

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Nedestruktivní zkoušení zařízení jaderných  
elektráren elektrickými metodami**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2011/2012

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr JELÍNEK**  
Osobní číslo: **E10N0007K**  
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Nedestruktivní zkoušení zařízení jaderných elektráren elektrickými metodami**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Popište jednotlivé elektrické metody nedestruktivního zkoušení, využívané ke zkoušení komponent jaderných elektráren.
2. Zhodnoťte jednotlivé metody nedestruktivního zkoušení z hlediska možností jejich využívání.
3. Uveďte vhodné metody pro automatizovaný (mechanizovaný) způsob nedestruktivního zkoušení na jaderných elektrárnách, včetně příkladů používaných manipulátorů a jiných zkušebních systémů.
4. Porovnejte postup zpracování dat a vyhodnocování výsledků podle původních norem (předpisů) a současného přístupu (metodiky a směrnice ENIQ, SÚJB a IAEA).

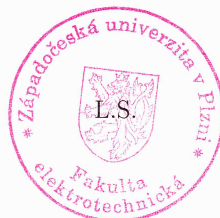
Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


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

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Josef Pihera, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

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



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce se zabývá nedestruktivním zkoušením zařízení jaderných elektráren elektrickými metodami. Popisuje základní metody zkoušení a prakticky prokazuje jejich vhodnost k detekci určitého typu vady. Dále se zabývá možnostmi automatizovaného zkoušení a požadavky na nedestruktivní zkoušení z hlediska norem a směrnic.

## **Klíčová slova**

NDT, sonda, ultrazvuk, vířivé proudy.

## **Abstract**

The presented thesis deals with the non-destructive testing of the equipments of nuclear power station by electrical methods. It describes basic test methods and practically demonstrates their suitability to sense of the specific type of defect. It also deals with the possibilities of automated testing and the requirements on the non-destructive testing with respect to rules and directives.

## **Key words**

NDT, probes, ultrasound, eddy currents.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne 30.4.2012

Bc. Petr Jelínek

.....

## **Poděkování**

Tímto si dovoluji poděkovat panu Ing. Josefu Piherovi, Ph.D. za metodické vedení mé diplomové práce a věcné připomínky, které pro mne byly při jejím zpracování velmi cenné. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Janu Vítovi, Ph.D. za odborné rady a množství literatury a informací z oblasti NDT, které mi poskytl. V neposlední řadě bych také velmi rád poděkoval své milované ženě i celé rodině, za jejich podporu během psaní této diplomové práce i v průběhu celého mého studia na ZČU.

**Obsah:**

<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ .....</b>	<b>10</b>
<b>1 METODY NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ.....</b>	<b>11</b>
1.1 ZKOUŠENÍ ULTRAZVUKEM.....	11
1.1.1 PIEZOELEKTRICKÝ MĚNIČ .....	13
1.1.2 KONVENČNÍ TECHNIKY ULTRAZVUKOVÉHO ZKOUŠENÍ.....	13
1.1.3 ZÁKLADNÍ TYPY KONVENČNÍCH ULTRAZVUKOVÝCH SOND .....	15
1.1.4 SPECIÁLNÍ TECHNIKY ULTRAZVUKOVÉHO ZKOUŠENÍ.....	17
1.1.5 ULTRAZVUKOVÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE .....	20
1.2 ZKOUŠENÍ VÍŘIVÝMI PROUDY.....	21
1.2.1 SONDY VÍŘIVÝCH PROUDŮ .....	23
1.2.2 NEŽÁDOUCÍ JEVY SNÍMAČŮ .....	25
1.2.3 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE VÍŘIVÝCH PROUDŮ .....	26
<b>2 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ.....</b>	<b>27</b>
2.1 POPIS ZKOUŠENÉHO OBJEKTU .....	28
2.2 ZKUŠEBNÍ SYSTÉM.....	30
2.3 ZKOUŠENÍ ULTRAZVUKEM .....	31
2.4 ZKOUŠENÍ VÍŘIVÝMI PROUDY .....	35
2.5 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....	41
<b>3 AUTOMATIZOVANÉ POSTUPY ZKOUŠENÍ.....</b>	<b>42</b>
<b>4 ZPRACOVÁNÍ DAT A VYHODNOCOVÁNÍ VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>50</b>
<b>5 ZÁVĚR.....</b>	<b>52</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE POUŽITÝCH OBRÁZKŮ .....</b>	<b>53</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>1</b>



