomocí endoskopu, pinsety a magnetu vyjmout z motoru bez demontáže)
- revize strojírenských celků k zjišťování usazenin, koroze a jiných poškození uvnitř potrubí, kotlů, tlakových nádob a nádrží. [1]

Pro nepřímou vizuální metodu jsou vyráběny endoskopy od  $\varnothing$  3 mm až do průměru normálních dalekohledů v délkách několika cm až do cca 20 m. Současně vyráběné endoskopy jsou buď tuhé nebo ohebné podle toho, zda je k přenosu obrazu použito čoček nebo svazek skleněných vláken. [4]

U obou typů endoskopů lze použít pro účely dokumentace adapteru pro připojení fotografického aparátu, kamery nebo pro dálkový přenos televizní kamery. [1]

## **2.2 Zkoušení ultrazvukem (UT)**

### **2.2.1 Princip metody**

Princip ultrazvukové metody je odraz ultrazvukových vln na rozhraní necelistvostí nebo útlum ultrazvukového signálu ve zkoušeném materiálu. Nejpoužívanější metodou zkoušení materiálu ultrazvukem je odrazová impulzová technika. Do zkoušeného materiálu se vysílá krátký ultrazvukový impuls, který se odráží od všech rozhraní, tj. od vnitřních necelistvostí i od povrchu zkoušeného výrobku. V okamžiku vysílání ultrazvukového impulsu se objeví na displeji přístroje vysílací neboli počáteční impuls. Za dobu odpovídající dvojnásobné vzdálenosti se objeví na displeji přístroje vadové echo odražené od vady a koncové echo odražené od zadní stěny zkoušeného materiálu. Časový odstup mezi vysílacím a koncovým echem je úměrný tloušťce materiálu. Dále se můžeme kromě odrazové techniky setkat také s technikou zkoušení Phased array (PA) a technikou měření doby průchodu difrakčních vln (TOFD). [4]

### **2.2.2 Použití metody**

Ultrazvukovou metodou lze nejlépe zjistit vady, které jsou orientovány kolmo ke směru prozvučování jako jsou vady ve svarech vzniklé při výrobě i za provozu výrobku, vady v kovaných a válcových výrobcích, odlitcích apod. Zkoušení ultrazvukem lze aplikovat na ocel a jiné kovové materiály, plasty, gumu, beton apod. Běžně se používají tloušťkoměry a tvrdoměry. Zkoušení ultrazvukem se hodí pro výrobky větších rozměrů, u nichž jsou jiné metody technicky nevhodné, nebo je zkoušení z ekonomického hlediska nevýhodné. Hlavní předností u některých postupů ultrazvukové defektoskopie je kromě rychlosti zkoušení také možnost zkoušet i součásti zabudované, u kterých je přístupný pouze jeden povrch zkoušené části. Touto metodou také dokážeme hodnotit strukturu materiálu na základě útlumu ultrazvukových vln. V řadě případů lze ultrazvukové zkoušení automatizovat, tím docílíme rychlejší zkoušení, které se vyrovnají rychlým automatizovaným výrobním procesům. Podmínkou pro klasické techniky zkoušení ultrazvukem je dobrá akustická vazba mezi sondou a zkoušeným materiálem. [1]

## **2.3 Zkoušení kapilární metodou (PT)**

### **2.3.1 Princip metody**

Kapilární metoda je založena na využití charakteristických vlastností fázových rozhraní a jevů, označované jako kapilární jevy nebo kapilární vlastnosti kapalin. K nejdůležitějším vlastnostem těchto jevů při kapilární zkoušce patří povrchové napětí, krajový úhel, kapilární elevace, kapilární tlak a viskozita. Princip kapilárních metod spočívá ve využití vzlínivosti a sočivosti vhodných detekčních kapalin (penetrantů), jejich barevnosti nebo fluorescence. Těmito kapalinami se pokrývá zkoušený povrch tak, aby mohly vnikat do necelistvostí ústících na tento povrch. Po ukončení doby penetrace a odstranění přebytku penetrantu se na zkoušený povrch nanese vývojka. Penetrant, zbylý ve vadách, vzlíná z vad na povrch a za pomoci vývojky vytváří barevnou nebo fluoreskující indikaci vady. Indikace vad zobrazená ve vývojce se hodnotí vizuálně. [1]

### **2.3.2 Použití metody**

Kapilární metoda umožňuje zjištění povrchových necelistvostí materiálů. Tyto necelistvosti musí ústít na povrch výrobku, aby dovolily proniknout penetrantu dovnitř defektu. Kapilární metodou mohou být zjišťovány povrchové necelistvosti jak na kovových, tak nekovových materiálech (např. plasty, glazovaná keramika, sklo apod.) nelze jimi však zkoušet pórovitý materiál, nebo takový materiál, jehož povrch se penetračními prostředky narušuje. Při hodnocení se vyžaduje řádné osvětlení zkoušeného povrchu a dobré zrakové schopnosti pracovníka. Pro záznam indikací se obvykle používá fotografie nebo se někdy používají zvláštní vývojky, které zajišťují dlouhodobou fixaci obrazu vady. [1]

## **2.4 Zkoušení magnetickou metodou práškovou (MT)**

### **2.4.1 Princip metody**

Princip magnetické práškové metody je založen na detekci rozptylového magnetického toku. Pokud se nachází ve zmagnetovaném předmětu povrchová necelistvost kolmá k magnetickým siločárám budícího pole, magnetické siločáry vystoupí nad povrch výrobku a přemostí vadu. Jemné detekční piliny se pak v místě vady shromažďují a vyobrazí její průběh. Důvodem, že magnetický tok vystupuje nad vadu je to, že vzduch ve vadě má ve srovnání s okolním materiálem jen velice malou permeabilitu. Vzduch ve



vadě není schopen siločáry zkoncentrovat v takové míře, jako sousední feromagnetický materiál. Siločáry na zkoušené ploše nad trhlinou se zakříví do oblouku a mohou být rozptýlenými částicemi železa zviditelněny a pozorovány. Částičky železa se uspořádají podle siločar pole a vytvoří nad trhlinou magnetickou indikaci. Podle druhu použitého detekčního prostředku a způsobu hodnocení vzniklých indikací vad rozdělujeme postupy na barevné a fluorescenční, které mají vyšší citlivost. Zmagnetování zkoušeného předmětu lze provést pólovým nebo proudovým magnetováním (magnetické jho nebo elektrody). [2]

### **2.4.2 Použití metody**

Magnetická prášková metoda umožňuje zjištění povrchových nebo těsně pod povrchem ležících necelistvostí ve feromagnetických materiálech. Je vhodná především pro detekci necelistvostí charakteru trhlin, studených spojů, zdvojenin, přeložek materiálu apod. Nehodí se pro zjišťování vnitřních vad. Použití je omezeno pouze na feromagnetické materiály. Citlivost metody a tím zjištělnost vad je závislá především na kvalitě zkoušeného povrchu. Čím kvalitnější povrch tím vyšší je citlivost zkoušení. Citlivost je dále ovlivněna jakostí detekčních prostředků, velikostí zrn magnetického prášku, intenzitou magnetování, kontrastem indikace vady s jejím okolím a osvětlením. Vyhodnocení smí provádět jen zkušený pracovník s dobrým zrakem, který u fluorescenčního postupu musí být schopen dobré adaptace na černé světlo (UV záření). Trvalý záznam indikací se provádí otiskem na plastickou pásku, fotografováním, zavádí se rovněž hodnocení infračervenými kamerami. [2]

## **2.5 Zkoušení radiografické (RT)**

### **2.5.1 Princip metody**

Fyzikální princip spočívá na vzájemném působení ionizujícího záření s výrobkem a jeho zviditelněním vhodným detektorem. Intenzita ionizujícího záření, která prochází zkoušeným výrobkem, se mění a tímto způsobem zviditelníme místa zkoušeného výrobku, která obsahují nehomogenity (např. bubliny ve svarovém kovu, sraženiny v odlitcích aj.). Tato místa jsou znázorněna na filmu, který je umístěn za zkoušeným výrobkem, jako více exponovaná (jsou tmavší). K vyhodnocení používá defektoskopický pracovník negatoskop, který používá k prosvícení filmu a po zobrazení zkoušeného výrobku jej vyhodnotí. Ke zkoušení prozařováním se využívá rentgenového záření, záření gamma nebo případně

neutronové záření. Jako zářiče, zdroje rentgenového záření, se používají rentgenové lampy s různými výkony a rozměry ohniska. Platí zde, že čím je ohnisko menší tím je obraz lepší, a proto máme větší pravděpodobnost zachytit i nejmenší detaily zkoušeného výrobku. U této metody pracujeme s otevřenými zářiči a musíme brát zřetel na ochranu před ozářením. Ta spočívá v minimalizaci absorbované dávky u obsluhy i u ostatního personálu. [1]

### **2.5.2 Použití metody**

Metoda prozařování ionizujícím zářením patří k nejdéle používaným zkouškám nedestruktivního zkoušení. Touto metodou zjišťujeme zejména vnitřní necelistvosti objemového charakteru ve zkoušeném výrobku. Tuto metodu uplatňujeme u výrobků, kde nemůžeme použít zkoušení ultrazvukem, nebo tam kde potřebujeme na rentgenových snímcích zobrazit a zaprotokolovat rozsah vad v materiálech. Zeslabení záření se mění v důsledku strukturních, jak povrchových, tak vnitřních materiálových defektů (dutiny, trhliny, staženiny apod.), změn tloušťky materiálu korozi apod. Díky této metodě můžeme zjišťovat vady v klasické defektoskopii, ale můžeme jí také využít při diagnostice strojních součástí a zařízení. Umožňuje sledovat kinetiku různých dějů při výrobě odlitků nebo funkcí zařízení bez nutnosti demontáže. [1]

### **2.5.3 Počítačová a digitální radiografie**

V současné době je trend nahradit nákladný radiografický film a jeho chemické zpracování novým nefilmovým detektorem, který se dá použít opakovaně. V praxi se tento způsob realizuje dvěma způsoby. Jako první je náhrada filmu se používá plošný detektor (digitální radiografie), který je neohebný a umožňuje pouze určitou plochu. Z těchto důvodů je jejich aplikace omezená a pro určité použití dokonce i nevhodná. Druhý způsob je pomocí počítačové radiografie. U této techniky se jako detektor používá paměťová folie. Folie je pomocí speciální jednotky skenována a mazána pro následné znovu použití pro nový záznamový cyklus. Tato technika je vhodná pro široké spektrum aplikací. [1]

## **2.6 Zkoušení vířivými proudy (ET)**

### **2.6.1 Princip metody**

Metodou vířivých proudů jsme schopni sledovat parametry, které ovlivňují elektrickou vodivost zkoušeného výrobku (rozměry výrobku, strukturu, stav povrchu). Princip metody spočívá v tom, že na zkoušený výrobek působí střídavé magnetické pole, které indukuje do zkoušeného výrobku střídavé napětí. Zkoušený výrobek představuje uzavřený vodič, a proto v něm vznikají cirkulární proudy nazývané vířivé. Při jakékoliv změně parametrů zkoušeného výrobku se mění hustota vířivých proudů s elektrickou vodivostí. Vířivé proudy vytvářejí své vlastní magnetické pole, které má opačný směr než má pole budící, a tím budící pole zeslabují. Pokud pole budící a pole vířivých proudů vektorově sečteme, dostáváme výsledné pole. Amplituda a fáze tohoto výsledného pole nám udává informaci o stavu zkoušené části, na kterou budící pole působí. Při vyhodnocování sledujeme změnu napětí a fázi signálu, který se indukuje přímo do cívky, která budí magnetické pole nebo v druhé cívice měřící. Známe dva cívkové systémy pro měření metodou vířivých proudů. U první modifikace je cívka průchozí, u které zkoušený výrobek prochází dutinou cívky a u druhé se cívka přikládá přímo na povrch zkoušeného výrobku, kterou nazýváme cívkou příložnou. [1][4]

### **2.6.2 Použití metody**

Citlivost a použitelnost metody vířivých proudů závisí na druhu materiálu, geometrii zkoušeného výrobku, povrchu apod. Základním předpokladem je elektrická vodivost zkoušeného výrobku. Měření s cívkou příložnou nám umožňuje přesnou lokalizaci vady. Její použití najdeme při ručním zkoušení, ale i u mechanizovaného zkoušení. Výhodou zkoušení pomocí průchozí cívky je rychlost zkoušení a uplatnění najdeme u zkoušení dlouhých tyčí nebo trubek. Kombinaci průchozí cívky a rotujících příložných cívek se využívá při zkoušení v rourovkách a válcovnách. Cívka může být vedena na povrchu zkoušeného výrobku, případně těsně nad povrchem. [1]

### **3 Parogenerátory**

V současné době se v České republice provozují dvě jaderné elektrárny, a to Jaderná elektrárna Temelín a Jaderná elektrárna Dukovany. Jaderná elektrárna Temelín má dva výrobní bloky o celkovém výkonu  $2 \times 1\,055$  MW, kde na jednotlivou tlakovou nádobu reaktoru VVER 1 000 připadají čtyři parogenerátory typu PGV – 1 000 M. Jaderná elektrárna Dukovany má čtyři výrobní bloky o celkovém výkonu  $4 \times 510$  MW a ke každé tlakové nádobě reaktoru VVER 440 připadá šest parogenerátorů typu PG V – 215. [3][5]

#### **3.1 Rozdělení parogenerátorů pro JE**

Základní dělení parogenerátorů je podle použitého chladiva na primární straně parogenerátoru. Rozlišujeme následující typy parních generátorů. [5]

##### **3.1.1 Parogenerátor typu tekutý kov – voda**

Tento typ parního generátoru se používá zejména u elektráren s rychlými reaktory (FBR), použité tekuté kovy jsou nejčastěji eutektikum olovo-bismut, nebo sodík. [5]

##### **3.1.2 Parogenerátor typu voda – voda**

Využívá se u nejčastěji provozovaných reaktorů PWR (VVER). Využívají vertikální nebo horizontální parogenerátory. [5]

##### **3.1.3 Parogenerátor typu plynné médium – voda**

Tento typ byl využíván u reaktorů chlazených plynem (např. první československá jaderná elektrárna A1.), dnes se nejčastěji uvažuje o elektrárnách s reaktorem chlazeným heliem. [5]

#### **3.2 Princip parogenerátorů pro JE VVER**

Parogenerátory jsou tepelné výměníky, které slouží k přenosu tepelné energie z aktivní zóny reaktoru na lopatky parní turbíny. Tepelná energie získaná štěpením jaderného paliva v aktivní zóně reaktoru prostupuje do chladiva primárního okruhu, které proudí horkou větví cirkulační smyčky do trubkové teplosměnné plochy v parogenerátoru.

Ze sekundárního okruhu se přivádí do parogenerátoru napájecí voda, do které je stěnami teplosměnné plochy předáváno teplo z chladiva primárního okruhu a uvádí jí do varu. Pára, která vzniká v parogenerátoru odpařováním napájecí vody, se odvádí parovodem na lopatky parní turbíny. Parogenerátor je důležitým prvkem JE, protože odděluje primární radioaktivní okruh od okruhu sekundárního (neradioaktivní). [6][7]

### **3.3 Konstrukce parogenerátorů pro JE VVER**

Parogenerátor je jednotělesový horizontální rekuperační tepelný výměník tvořený tlakovou nádobou s teplosměnnou plochou tvořenou trubkami tvaru U, se zabudovaným paroseparačním zařízením, systémem pro rozvod napájecí a havarijní napájecí vody, s ponořeným děrovaným plechem, s potrubím odběru odluhu a parním kolektorem.

Parogenerátor se dělí na dvě základní části, a to na část primární a sekundární. [5]

#### **3.3.1 Primární část**

Primární část je tvořena z následujících částí:

- dva primární kolektory s víky,
- teplosměnná plocha,
- potrubím pro odvzdušnění primárních kolektorů,
- potrubím pro kontroly těsnosti vík primárních kolektorů.

Primární kolektory navazují na hlavní cirkulační potrubí (pokračování hlavního cirkulačního potrubí do parogenerátoru). Vstupní primární kolektor se nazývá „horký kolektor“, protože je připojen na horkou větev cirkulační smyčky a výstupní kolektor se nazývá „studený kolektor“ z důvodu připojení na studenou větev. Primární kolektory jsou vertikální válcové nádoby o délce cca 5 metrů. V každém primárním kolektoru je v dolní válcové části vyvrtáno 11 000 otvorů, do kterých jsou přivařeny teplosměnné trubky. Dolní část primárního kolektoru obsahuje také dva nátrubky pro odvod trvalého odkalu z parogenerátoru. Horní válcová část je provedena jako hrdlo s přírubou, ke které je pomocí svorníku připevněné primární víko. Celý vnitřní povrch, včetně vnitřní strany víka, je pokryt nerezovým návarem.

Teplosměnná plocha parogenerátoru je tvořena 11 000 teplosměnnými trubkami s distančními prvky, primárními kolektory s víky a potrubím odvodu. Teplosměnné jsou vyrobeny z nerezové oceli o  $\varnothing 16 \times 1,5$  mm, jsou ohnuté do tvaru U a jsou sestaveny do dvou trubkových svazků, ve kterých se teplosměnné trubky šachovnicově střídají. Konce ohnutých teplosměnných trubek jsou přivařeny svarem s vnitřním nerezovým návarem v otvorech primárních kolektorů. Trubky jsou vyspádované směrem k primárním kolektorům a v trubkovém svazku jsou připevněny v opěrných konstrukcích na vnitřní povrch parogenerátoru. [5]

### **3.3.2 Sekundární část**

Je tvořena pláštěm válcovou nádobou o průměru 4 metrů a délce cca 14 metrů s čely uzavřenými eliptickými dny. Plášť se skládá z následujících částí.

- dvou eliptických dnů
- dvou válcových vnitřních kroužků
- čtyř válcových krajních kroužků [5]

Na střední horní části pláště jsou přivařeny dva nátrubky DN 800 zakončené přírubou pro připojení eliptického sekundární víka, které umožňuje přístup k primárním víkům. Sekundární víka se připojují k přírubě nátrubků 24 svorníky, maticemi, dvojicemi podložek (konvexní a konkávní) a jsou utěsněna dvojicí kroužků. Pokud by docházelo k únikům sekundárního media, přes vnitřní kroužek, je zde zřízen systém kontroly těsnosti. Parogenerátor se na sekundární straně odvodu nátrubkem DN 20, který je umístěn na sekundárním víku. Ve střední horní části pláště parogenerátoru se také nachází DN 400, který slouží pro přívod napájecí vody. Tento nátrubek je chráněn válcovým pláštěm sloužícím jako ochrana proti tepelným rozdílům materiálu nátrubku při prudké změně teploty napájecí vody. [6]

Primární kolektory jsou přivařeny do dvou nátrubků DN 1200, které jsou ve střední dolní části pláště. Mezi nátrubkem DN 1200 a vnější stěnou primárního kolektoru vzniká tzv. kapsa, ze které se provádí trvalý odkal nátrubky DN 20. Dále se ve střední dolní části nachází nátrubek DN 100, který slouží pro vypouštění parogenerátoru. [7]

Pro vstup do sekundární části parogenerátoru slouží nátrubky DN 500, které jsou přivařeny na obě eliptické dna. Na dna se jsou navařeny nátrubky DN 80, který na horké straně slouží pro vyvedení odluhu a na studené straně pro přívod havarijní napájecí vody.

Pro odvod páry slouží deset nátrubků DN 350, které jsou spojeny s parním sběračem a parním kolektorem, který je napojen na parovod vedoucí páru k turbíně.

Na plášti a dnech jsou přivařeny nátrubky DN 10 a DN 20 sloužící pro připojení jednokomorových hladinoměřů, dvoukomorových hladinoměřů, k vyvedení odběrů pro cejchování hladinoměřů, k měření těsnosti všech šesti přírubových spojů, k odvzdušnění obou primárních kolektorů a jako rezerva.

Uvnitř parogenerátoru nad teplosměnnou plochou je na nosné konstrukci připevněn děrovaný nerezový plech k vyrovnání parního zatížení. Plech je tvořen segmenty o celkové ploše 44 m<sup>2</sup> a v něm je vyvrtáno 26 002 děr o Ø 13 mm s průtočnou plochou 3,451 m<sup>2</sup>. [5]

### **3.3.3 Základní technické parametry**

Výrobce	Vítkovice a.s.
Typ	PGV – 1000M
Tepelný výkon	750+53MW <sub>t</sub>
Množství chladiva primárního okruhu	21 200 m <sup>3</sup> /h
Množství vyrobené páry	1 470 + 103 t/h
Pracovní tlak na primární straně	15,59 ± 0,3 MPa
Pracovní tlak na sekundární straně	6,18 ± 0,2 MPa
Teplota napájecí vody	220 ± 5 °C, min. 164 ± 4 °C
Teplota chladiva primárního okruhu	
Vstup	320 ± 3,5 °C
Výstup	289,7 ± 2 °C
Teplota vyrobené páry	278,5 °C
Počet teplosměnných trubek	11 000 na ETE (5536 na EDU)
Střední délka teplosměnných trubek	11,1 m
teplosměnná plocha	6 112 m <sup>2</sup>
Hmotnost parogenerátoru	339 t [3][5]

## **4 Zkoušení teplosměnných trubek ET**

Na kontrolu teplosměnné plochy parogenerátoru jsou kladeny vysoké požadavky, protože teplosměnné trubky tvoří bariéru mezi radioaktivním primárním okruhem a sekundárním neradioaktivním okruhem. Jsou velmi důležitou a zároveň nejzranitelnější součástí primárního okruhu na jaderné elektrárně. Kontrolou teplosměnné plochy se zajišťuje nízká pravděpodobnost rychle se šířící porušení nebo náhlé roztržení trubky. K zajištění této skutečnosti podléhá teplosměnná plocha spolehlivým periodickým provozním kontrolám za účelem zjištění případných poruch. Pro kontrolu teplosměnných trubek se používá metoda vířivých proudů, která umožňuje určit úbytek materiálu teplosměnné trubky a trhliny na primárních kolektorech. [6][7]

### **4.1 Degradace teplosměnných trubek**

Provozní poškození teplosměnných trubek typu VVER vzniká několika formami. K hlavním degradačním mechanismům patří:

- Korozní praskání pod napětím
- Důlková koroze
- Poškození v důsledku vibrační trubkového svazku
- Plošná koroze
- Usazeniny na povrchu teplosměnných trubek

Korozní poškození teplosměnných trubek vzniká a šíří se z vnější strany a je ovlivňována kvalitou napájecí vody ze sekundárního okruhu obsahem alkálií, chloridů, mědi a ostatních příměsí. S tím přímo souvisí správná činnost systému odluhu a odkalu parogenerátoru, která odvádí část napájecí vody do čistící stanice, kde se snižuje koncentrace těchto příměsí na sekundární straně parogenerátoru. Dále je také korozní poškození ovlivněno vlastnostmi materiálu teplosměnných trubek např. mikrostruktura, obsah a charakter vměstků, mechanické pnutí vznikající při výrobě a namáháním vznikající při provozu. [7]



#### **4.1.1 Korozní praskání pod napětím**

Jde o nebezpečnou formu lokální koroze v důsledku agresivního prostředí a působením tahových napětí. Při tomto defektu vznikají v materiálu trhliny, které se šíří zvenčí kolmo na směr působení tahových napětí. U teplosměnných trubek se ve velké většině jedná o axiální směr. [7]

#### **4.1.2 Důlková koroze (pitting)**

Projevuje se vznikem menších nebo větších důlků na materiálu. Je nebezpečná pro všechny materiály v pasivním stavu, přičemž za napěťových podmínek zvyšují možnost vzniku korozního prasknutí. Charakteristické pro důlkovou korozi je velký objem degradovaného materiálu. [6]

#### **4.1.3 Poškození v důsledku vibrací trubkového svazku**

Tento stav může nastat mezi teplosměnnou trubkou a podpěrrou, pokud trubkový svazek vibruje a zároveň se stěna teplosměnné trubky dotýká podpěry. Třením by docházelo k porušování pasivní vrstvy povrchu trubky. V těchto místech je trubka náchylná ke koroznímu napadení a může dojít ke zmenšení tloušťky stěny. [6]

#### **4.1.4 Plošná koroze**

Plošná koroze se může vyskytovat i na parogenerátorech VVER, ale její výskyt je málo pravděpodobný z konstrukčních důvodů. Průběh plošné koroze je velmi pomalý a je podstatně méně nebezpečný než korozní praskání nebo důlková koroze. [6]

#### **4.1.5 Usazeniny na povrchu teplosměnných trubek**

Na venkovní povrch teplosměnných trubek se usazuje vrstva oxidů s různou tloušťkou. Nejčastější oxidy jsou na bázi železa a směsi oxidů Fe, Cr, Ni, Mn, Zn. Zdrojem těchto příměsí je napájecí voda. [6]

## 4.2 Parametry teplosměnných trubek

Parametry teplosměnných trubek v parogenerátoru se liší v závislosti na typu jaderné elektrárny. V níže uvedené tabulce 1 jsou uvedené rozdíly mezi Jadernou elektrárnou Temelín a Jadernou elektrárnou Dukovany. [6]