## Úvod

Pravidelné zkoušení komponent patří mezi základní způsoby zajištění provozní bezpečnosti jaderných elektráren (dále JE). Periodicky jsou například kontrolovány tlaková nádoba reaktoru z vnitřní i vnější strany, teplosměnné trubky parogenerátorů, svorníky hlavní příruby reaktoru, svary na hlavním cirkulačním potrubí a další důležité komponenty primárního i sekundárního okruhu. Účelem nedestruktivního testování (dále NDT) je získat komplexní informace o sledovaném objektu a učinit odhad jeho zbytkové životnosti nebo rizika spojeného s dalším využíváním tohoto objektu tak, aby při prováděné kontrole objektu nedošlo k jeho poškození. Existuje řada metod nedestruktivního testování, práce je však zaměřena pouze na dvě nejpoužívanější - metodu ultrazvukovou a metodu vířivých proudů. Obě tyto metody mají svá výrazná specifika, výhody i úskalí. Stejně tak i každá vada, kterou se snažíme pomocí metod NDT diagnostikovat, se vyznačuje určitými specifiky. Vady se vyskytují na povrchu i vně materiálu, jsou různě orientované, různě veliké, atd. K celkovému posouzení technického stavu objektu tedy nestačí pouze samotná detekce vady. Je také třeba určit povahu této vady a provést co nejpřesněji její lokalizaci, včetně stanovení pravděpodobných rozměrů.

Práce je tematicky členěna do čtyř základních kapitol. První část je věnována teoretickému rozboru a charakteristice jednotlivých metod. V další kapitole je provedeno experimentální měření za účelem prokázání vhodnosti uváděných metod k nalezení určitého typu vad s následným vyhodnocením měření. Třetí část práce je věnována automatizovanému zkoušení, popisu používaných manipulátorů a obecně možnostem využití automatizované techniky k NDT. Poslední kapitola práce se zabývá vývojem nedestruktivního testování komponent JE z hlediska požadavků norem a to jak původních, tak současných.

## Seznam symbolů

$\delta$ [mm]	Hloubka vniku elektromagnetického pole
$\sigma$ [mS.m <sup>-1</sup> ]	Měrná elektrická vodivost
$\mu_r$ [-]	Relativní permeabilita
$\mu_0$ [H.m <sup>-1</sup> ]	Permeabilita vakua
$f$ [Hz]	Frekvence
$\omega$ [rad.s <sup>-1</sup> ]	Úhlová rychlost
$P$	Dopadající akustický tlak
$P_R$	Odražený akustický tlak
$\lambda$ [m]	Vlnová délka
$D_o$ [m]	Průměr cívky
$\alpha$ [dB/m]	Koeficient útlumu
$D_n$ [m]	Náhradní velikost
$Q$ [C]	Elektrický náboj

# 1 Metody nedestruktivního zkoušení

## 1.1 Zkoušení ultrazvukem

Ultrazvukové nedestruktivní zkoušení je založeno na principu šíření a odrazu ultrazvukových vln ve zkoušeném materiálu. Ultrazvukové vlny vznikají v přiložené sondě, způsobem daným druhem použitého měniče. Pro dosažení akustické vazby mezi sondou a povrchem zkoušeného objektu je nezbytné použít přechodovou látku, nebo-li tzv. vazební medium, přes které akustické impulzy pronikají dále do zkoušeného objektu. Narazí-li procházející vlna na akustické rozhraní, část energie této vlny se odrazí a část se dále šíří novým prostředím. Míra odražení ultrazvukového signálu při kolmém dopadu na rozhraní je dána koeficientem odrazu  $R$ , pro který platí: <sup>[1]</sup>

$$R = \frac{P_R}{P} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (1.1)$$

kde vlnové akustické odpory prvního a druhého prostředí  $Z_{1,2}$  jsou dány součinem hustoty prostředí  $\rho$  a rychlosti šíření vlny  $c$  v daném prostředí. <sup>[1]</sup>

$$Z = \rho \cdot c \quad (1.2)$$

Z uvedených vztahů je zřejmé, že s vyšším rozdílem akustických tlaků prostředí roste hodnota činitele odrazu. Vada je tedy v tomto případě snadněji detekovatelná. Při šikmém dopadu ultrazvukové vlny na rozhraní dvou prostředí dochází k odrazu a lomu vlny. Odražená a lomená vlna může být podélná, příčná, nebo povrchová. Úhly těchto složek jsou dány Snellovým zákonem: <sup>[15]</sup>

$$\frac{\sin \alpha_{L1}}{c_{L1}} = \frac{\sin \alpha_{T1}}{c_{T1}} = \frac{\sin \alpha_{L2}}{c_{L2}} = \frac{\sin \alpha_{T2}}{c_{T2}} = \frac{\sin \alpha_R}{c_R}, \quad (1.3)$$

kde  $c_{L1}$  a  $c_{T1}$ , popř.  $c_{L2}$  a  $c_{T2}$  jsou rychlosti šíření podélné a příčné vlny v prostředí 1 popř. 2. Index  $R$  platí pro povrchové (Rayleighovy) vlny.

Při šíření ultrazvukových vln zkoušeným prostředím dochází k útlumu jejich akustického tlaku vlivem rozptylu akustického svazku a pohlcování (absorpce) vln zkoušeným materiálem. Hodnota absorpce roste s frekvencí signálu a dochází při ní k přeměně mechanické energie na tepelnou v důsledku vnitřního tření kmitajících částic. K rozptylu vlnového svazku dochází na mikroskopických rozhraních. Čím více se vlnová délka blíží k rozměru zrn materiálu, tím je útlum větší. Obě složky útlumu tedy rostou s vyšší frekvencí. Schopnost materiálu tlumit ultrazvuk se vyjadřuje pomocí koeficientu útlumu  $\alpha$  v dB/mm. <sup>[10]</sup>

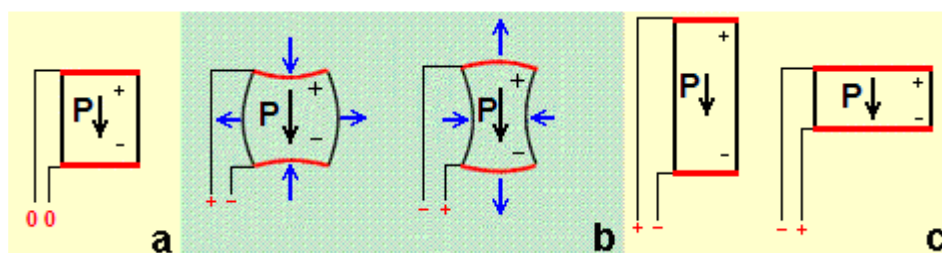
Vlnová délka akustického signálu je přímo úměrná fázové rychlosti šíření vlny a nepřímo úměrná její frekvenci.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.4)$$

Ze vztahu vyplývá, že změna frekvence má za následek změnu vlnové délky signálu, což má významný vliv na citlivost měření, tedy pravděpodobnost odhalení vad menších rozměrů. Citlivost se tedy obecně zvyšuje s vyšší frekvencí, resp. kratší vlnovou délkou. Dalším významným parametrem je rozlišení měření. Rozlišením se rozumí schopnost systému nalézt vady, které jsou blízko sebe uvnitř materiálu, nebo se nalézají poblíž povrchu objektu. Opět obecně platí, že rozlišení roste s rostoucí hodnotou frekvence.

### 1.1.1 Piezoelektrický měnič

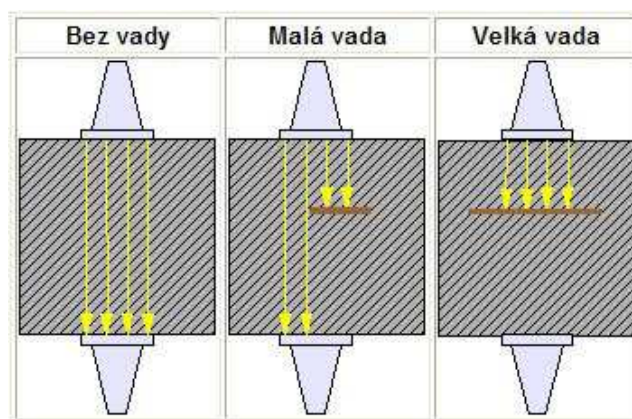
V současné době se používají pouze dva typy elektroakustických měničů, a to měnič piezoelektrický a elektromagnetický. Ve všech aplikacích NDT uvedených v úvodu práce je využíván měnič piezoelektrický, proto jsou dále uvažovány pouze způsoby zkoušení a měniče pracující na principu piezoelektrického jevu. Piezoelektrické měniče jsou dnes vyráběny z PZT keramik, což jsou materiály na bázi tuhých roztoků oxidu olova, titanu, nebo zirkonia dopovanými hořčíkem, lithiem, niobem, antimonem nebo stronciem. Samotná funkce měniče je provázena přímým a nepřímým piezoelektrickým jevem. Přímý piezoelektrický jev vzniká mechanickým namáháním látek s piezoelektrickými vlastnostmi, což vede k deformaci krystalové mřížky a následnému vzniku elektrického náboje  $Q$  na povrchu materiálu. Nepřímého elektrického jevu naopak dosáhneme přivedením náboje na povrch objektu, což má za následek deformaci krystalové mřížky, projevující se změnou jeho tvaru. Piezoelektrický jev je znázorněn na obr. 1.1. <sup>[1]</sup>