**Tabulka 1 – Srovnání teplosměnné plochy ETE a EDU [3][5]**

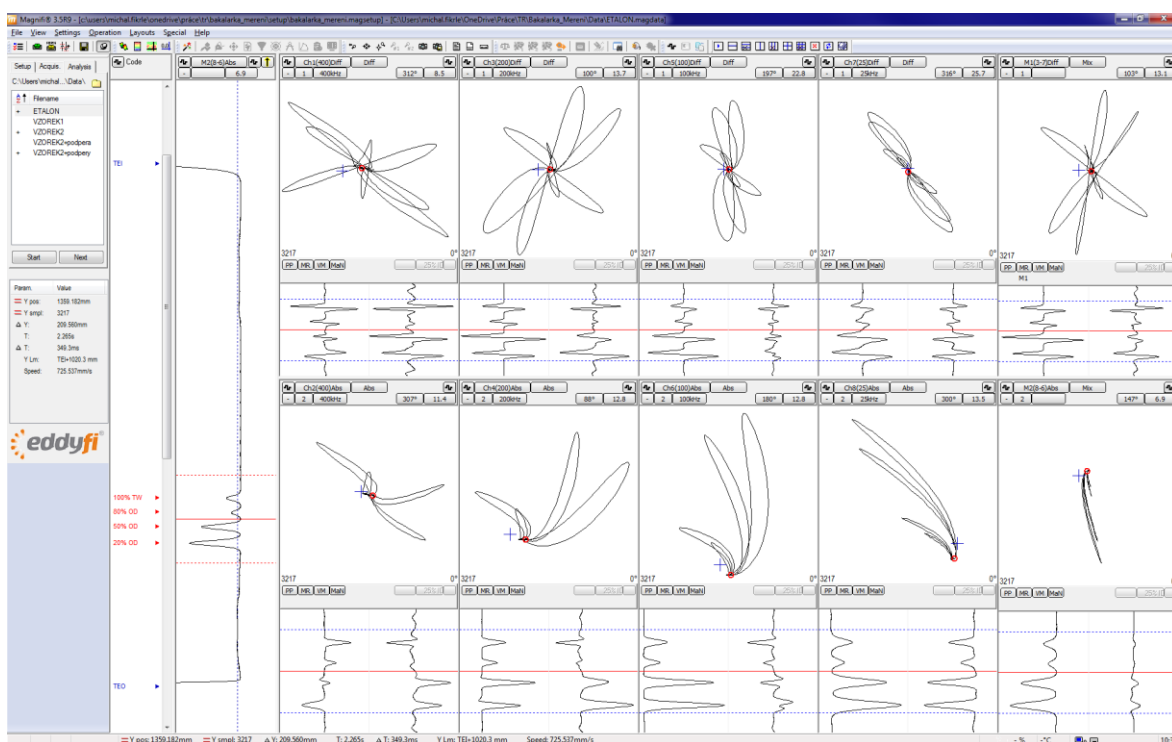
	<b>ETE</b>	<b>EDU</b>
<b>Počet teplosměnných trubek</b>	11000	5536
<b>Rozměry:</b>		
<b>Minimální celá délka</b>	9,7 m	7,8 m
<b>Maximální celá délka</b>	14,8 m	12 m
<b>Materiál trubek</b>	Austenitická ocel	Austenitická ocel
<b>Rozměry trubek:</b>		
<b>Vnější průměr</b>	16 mm	16 mm
<b>Jmenovitá tloušťka stěny</b>	1,5 mm	1,4 mm
<b>Poloměr ohybu trubek</b>	R = 60 mm	R = 65 mm, R = 100 mm
<b>Úhel rozevření ramen ohybů</b>	107 – 120°	107 – 120°

## 5 Experimentální měření teplosměnných trubek

### 5.1 Kalibrace

#### 5.1.1 Kalibrační měrka

Jako kalibrační měrku jsme použili etalon, který je totožných rozměrů a je zhotoven ze stejného materiálu jako teplosměnné trubky parogenerátorů reaktorů VVER 440, VVER 1000, tj. 08CH18N10T. Na měrce jsou po obvodu z vnější strany vytvořeny 3 vývrty procházející celou tloušťkou stěny, vývrty s plochým dnem s jmenovitou hloubkou 3 x 80% a 3 x 50% a zápich s jmenovitou hloubkou 20% tloušťky stěny. Umělé necelistvosti jsou na kalibrační měrce vyhotoveny po obvodu po 120° z důvodu kompenzace nedokonalého středění sondy vířivých proudů. Záznam kalibrační měrky je zobrazen na obrázku 1.



**Obrázek 1:** Záznam kalibrační měrky (v horní polovině jsou diferenciální kanály a ve spodní polovině kanály absolutní)

### 5.1.2 Příklad přístroje měření vířivých proudů

Pro experimentální měření byl použit přístroj MS 5800 od firmy Zetec. Jedná se o univerzální 16 kanálový defektoskopický přístroj vířivých proudů, frekvenční rozsah 1 kHz ÷ 6 MHz, filtrování signálu, rozsah nastavení fáze 0 ÷ 360°, zobrazení X-Y, X-t, Y-t, C-scanu na monitoru spolupracujícího počítače.



*Obrázek 2: Přístroj MS 5800 od firmy ZETEC [8]*

### 5.1.3 Sonda vířivých proudů

Pro účely experimentálního měření byly použity dvě sondy „bobbin“ typu BFD115PC.M (průměr sondy 11,5 mm) od výrobce INDETEC ndt. Jedna ze sond sloužila jako měřicí, druhá byla umístěna v referenční trubce ke kompenzaci absolutních kanálů (zapojení diferenciální s externí kompenzací).



*Obrázek 3: Sonda vířivých proudů „bobbin“*

Při experimentálním měření byl dodržen činitel plnění 78%, používaný i při kontrolách parogenerátorů. Činitel zaplnění vychází ze vzorce:

$$\eta = \frac{D_s^2}{D_i^2}$$

kde

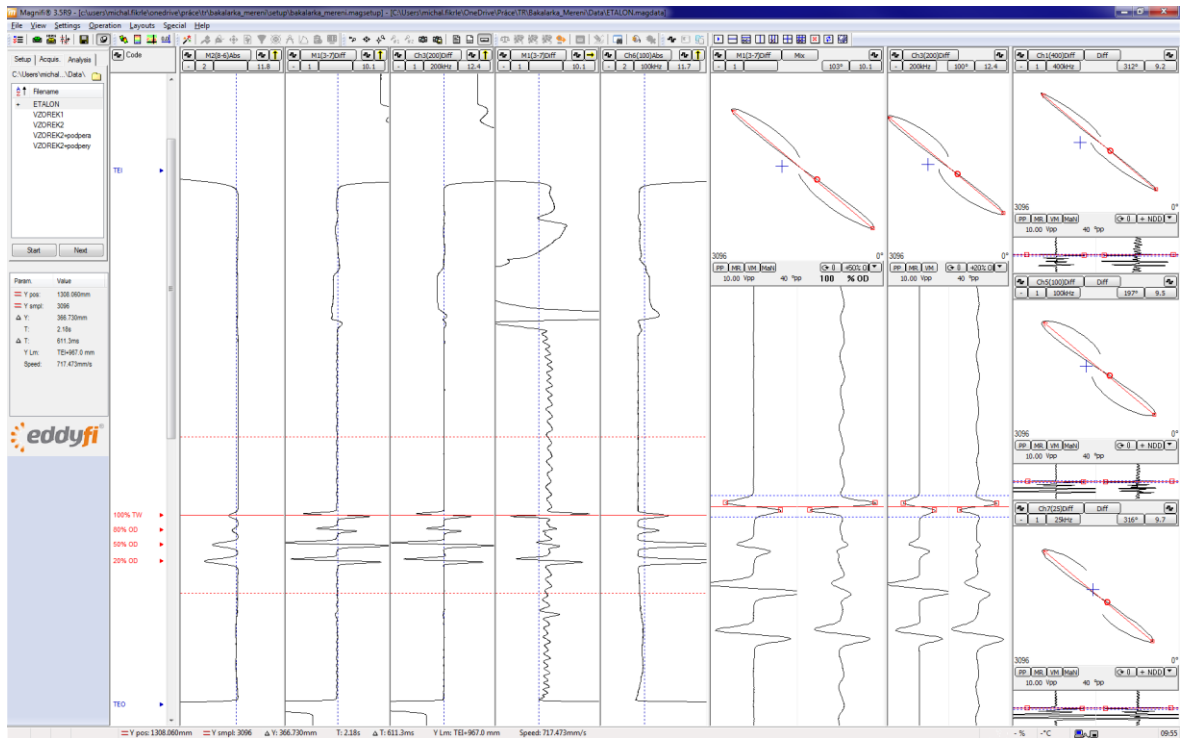
- $\eta$  činitel zaplnění [-]
- $D_s$  průměr cívky [mm]
- $D_i$  průměr vzorku [mm]

#### **5.1.4 Nastavení**

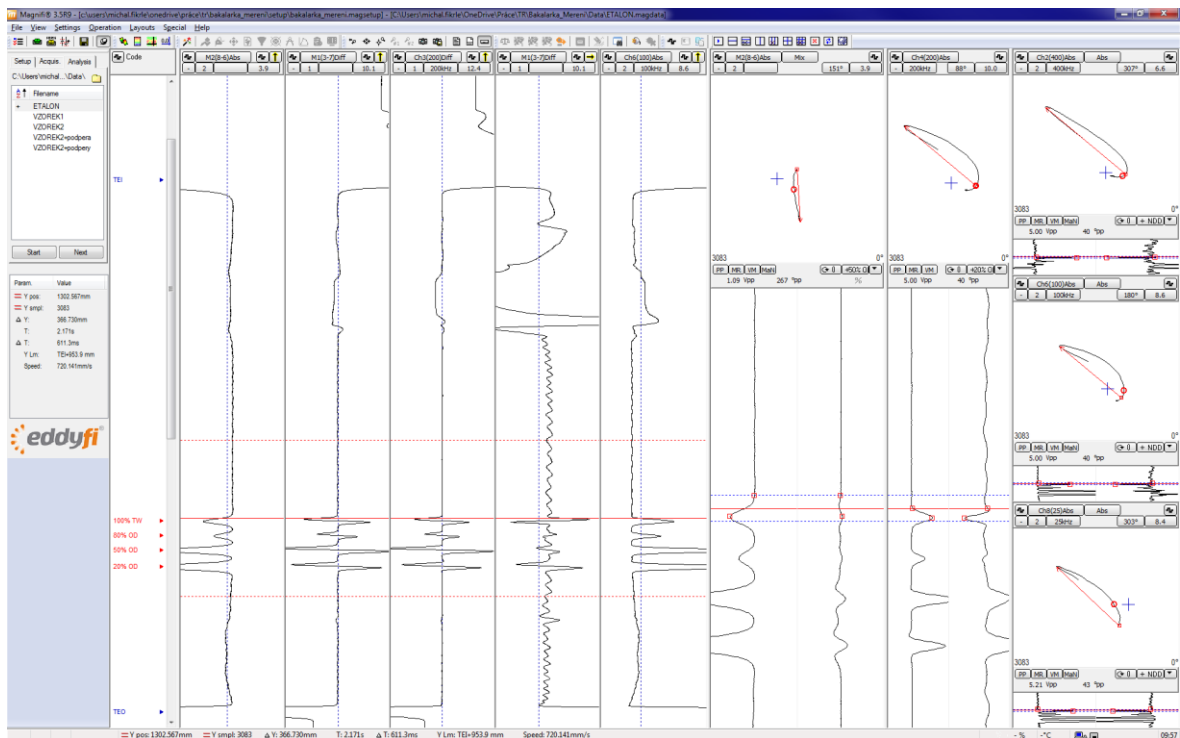
Experimentální měření bylo provedeno za pomoci 4 diferenciálních a 4 absolutních kanálů o frekvencích 400, 200, 100 a 25 kHz pomocí softwaru Magnifi verze 3.5R9 kanadské firmy Eddyfi. Jako hlavní byla zvolena frekvence 200 kHz. Ostatní frekvence jsou frekvence pomocné.

Ke zvýraznění prvků podpěrného systému (simulace podpěry) a potlačení deformací trubky (ohyb) byl použit mix absolutních kanálů o frekvencích 25 kHz a 100 kHz. K potlačení signálů podpěrného systému a zvýraznění relevantních signálů úbytku tloušťky stěny teplosměnné trubky pod těmito prvky byl použit mix diferenciálních kanálů o frekvencích 200 kHz a 25 kHz.

Na záznamu umělých necelistvostí procházejících skrz celou tloušťku stěny kalibrační měrky byla provedena kalibrace signálu vířivých proudů tak, aby pro diferenciální kanály odpovídal tento signál amplitudě 10 V a fázovému natočení 40° (obrázek 4). Pro absolutní kanály pak byla amplituda nastavena na 5 V a fázové natočení na 40° (obrázek 5).