Obr. 1.1 a) piezoele. materiál bez vnějšího působení, b) přímý piezoele. jev, c) nepřímý piezoele. jev <sup>[6]</sup>

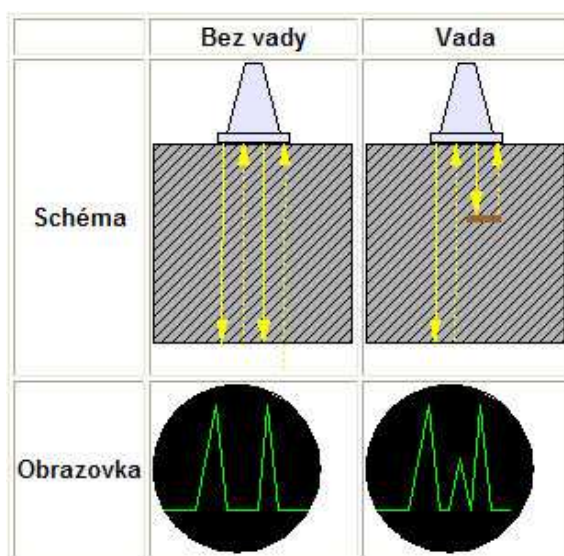
### 1.1.2 Konvenční techniky ultrazvukového zkoušení

Základní ultrazvukové zkušební techniky lze rozdělit na průchodové a odrazové. Princip obou technik je znázorněn pomocí obr. 1.2 a 1.3. Průchodovou technikou měříme pokles akustického tlaku mezi vysílací a snímací sondou, které jsou umístěné v ose na protilehlých stranách zkoušeného objektu.

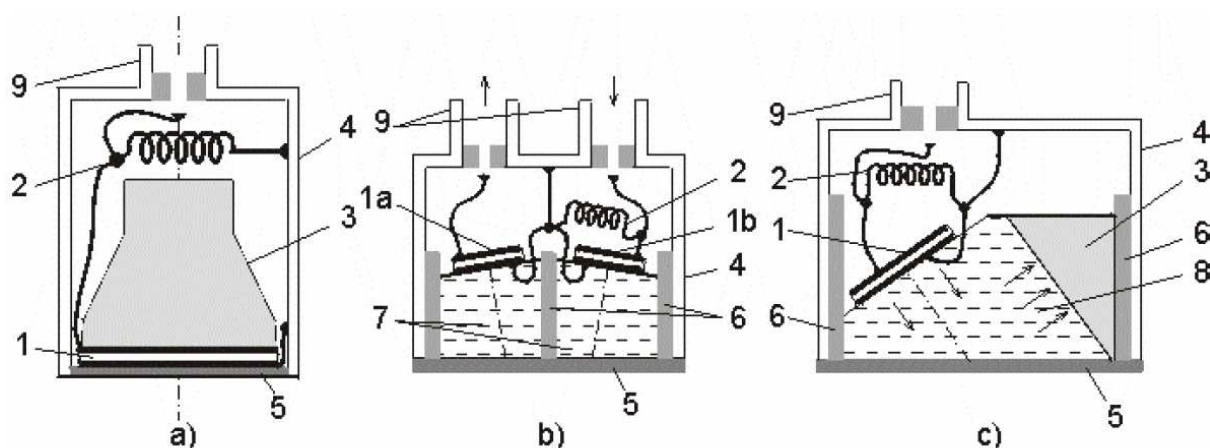
Obr. 1.2 Průchodová technika<sup>[7]</sup>