Obrázek 4: Kalibrace diferenciálních kanálů



Obrázek 5: Kalibrace absolutních kanálů

Na základě fázového natočení signálů ostatních umělých necelistvostí kalibrační měřky byly pro všechny diferenciální kanály zkonstruovány fázové vyhodnocovací křivky pro určení procentuálního úbytku detekovaných indikací necelistvostí (obrázky 6 - 10). Při kontrolách trubek vířivými je k určování hloubky necelistvostí využíváno fázového

zpoždění 1 rad (tj. 57°) pro jednu standardní hloubku vniku (hloubka, ve které klesne hustota vířivých proudů na 36,8% hustoty vířivých proudů na povrchu). Standardní hloubka vniku je počítána podle vzorce:

$$\delta = \frac{500}{\sqrt{\sigma \cdot \mu_r \cdot f}} \text{ [mm]}$$

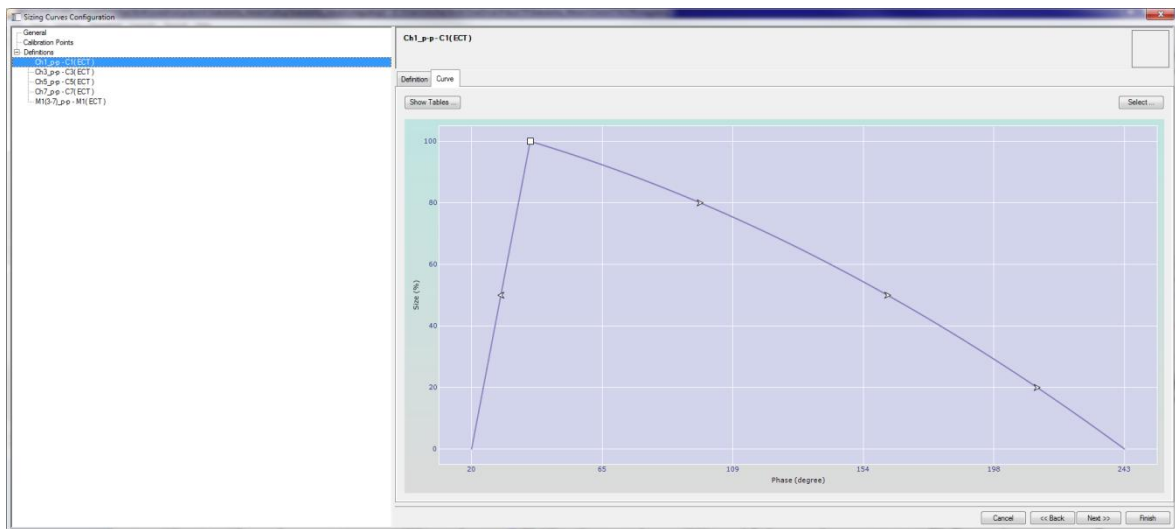
kde

$\delta$  standardní hloubka vniku [mm]

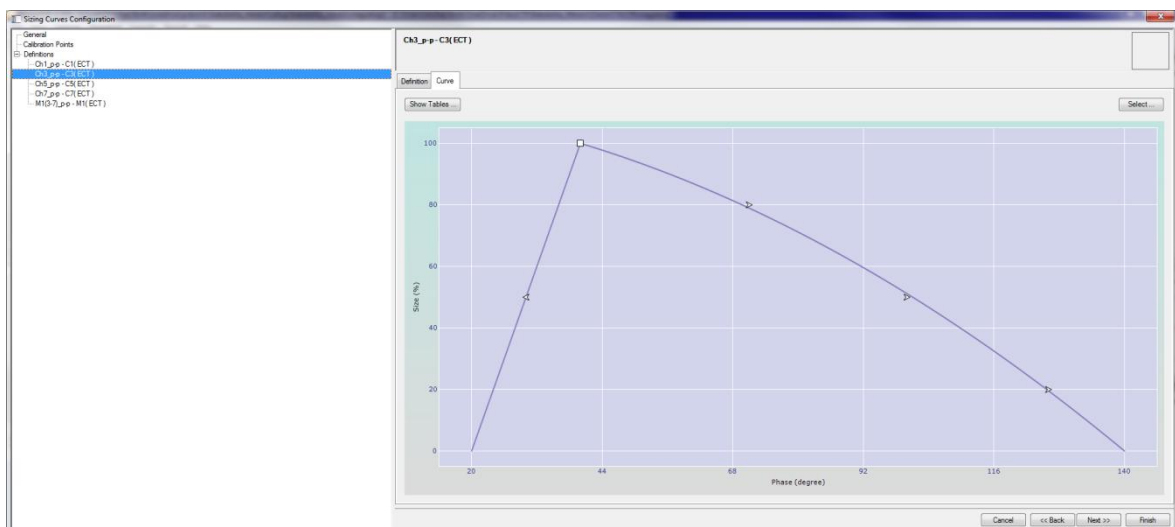
$\sigma$  konduktivita [MS/m]

$\mu_r$  relativní permeabilita

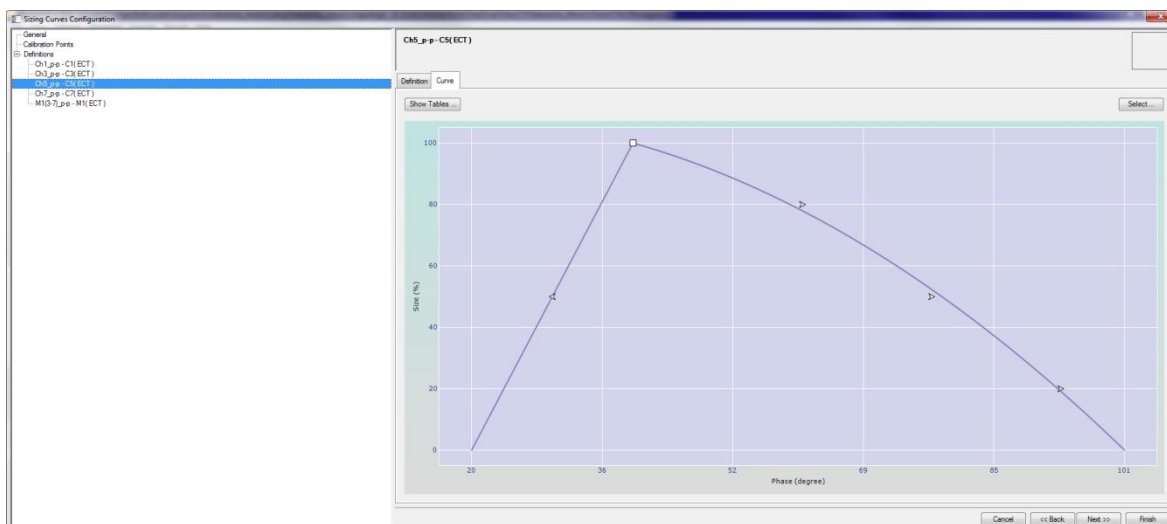
$f$  frekvence [Hz]



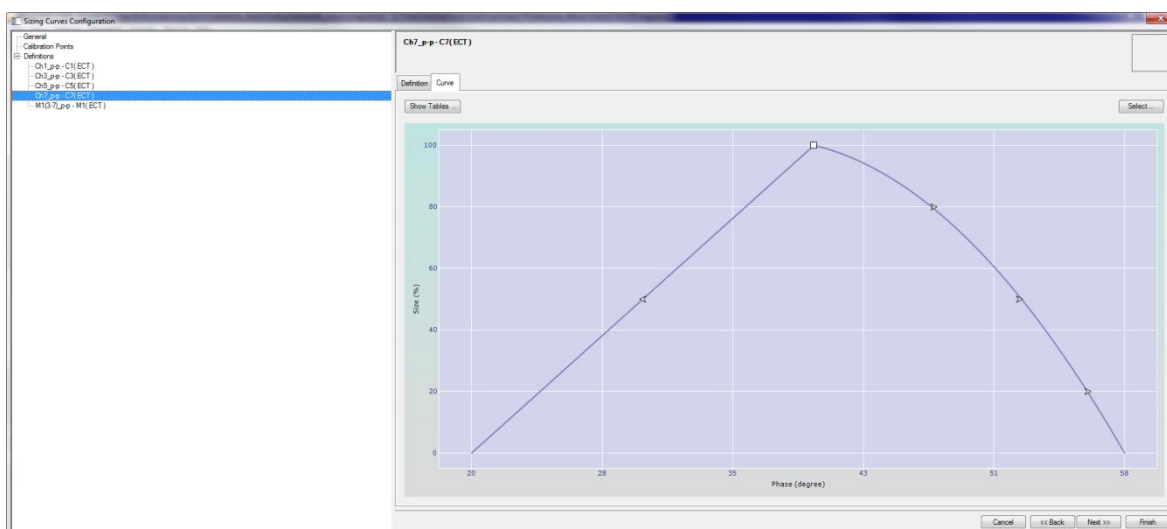
Obrázek 6: Fázová vyhodnocovací křivka pro diferenciální kanál 400 kHz



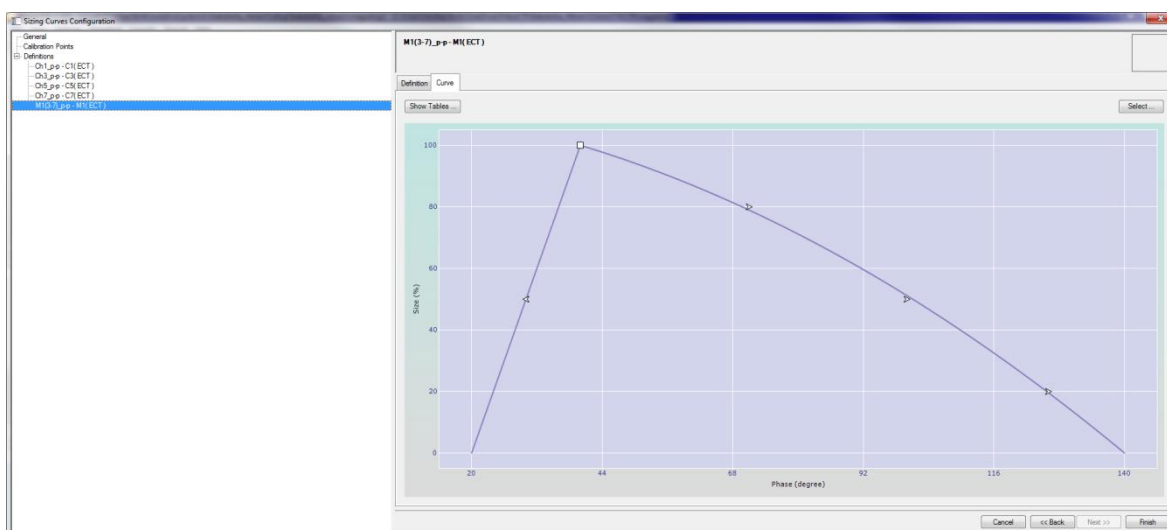
Obrázek 7: Fázová vyhodnocovací křivka pro diferenciální kanál 200 kHz



Obrázek 8: Fázová vyhodnocovací křivka pro diferenciální kanál 100 kHz



Obrázek 9: Fázová vyhodnocovací křivka pro diferenciální kanál 25 kHz



Obrázek 10: Fázová vyhodnocovací křivka pro mixovaný kanál M1(200-25kHz)



## 5.2 Měření

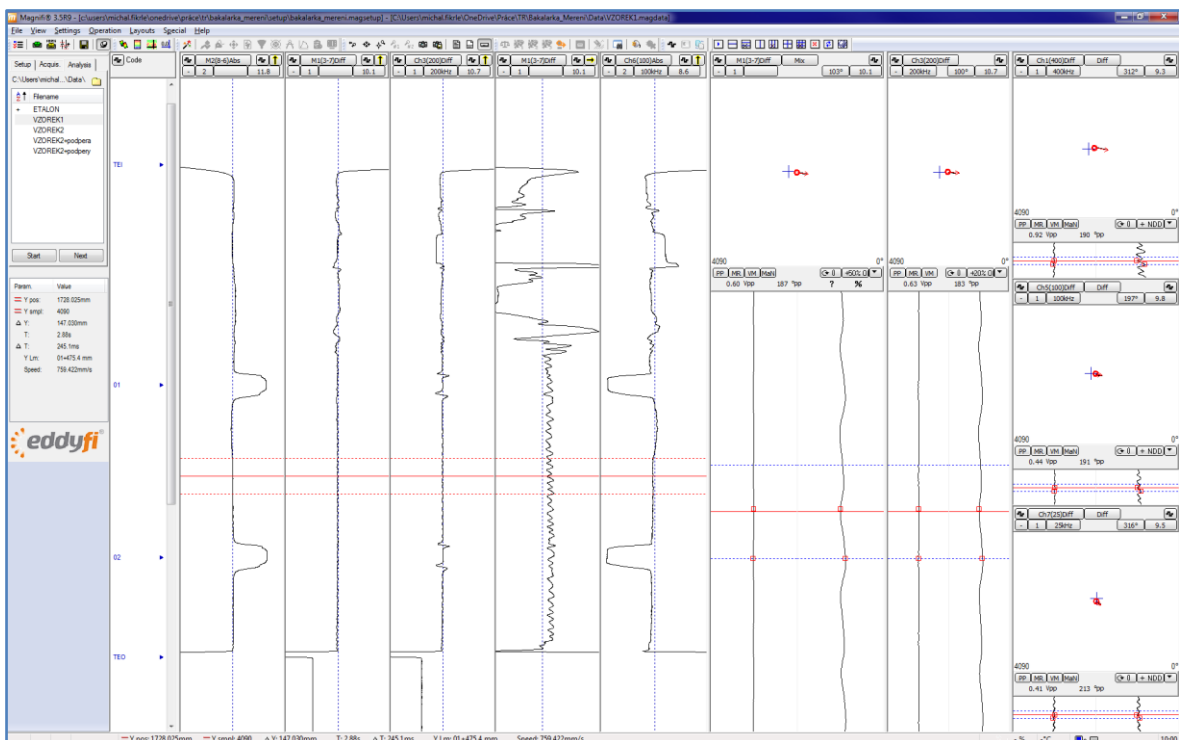
K experimentálnímu měření byly zvoleny dva vzorky. Vzorek č. 1 představuje trubku bez defektů. Jako simulace prvků podpěrného systému parogenerátoru byly na trubce navlečeny dva kroužky z feritické oceli.

Jako druhý byl zvolen vzorek č. 2. Na tomto zkušebním tělese jsou vytvořeny umělé necelistvosti, představující různé druhy poškození teplosměnné trubky.

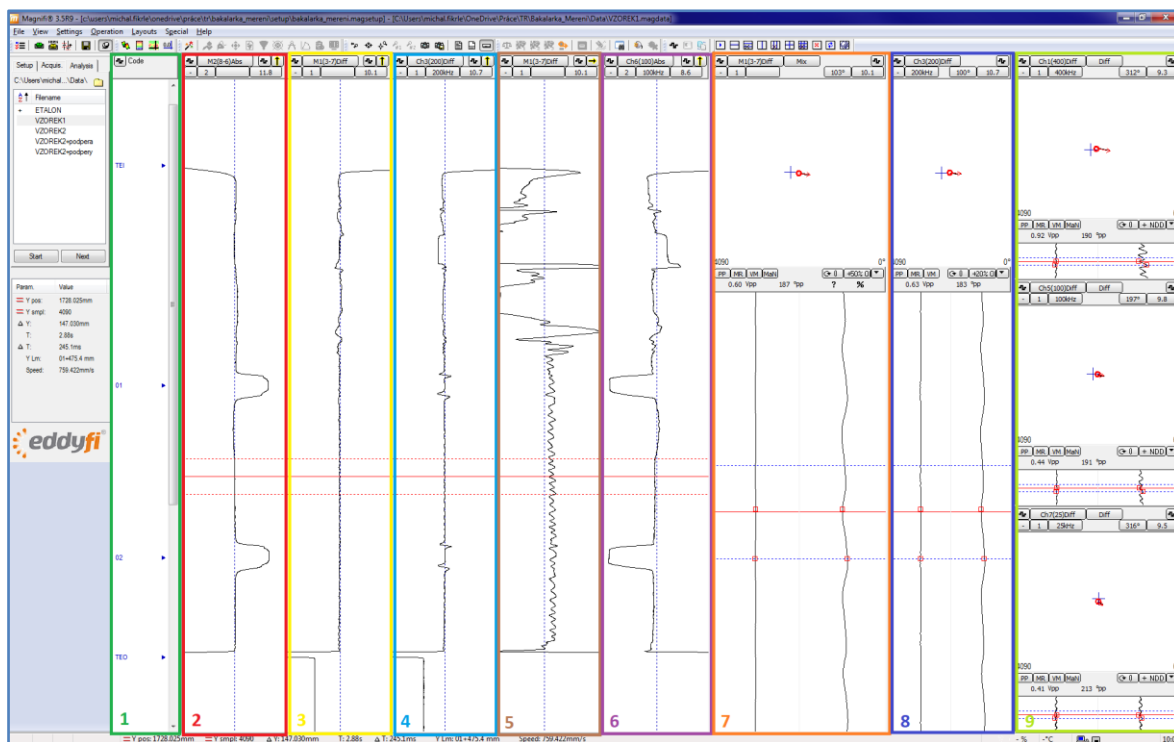
Oba vzorky svými rozměry a chemickým složením odpovídají reálným trubkám parogenerátorů reaktorů VVER.

Měření bylo provedeno ručním tažením sondy teplosměnnou trubkou směrem ven z trubky („Pull“), rychlostí přibližně 600 mm/s. vzorkovací frekvence byla zvolena tak, aby byl záznam uskutečněn 2,3 x za vteřinu.

### 5.2.1 Vzorek č.1



Obrázek 11: Záznam vzorku č. 1



Obrázek 12: Popis rozložení plochy

Na obrázku 11 je zobrazen kompletní záznam vzorku 1. Na obrázku 12 jsou pak barevně rozlišena zobrazená okna pracovní plochy za účelem následujícího popisu.

Okno č. 1 představuje prostor pro popis událostí v průběhu signálů vířivých proudů. Trigramy „TEI“ a „TEO“ představují začátek (Tube End Inlet) a konec (Tube End Outlet) záznamu měřeného vzorku. Značkami 01 a 02 jsou označeny simulované prvky podpěrného systému (dvě pravé výchylky v okně č. 2).

V okně č. 2 – tzv. „Strip Chart“ je zobrazena vertikální (Y) složka mixovaného kanálu 2, sloužícího právě ke zvýraznění signálů podpěrného systému.

„Strip Chart“ č. 3 zobrazuje vertikální složku mixovaného kanálu 1. „Mix1“ z diferenciálních kanálů 200 kHz a 25 kHz představuje hlavní kanál pro detekci a kvantifikaci indikací imperfekcí pod podpěrami, antivibračními tyčemi a na hranách trubkovnic parogenerátoru. Jelikož je celé zkoušení vířivými proudy koncipováno tak, aby byly změny průměru trubky promítnuty do horizontální složky a změny vodivosti (úbytek tloušťky stěny – trhliny, pitting, koroze,...) do vertikální složky signálu, představuje vertikální složka kanálu „Mix1“ hlavní zobrazení pro detekci závažných poškození

teplosměnných trubek. Z obrázku je též patrné, že signály simulovaných podpěr byly z tohoto kanálu odmixovány – v porovnání se sousedním oknem č. 4

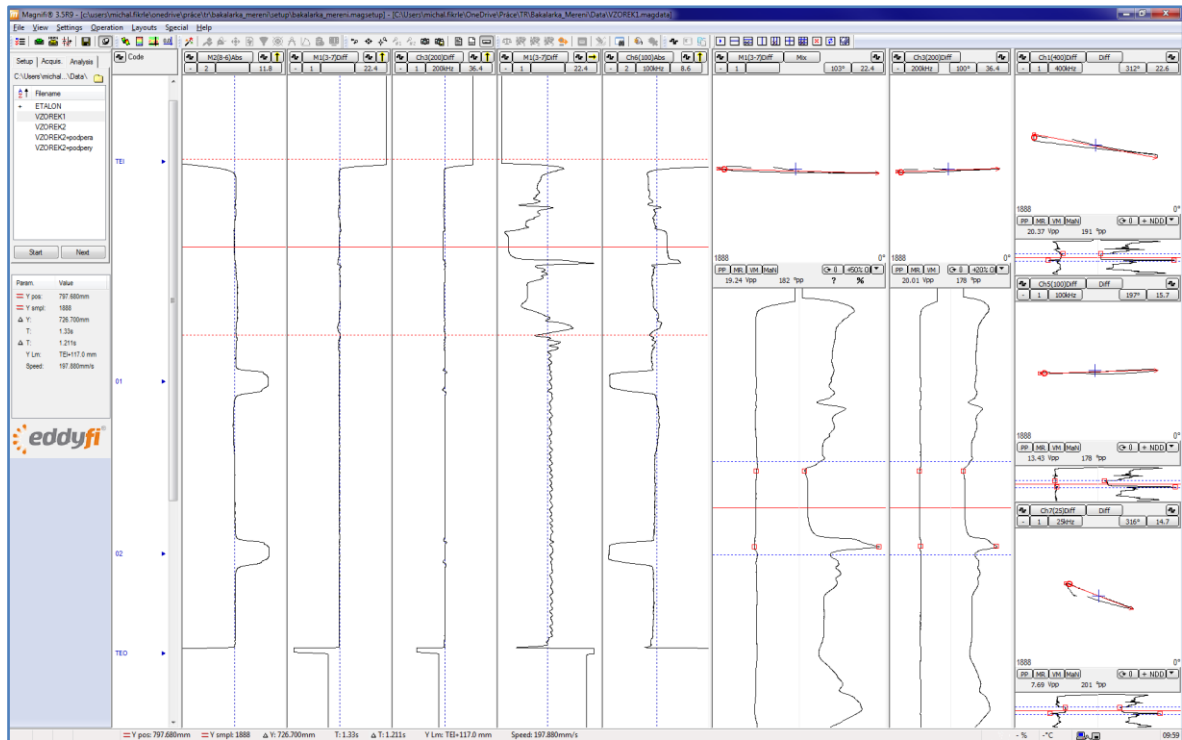
Okno č. 4 představuje stejné zobrazení pro základní diferenciální kanál 200 kHz.

V okně č. 5 je zobrazena horizontální (X) složka kanálu „Mix1“. Toto okno je určeno k detekci nekvantifikovatelných indikací změn průměru („dent“, „ding“, „bulge“, geometrické změny,...) a změn permeability. V horní části okna č. 5 je patrný výrazný charakteristický signál ohybu (lokální deformace) teplosměnné trubky. Detailní pohled na tento signál je v kurzoru na obrázku č. 13.

Horizontální složka absolutního kanálu 100 kHz v okně č. 6 slouží k detekci pozvolných úbytků stěny trubky, které jsou diferenciálními kanály ze svého principu obtížně zjistitelné. Jde hlavně o korozní úbytky.

Okno č. 7 představuje X-Y zobrazení kanálu „Mix1“ a spolu se sousedním oknem č. 8 (X-Y zobrazení hlavního kanálu 200 kHz) slouží k analýze a kvantifikaci detekovaných indikací. Signál vířivých proudů je definován čtyřmi parametry (amplituda, fáze, tvar a čas sestavení). Na základě těchto parametrů je pak určen typ, délka, hloubka a procentuální úbytek indikace.

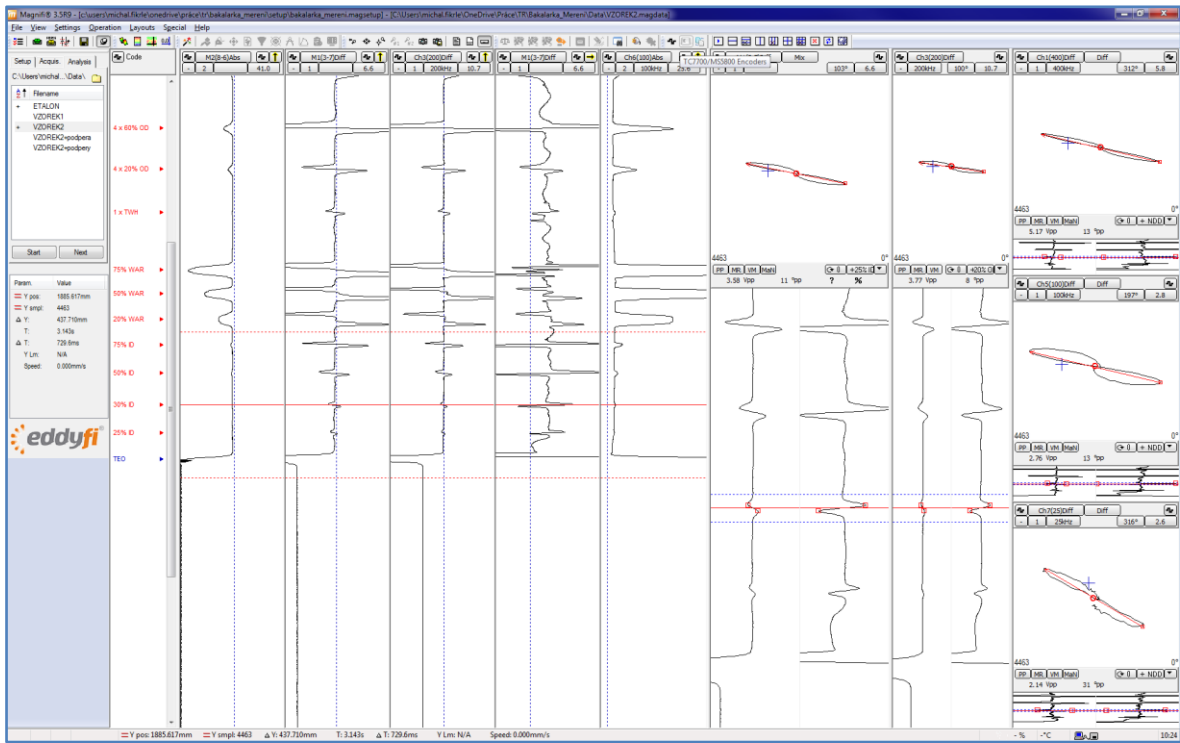
Ve třech oknech č. 9 jsou pak X-Y zobrazení pomocných frekvencí 400, 100 a 25 kHz. Tyto okna jsou využívána pro rozhodování o typu nalezené indikace.