Abychom zabránili vlivu přirozeného útlumu signálu v materiálu, provádí se toto měření srovnávací metodou, tedy porovnáním hodnot akustického tlaku měřených v místě s vadou a bez vady. Výhodou této techniky je možnost testování materiálů s velkou hodnotou útlumu. Nelze však určit hloubku a velikost vady, před měřením je nutné zajistit přesné umístění protilehlých sond, objekt pro měření srovnávací metodou musí mít rovnoběžné protilehlé povrchy v celé oblasti měření a musí být přístupný z obou stran.

Nejpoužívanější konvenční zkušební technikou je dnes odrazová impulsová technika. Ta umožňuje měření doby průchodu akustického tlaku odražené vlny za pomoci jediné sondy, nebo dalších sond zapojených do měřícího řetězce. Generátor vybudí sondu akusticky navázanou na zkoušené prostředí. Ta vysílá ultrazvukové impulsy, které se odrážejí od vad a povrchu materiálu a šíří se zpět materiálem. Z doby, která uplyne mezi vysláním impulsu a příjmem signálu zpět do sondy, se určuje vzdálenost vady od měniče, a z velikosti amplitudy echa lze usoudit, jakou velikost by detekovaná vada mohla mít. V okamžiku vyslání impulsu se na obrazovce měřícího přístroje objeví vysílací echo. Za dobu, která odpovídá dvojnásobku vzdálenosti od sondy se na obrazovce objeví koncové echo. Jedná se o odraz signálu od protilehlé strany zkoušeného předmětu. Mezi nimi jsou další případná echa, představující indikace vad uvnitř materiálu. <sup>[7],[8]</sup>

Obr. 1.3 Odrázová technika<sup>[7]</sup>

### 1.1.3 Základní typy konvenčních ultrazvukových sond



Obr. 1.4 Ultrazvukové piezoelektrické sondy: a) přímá sonda, b) úhlová sonda, c) dvojitá sonda, 1 – piezoelektrický měnič, 1a – přijímací měnič, 1b – vysílací měnič, 2 – přizpůsobovací cívka, 3 – tlumící cívka, 4 – pouzdro sondy, 5 – ochranná vrstva, 6 – akustická izolace, 7 – předsádka, 8 – lomový klín, 9 – konektor<sup>[1]</sup>

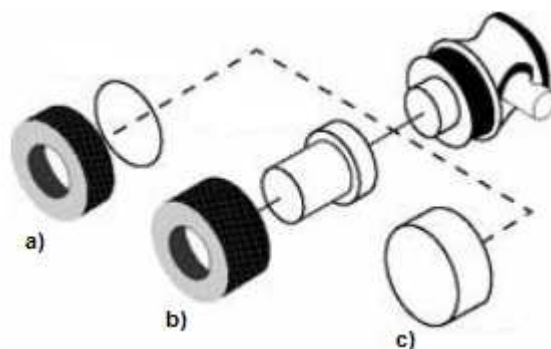
- Přímá sonda

Přímá sonda (obr. 1.4a) je tvořena pouze jedním měničem určeným pro vysílání, nebo příjem akustického signálu, jehož směr je kolmý k povrchu zkoušeného objektu. Jedná se o nejpoužívanější a nejnákladnější typ sondy, který je vhodný zejména k hledání zdvojenin plechů. Přímou sondu však nelze použít k hledání vad kolmých k povrchu objektu a nevhodná je také ke kontrole svarových

spojů. Generátor impulsů přímé sondy je připojen přes oddělovací diody přímo na vstup zesilovače. Následkem toho způsobí dokmitávající vysílací impuls prodloužení počátečního echa, což se projeví vznikem tzv. „mrtvé zóny“. Mrtvá zóna je oblast, ve které není možné pozorovat echo vady. <sup>[1],[10]</sup>

- Přímá sonda s předsádkou

Problém mrtvé zóny je řešen použitím předsádky, která zajistí zpoždění průchodu impulsu mezi sondou a zkoušeným objektem. Díky tomu lze detekovat i těsně podpovrchové vady. Vhodnými materiály pro předsádku jsou například plexisklo či voda. Předsádky z plexiskla mají výhodu snadné demontáže a výměny například za předsádku s ochrannou vrstvou pro zkoušení objektů s hrubým povrchem nebo povrchem o vysoké teplotě. <sup>[1]</sup>



Obr. 1.5 Sonda s předsádkou, a),c) ochranné předsádky, b) zpozd'ovací předsádka <sup>[12]</sup>

- Úhlová sonda

Úhlové sondy (obr. 1.4b) obsahují lomový plexisklový klín, který tvoří akustické rozhraní mezi měničem a zkoušeným povrchem. Použití lomového klínu však vede k transformaci podélných vln na příčné. Tyto vlny se vyznačují rozdílnými rychlostmi šíření, proto je nutné zamezit současnému šíření obou typů vln. U běžných úhlových sond je obvykle vyžadováno, aby byly pouze zdrojem vln příčných. To je možné zajistit vhodnou volbou úhlu lomu sondy, tedy úhlu, nacházejícím se mezi tzv. prvním a druhým kritickým úhlem. Více o problematice kritických úhlů lze nalézt např. v literatuře [1], [10], nebo jiné, zabývající se podrobněji teorií ultrazvukového zkoušení.



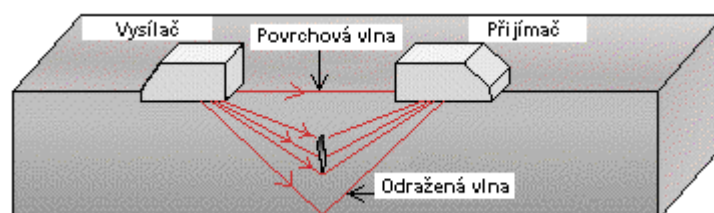
- Dvojitá sonda

Výše popsané základní typy sond lze konstrukčně modifikovat na sondy dvojité. Tento typ sondy má v jednom pouzdře umístěny dva nezávislé akusticky izolované měniče, z nichž jeden slouží výlučně jako vysílač a druhý jako přijímač. Výhodou tohoto uspořádání je téměř nulová mrtvá zóna, protože oba měniče jsou již přilepeny na plastové předsádce. Citlivost měření je dána vzájemným sklonem měničů. Maxima citlivosti lze dosáhnout v průsečíku os akustických svazků. Typické uspořádání dvojité sondy je znázorněno na obr. 1.4c. <sup>[1],[10]</sup>

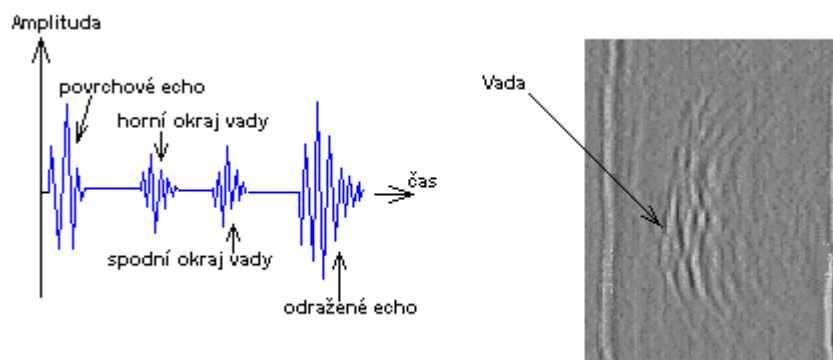
#### 1.1.4 Speciální techniky ultrazvukového zkoušení

- Technika TOFD

Technika TOFD (Time of Flight Diffraction Technique) se převážně využívá ke kontrole svarů, přičemž samotná kontrola probíhá pomocí dvou úhlových sond. Sondy, z nich jedna slouží jako vysílač a druhá jako přijímač, musí být pevně spojeny, aby mezi nimi byla stále zachována konstantní vzdálenost. Princip metody (obr. 1.6) je založen na difrakci (ohybu) vyslané ultrazvukové vlny na okrajích vady. Jako první je přijímací sondou detekována povrchová vlna, poté difrakční vlny od horního a následně spodního okraje vady a nakonec odražená vlna od protilehlého povrchu objektu. Z rozdílných dob snímání rozptýlených vln od spodního a horního okraje vady lze určit její hloubku a vertikální rozměr. Ukázky zobrazení signálu technikou TOFD jsou na obr. 1.7. <sup>[8]</sup>