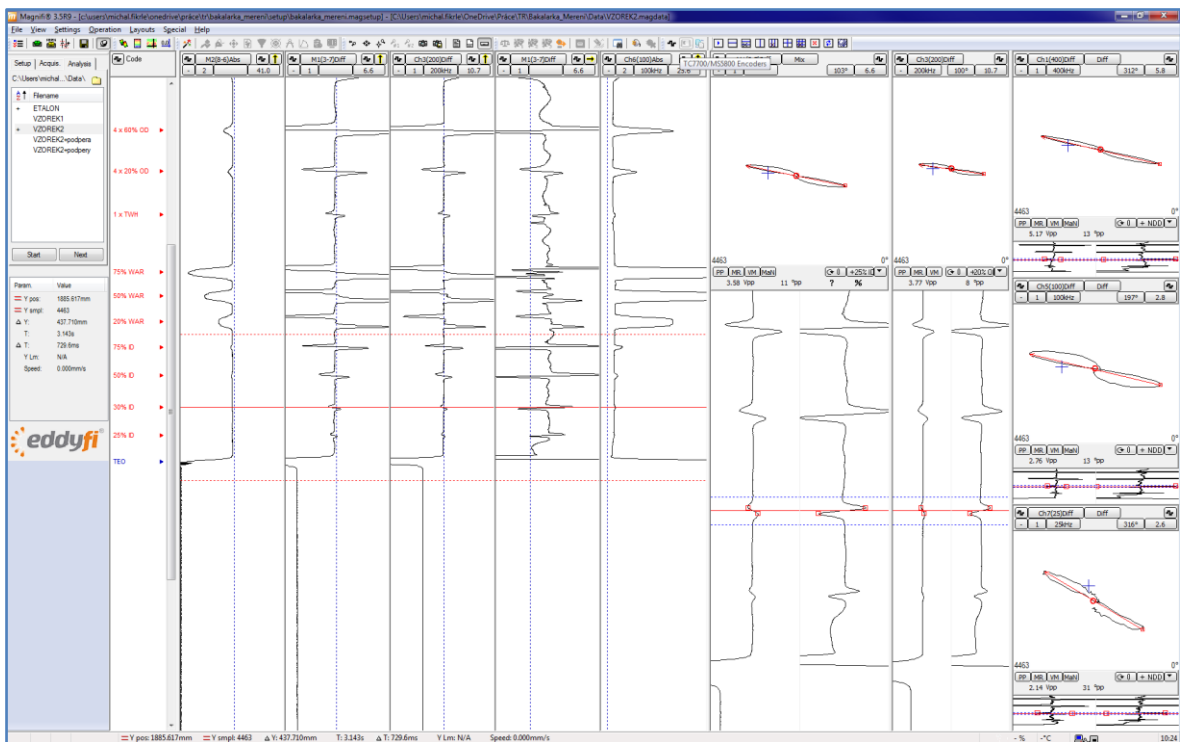
Obrázek 13: Signál ohybu teplosměnné trubky

## 5.2.2 Vzorek č.2

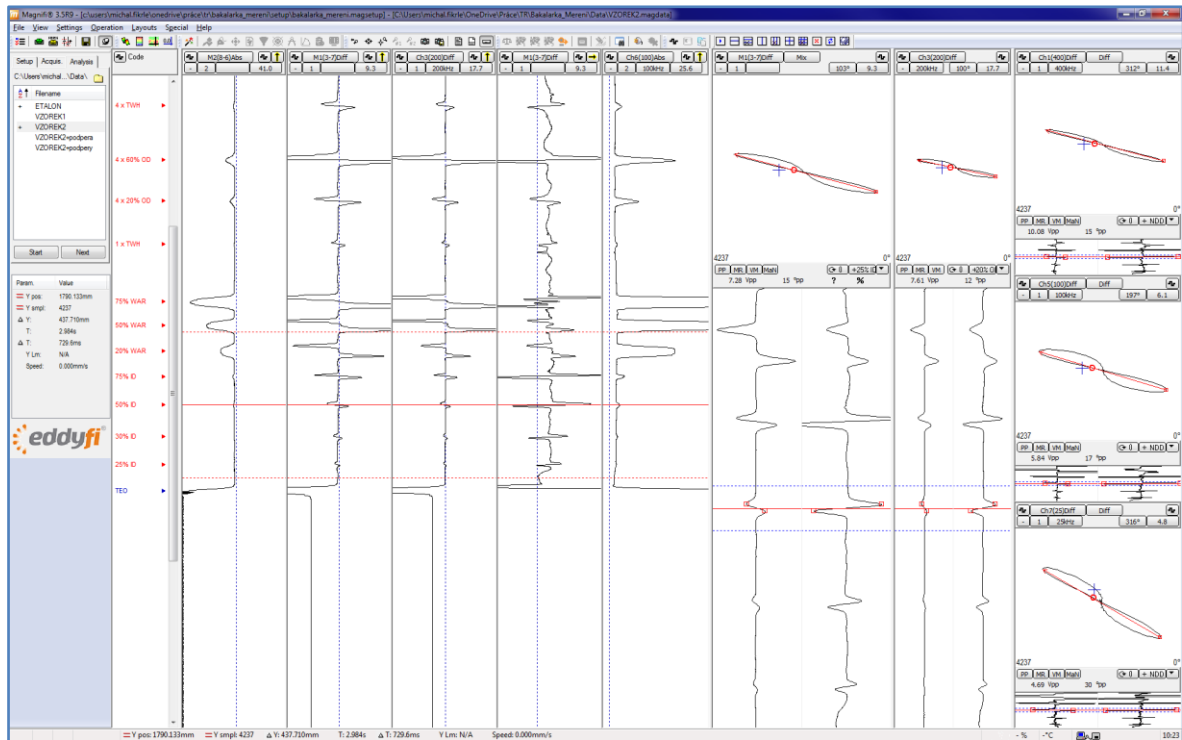
První série umělých necelistvostí na vzorku č. 2 představuje vady typu „pitting“ z vnitřního (ID) povrchu teplosměnné trubky o procentuálním úbytku 25%, 30%, 50% a 75%. Záznamy z měření jsou na obrázcích 14 až 17.



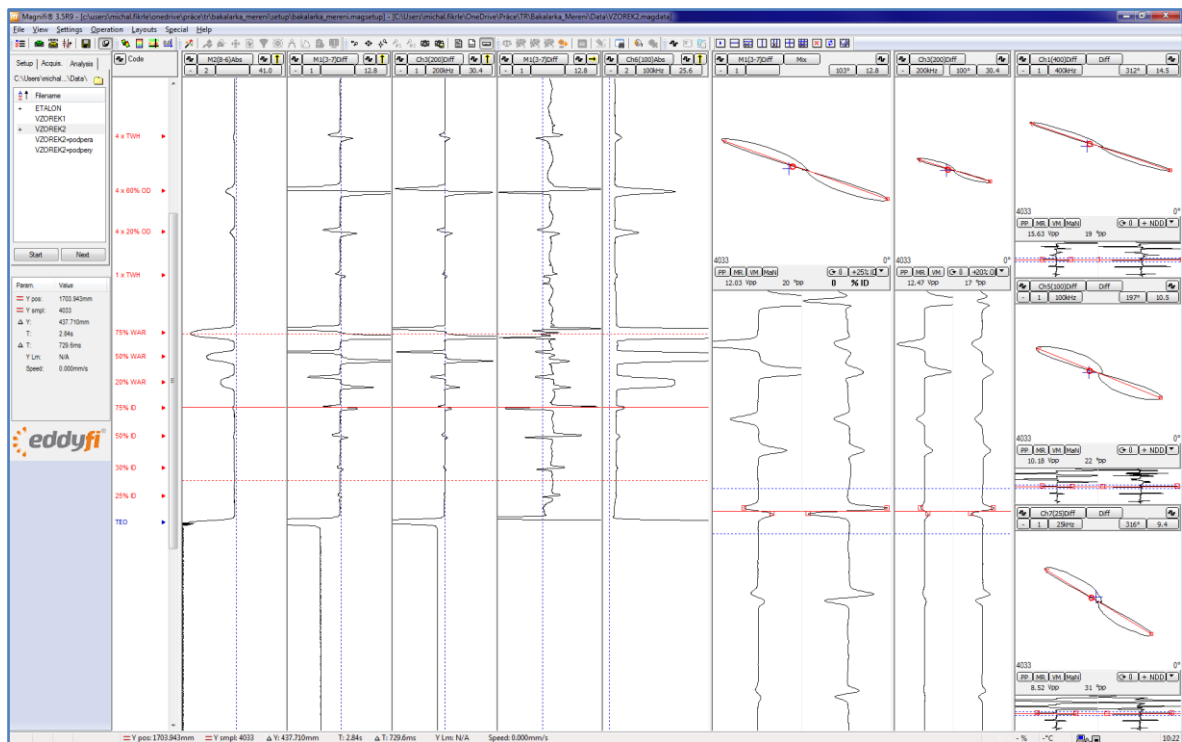
Obrázek 14: Záznam indikace „pitting“ 25% ID



Obrázek 15: Záznam indikace „pitting“ 30% ID



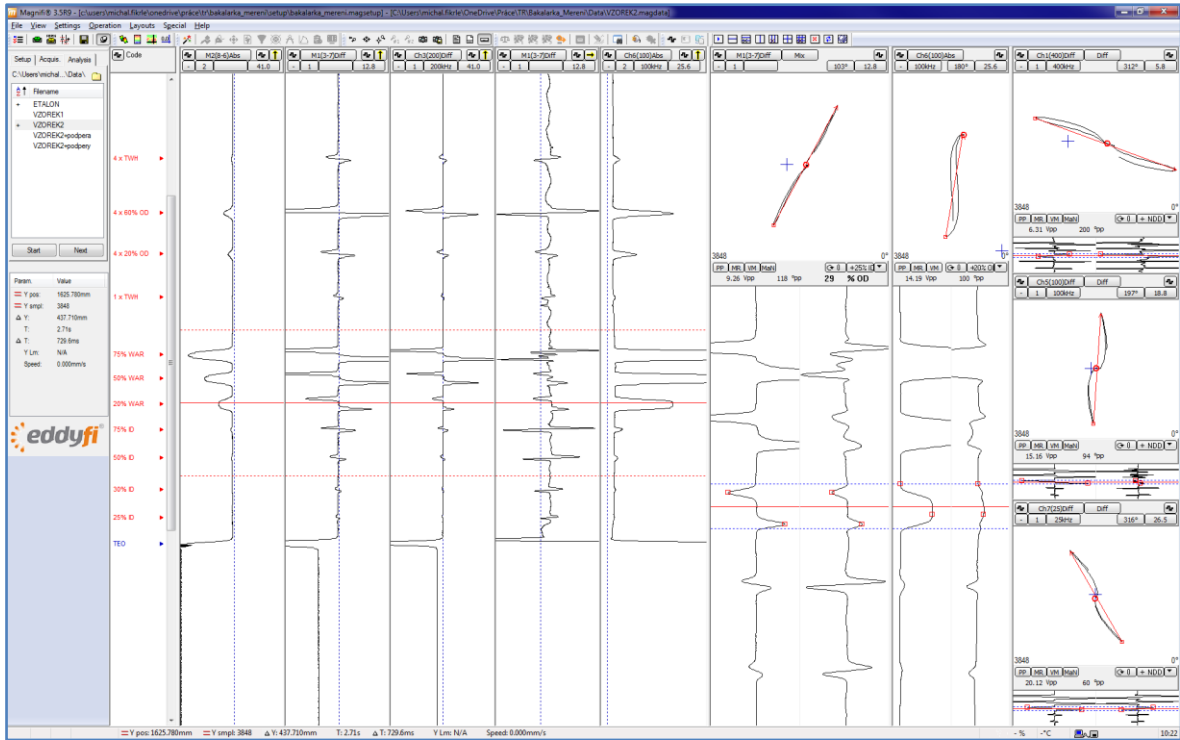
Obrázek 16: Záznam indikace „pitting“ 50% ID



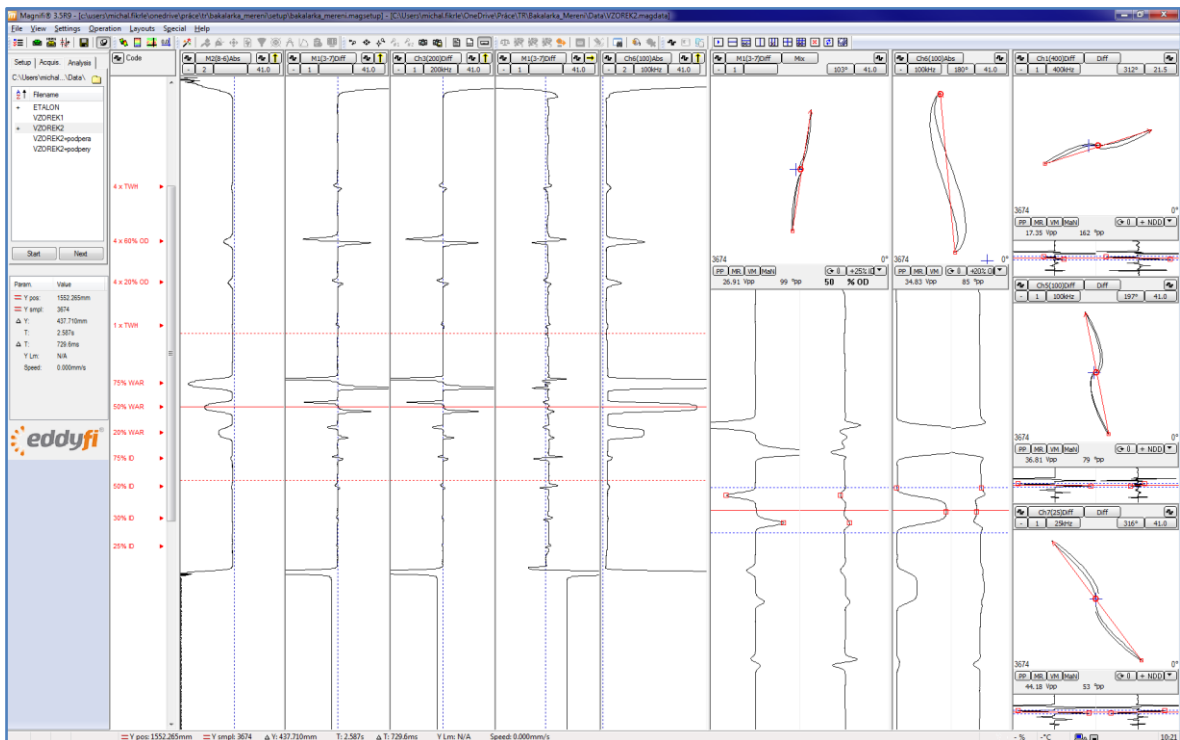
Obrázek 17: Záznam indikace „pitting“ 75% ID

Jak je z obrázků 14 až 17 patrné (okno 9), fázové natočení indikací vnitřních vad leží na levé straně fázové kalibrační křivky ( $0^\circ$  až  $39^\circ$ ), tvar typické „osmičky“ vypovídá o chybějícím materiálu (na rozdíl od ostrého signálu změn permeability). S klesající frekvencí dochází k fázovému naklápění indikace směrem k  $100\%$  referenční vadě ( $40^\circ$ ).