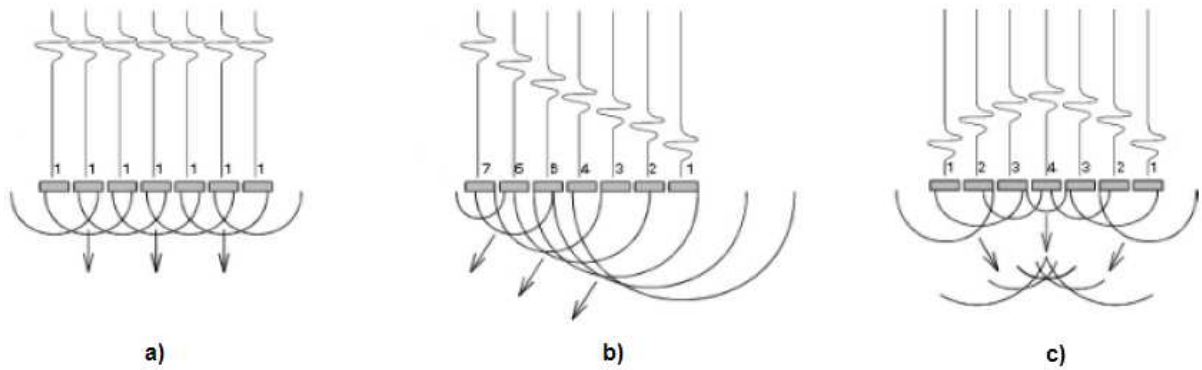
Obr. 1.6 Princip techniky TOFD <sup>[13]</sup>