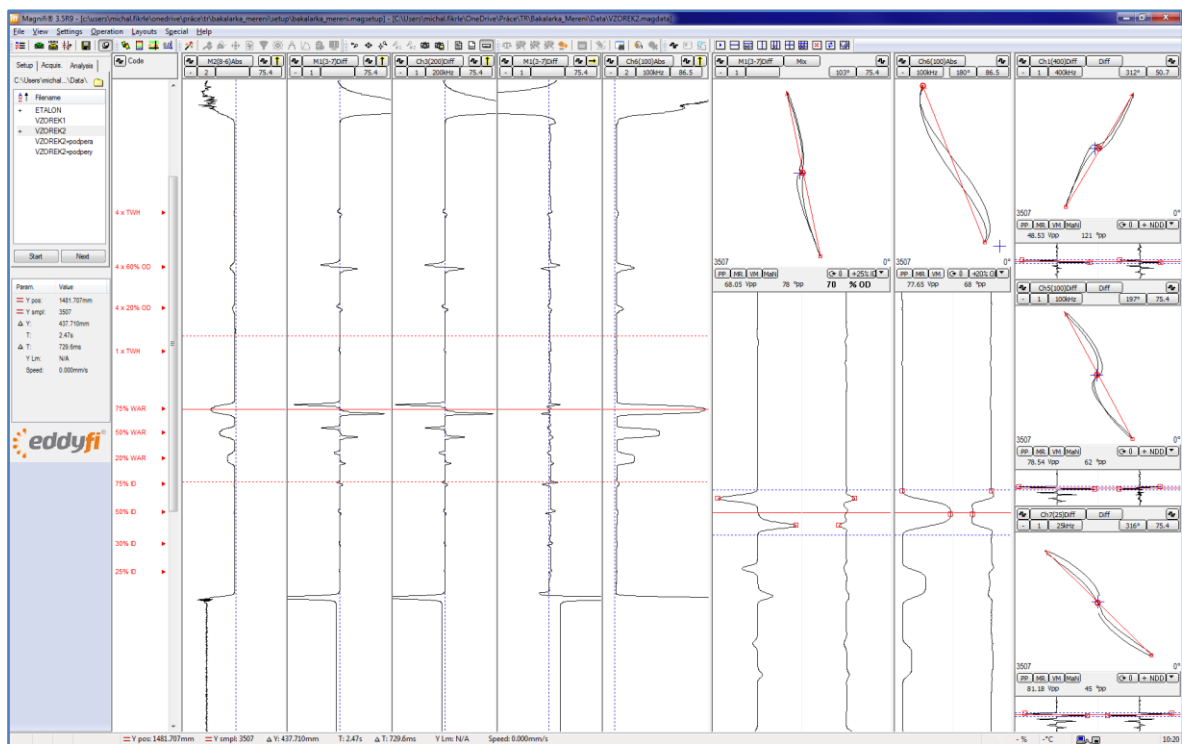
Další sadou umělých necelistvostí na vzorku č. 2 jsou simulace opotřebení (wear) v důsledku tření (fretting) mezi teplosměnnou trubkou a cizím tělesem (typicky antivibrační tyč, podpěrná deska, nebo „loose part“). Záznamy indikací těchto umělých necelistvostí jsou na obrázcích 18 až 20.



Obrázek 18: Záznam indikace „Wear 25%“



Obrázek 19: Záznam indikace „Wear 50%“

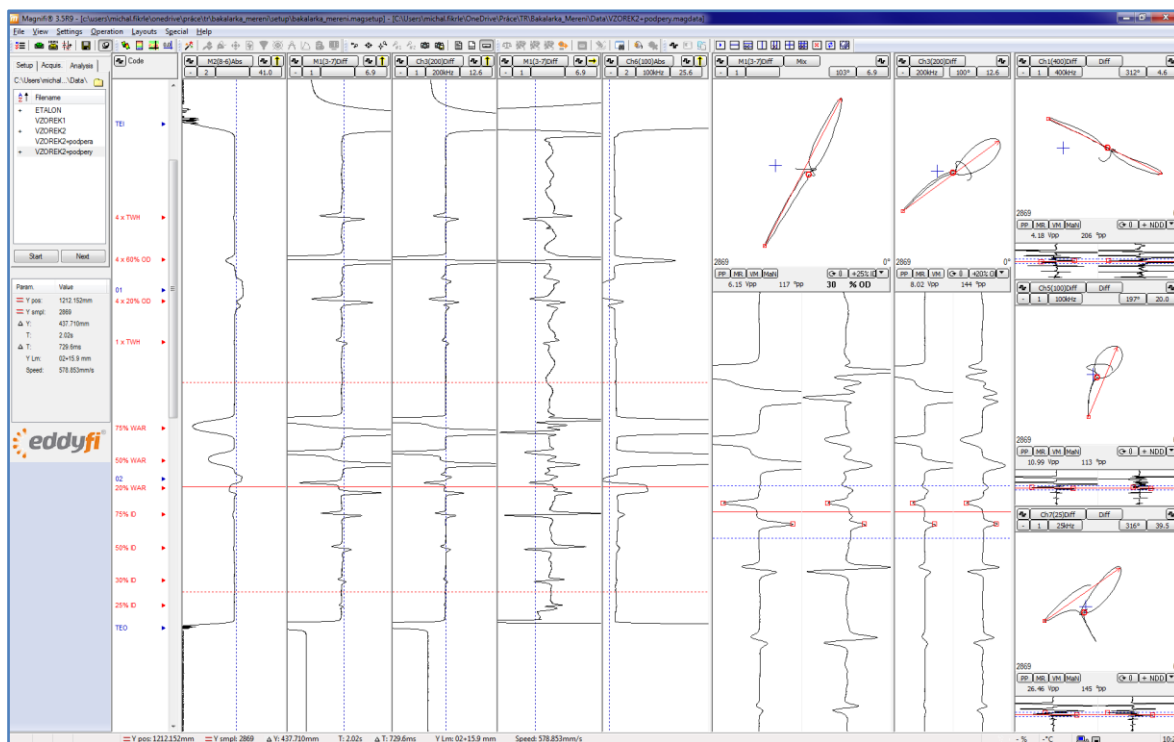


Obrázek 20: Záznam indikace „Wear 75%“

Pro indikace tohoto typu je typická jejich délka („setup time“), obvykle odpovídající šířce cizího předmětu (podpěry). Fázové natočení indikací leží na pravé straně kalibrační křivky, z čehož vyplývá, že se jedná o indikace úbytku tloušťky stěny trubky z vnější strany. S klesající frekvencí se indikace fázově natáčí směrem ke 40° (vada skrz celou tloušťku stěny) – což odpovídá šířce fázových kalibračních křivek pro různé frekvence.

Jelikož indikace typu „wear“ vznikají v důsledku kontaktu s cizím předmětem byla pro další měření na umělou necelistvost „wear 25%“ umístěna imitace podpěry. Záznam z tohoto měření je na obrázku 21.

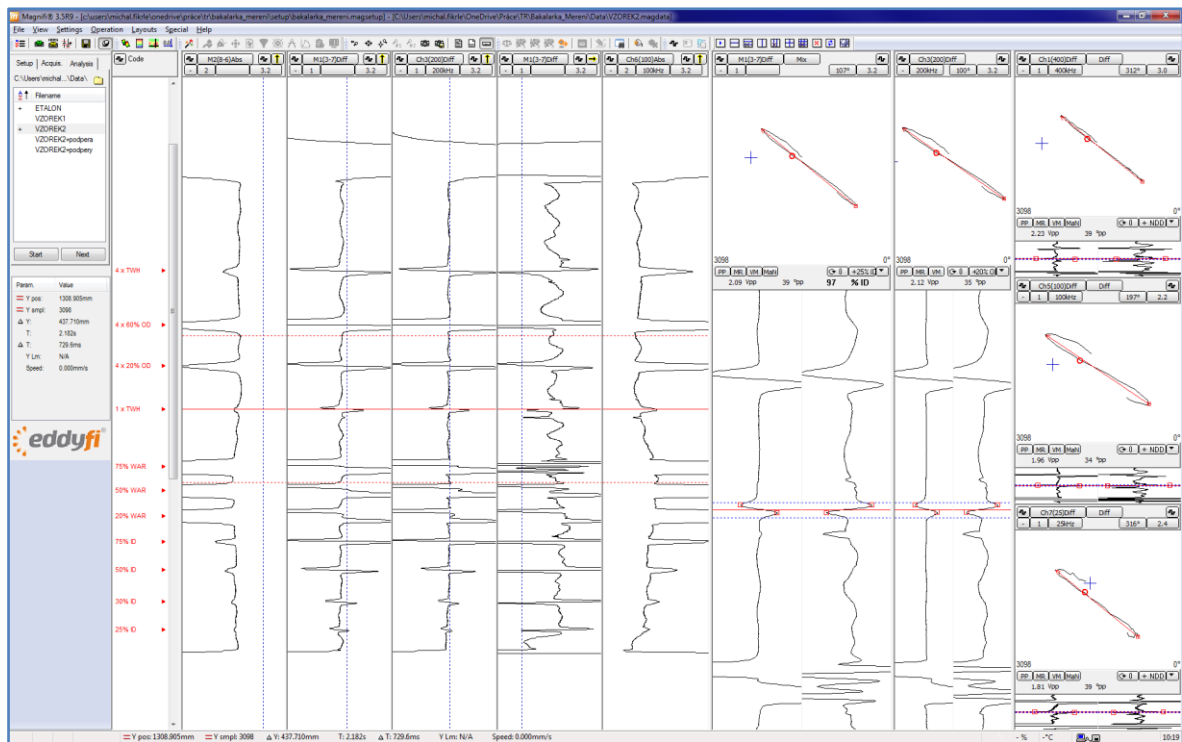




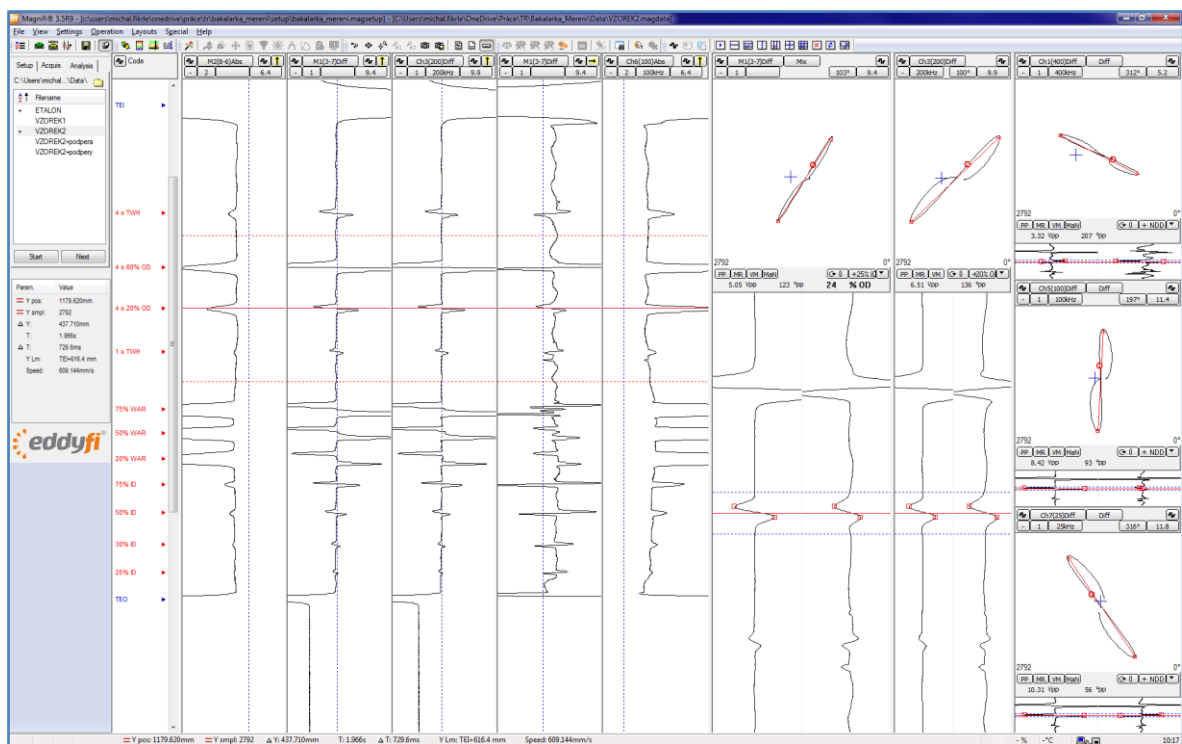
Obrázek 21: Záznam indikace „Wear 25% pod imitací podpěry“

Jak je z obrázku 21 patrné (okno 9), dochází v důsledku umístění podpěry k výraznému zkreslení výsledného signálu vířivých proudů. Zvláště u nižších frekvencí, signál simulované podpěry výrazně převládá. U hlavního diferenciálního kanálu 200 kHz došlo k fázovému natočení signálu mimo kalibrační křivku, tudíž by byla indikace hodnocena jako nevadová. Na tomto příkladu je dobře vidět význam mixování frekvencí, na kanálu „Mix1“ je signál podpěry potlačen a indikace je hodnocena jako vadová s procentuálním úbytkem odpovídajícím měření bez simulace podpěry.

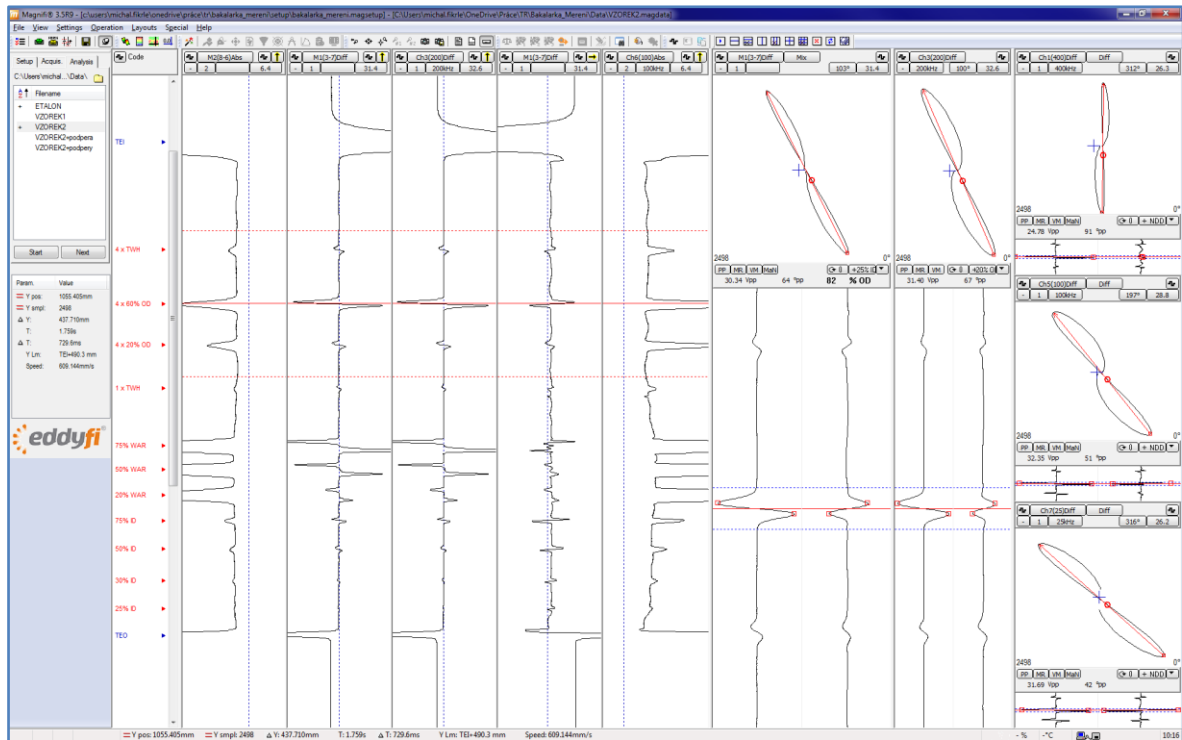
Poslední sérií umělých necelistvostí na zkušební vzorku 2 jsou simulace vad typu „pitting“ z vnější strany teplosměnné trubky. Jde o vývrty s plochým dnem („flat bottom hole“) a vývrty celou tloušťkou stěny („Thru Wall“) o hloubkách 1 x 100%, 4 x 20%, 4 x 60% a 4 x 100%. Záznamy z měření jsou na obrázcích 22 až 25.



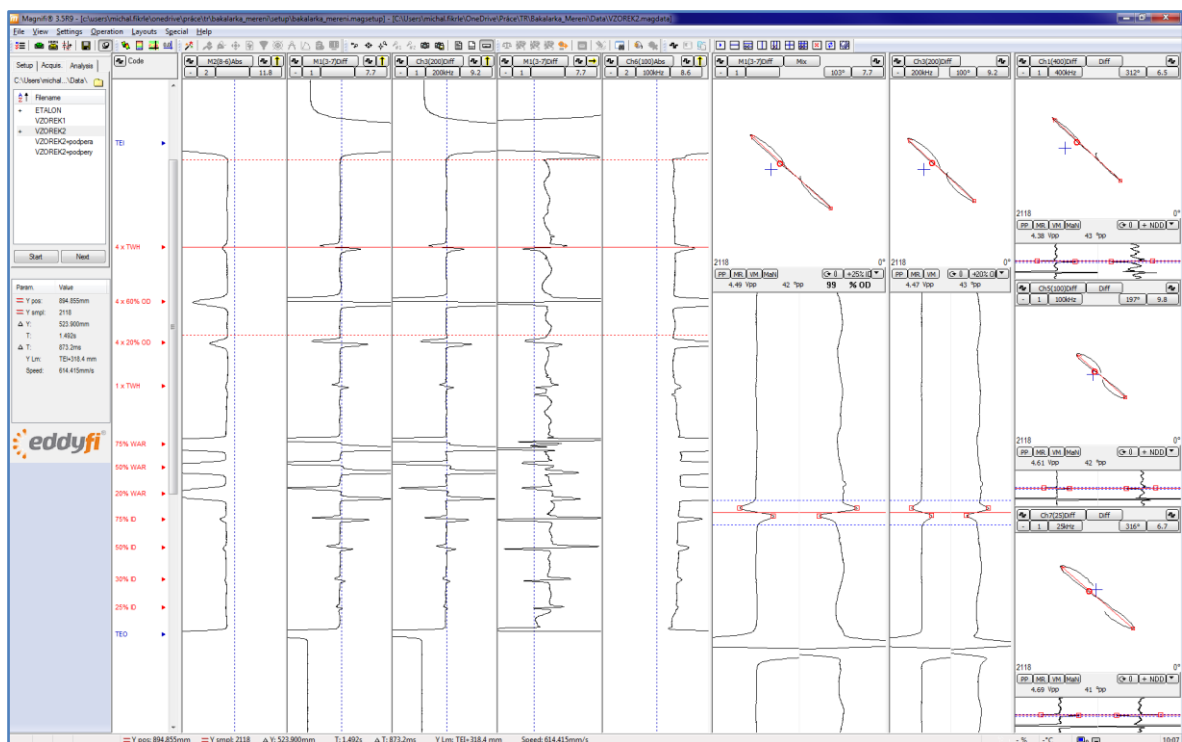
Obrázek 22: Záznam indikace „1 x 100%“



Obrázek 23: Záznam indikace „4 x 20%“



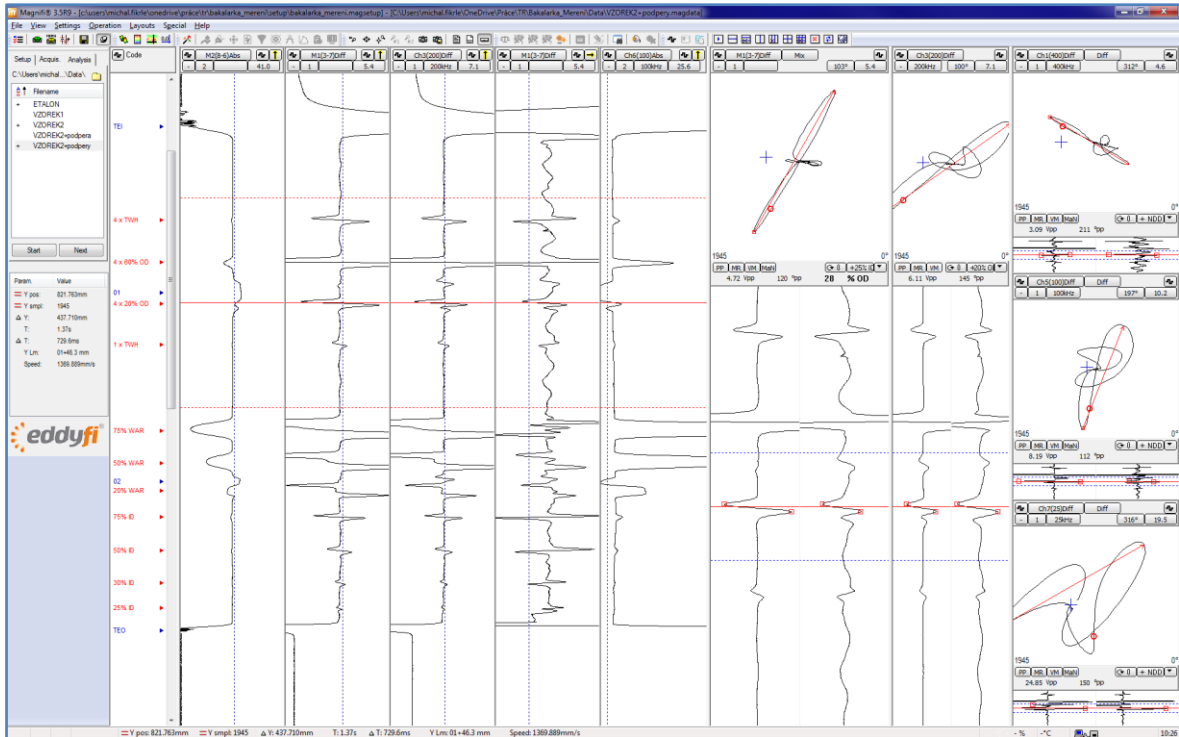
Obrázek 24: Záznam indikace „4 x 60%“



Obrázek 25: Záznam indikace „4 x 100%“

Pro indikace poškození typu „pitting“ a typu trhlin z vnější strany trubky je typický jejich tvar, krátká délka a umístění na pravé straně fázové kalibrační křivky. Jedná se o nejčastěji se vyskytující se typ poškození teplosměnných trubek parogenerátorů horizontálního typu. K jejich vniku dochází nejčastěji v důsledku korozního prostředí

v oblastech zasažených pevnými usazeninami („sludge“), nebo na hranách prvků podpěrného systému. Z toho důvodu bylo i pro tento typ indikace provedeno měření s imitací podpěry, zasahující do umělé nečistosti. Záznam z tohoto měření je na obrázku 26.



**Obrázek 26:** Záznam indikace „4 x 20%“ pod simulovanou podpěrnou deskou

Tak jako u měření na obrázku 21 (okno 9) je patrné zkreslení relevantního signálu očekávaným, ale nežádoucím signálem podpěrné desky. I zde je signál podpěry potlačen technikou mixování kanálů. Na kanálu „Mix1“ je pak signál správně hodnocen jako signál úbytku tloušťky stěny trubky.

## **6 Závěr**

Tato bakalářská práce s názvem Nedestruktivní testování parogenerátorů s využitím vířivých proudů se zabývá popisem principů nejčastěji používaných nedestruktivních metod zkoušení materiálů. Okrajově popisuje rozdělení parogenerátorů pro jaderné elektrárny. Dále se tato bakalářská práce věnuje více do hloubky principům a konstrukci parogenerátorů na jaderných elektrárnách s reaktorem typu VVER a jejich zkoušení při periodických provozních prohlídkách.

V rámci této bakalářské práce bylo provedeno experimentální měření s využitím vířivých proudů zaměřené na teplosměnnou plochu parogenerátoru, která je jedna z nejdůležitějších komponent jaderné elektrárny a podléhá přísným pravidelným provozním kontrolám a prohlídkám. Experimentálním měřením pomocí vířivých proudů bylo provedeno nedestruktivní zkoušení dvou zkušebních vzorků včetně simulace podpěrného systému, který je vyobrazen na obrázku č. 21 a 26. Vzorek č.1 byl bez závažných indikací a vyhověl by při provozní kontrole na JE. Zkušební vzorek č. 2, na kterém jsou vytvořené umělé vady nevyhověl a musel by být zaslepen. Výsledky zkoušení vzorku č. 2 jsou vyobrazeny na obrázcích č. 14 – 26. Zkušební vzorek č. 2 posloužil k demonstraci typických vad, které se při tomto měření mohou vyskytovat. Tímto experimentálním měřením se ověřila spolehlivost a využitelnost této nedestruktivní metody na jaderných elektrárnách.

V současné době se tímto systémem zkoušení pomocí vířivých proudů, při provozních prohlídkách a kontrolách, zkouší teplosměnná plocha parogenerátoru na jaderných elektrárnách v Čechách.

## **Seznam literatury a informačních zdrojů**

- [1] KOPEC, B A KOLEKTIV: *Nedestruktivní zkoušení*, Česká společnost pro nedestruktivní zkoušení, Brno 2015
- [2] KOLEKTIV AUTORŮ: *Nedestruktivní zkoušení*, Dům kultury kovoprůmyslu, Praha 1987
- [3] ÚTVAR PŘÍPRAVA JE, *Primární část JE VVER 440*, Brno 2007
- [4] BERNARD KOPEC A KOLEKTIV: *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*, ČNDT, Brno 2008
- [5] ÚTVAR PŘÍPRAVA JE: *Primární část JE VVER 1000 díl I*, Brno 2008
- [6] ÚTVAR PŘÍPRAVA JE, *Primární část JE VVER 440 modul 1*, Brno 2011
- [7] ÚTVAR PŘÍPRAVA JE, *Primární část JE VVER 1000 modul 2*, Brno 2004
- [8] UŽIVATELSKÝ MANUÁL PŘÍSTROJE MULTISCAN MS 5800, R/D TECH INC.