Obr. 1.7 Ukázky zobrazení - vlevo a-scan, vpravo obdoba b-scanu<sup>[13]</sup>

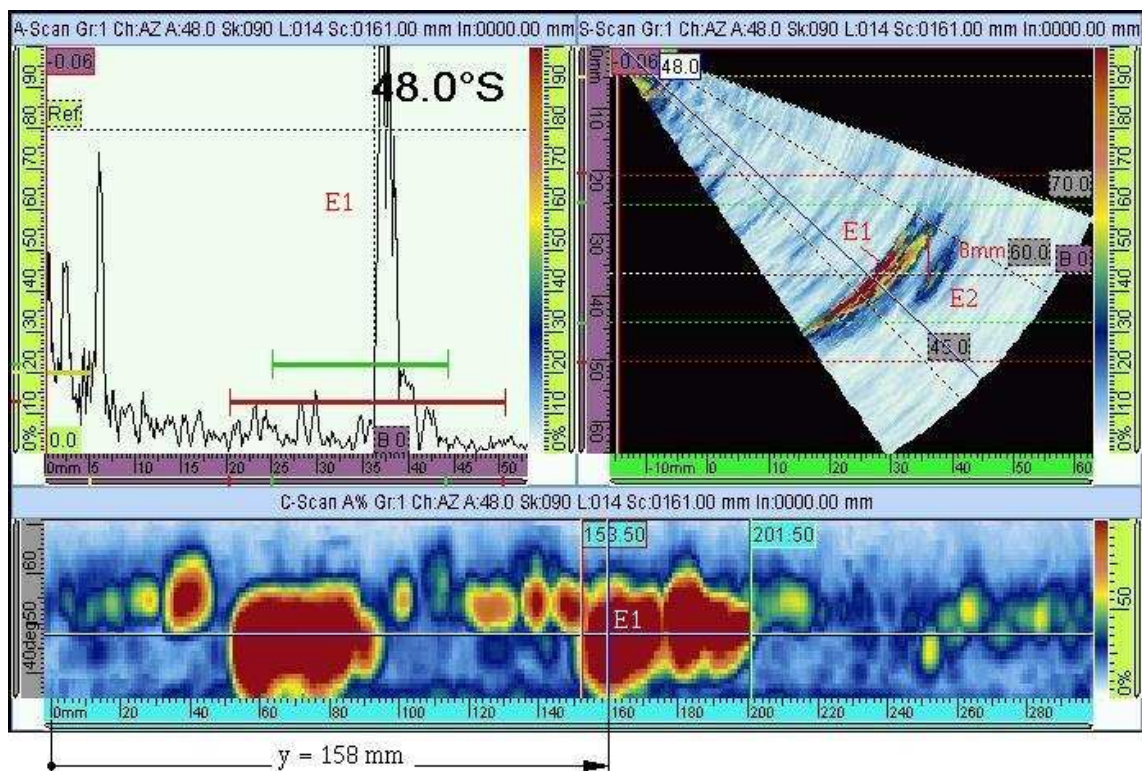
- Technika „Phased array“

Základem metody je sonda složená z 8 až 128 nezávislých elektroakustických měničů. Každý z těchto měničů je buzen vlastním generátorem a echa přijatá měniči jsou také zesilována v samostatných zesilovačích. V technice „Phased array“ je uplatňován tzv. Huygensův princip, který říká, že se z každého elementu vlnění šíří kulová vlna, a složením těchto jednotlivých vln vzniká tzv. čelo vlny výsledné. Pokud přivedeme impulsy na všechny elementy ve stejném okamžiku, dojde k šíření vlny v kolmém směru k povrchu zkoušeného objektu. Princip je v tomto případě stejný jako u klasické sondy. Jiná situace nastane, dojde-li k časovému řízení vysílaných impulsů. Zpožděním impulsů je možné dosáhnout naklonění výsledné vlny do požadovaného úhlu, případně lze výsledný svazek fokusovat s požadovanou ohniskovou vzdáleností. Základní možnosti techniky „Phased array“ jsou znázorněny na obr. 1.8. Velkou výhodou této techniky je možnost detekce náhodně orientovaných vad v různých hloubkách materiálu z jednoho místa a za použití jediné sondy, zlepšení poměru signál/šum a schopnost lépe rozpoznat malé trhliny u tvarově složitějších objektů. <sup>[8],[10]</sup>



Obr. 1.8 Princip zpoždování impulsů, a) bez zpoždění, b) zpoždění, c) fokusace  
Čísla znázorňují pořadí sepnutí měniče<sup>[8]</sup>

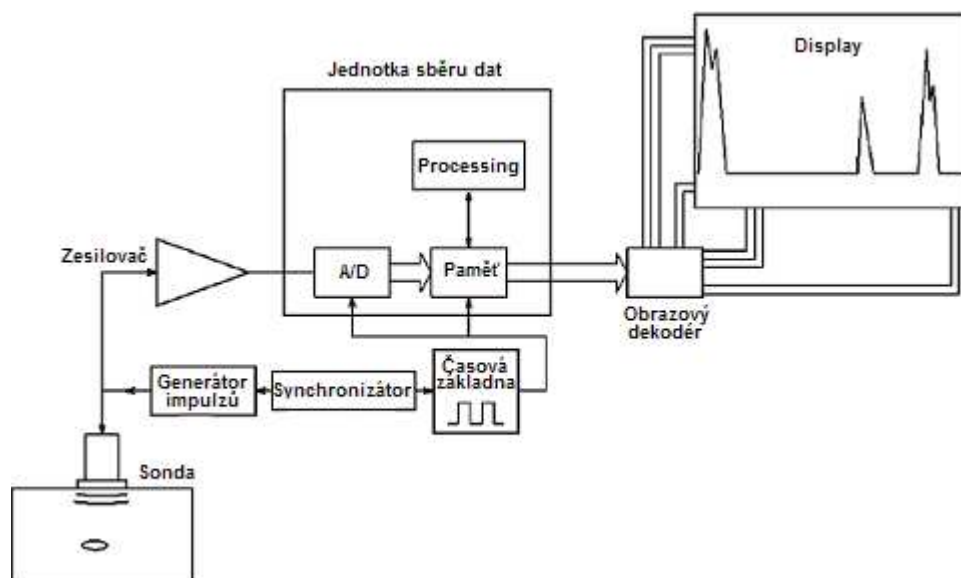
Při zkoušení technikou „Phased array“ je měřicími přístroji zobrazován nejčastěji tzv. sektorový scan. Výhodné je však používání více typů zobrazení současně. Nejčastěji se jedná o kombinaci a-scanu, c-scanu a s-scanu. Výhodnost současného použití více zobrazení lze demonstrovat na obr. 1.9. A-scan zobrazuje pouze echa  $y=158$  zaznamenaná svazkem  $48^\circ$ . Echo E2 není v a-scanu vidět, protože leží mimo tento úhel, a není vidět ani v c-scanu, protože je zakryto daleko větším echem E1. Popis jednotlivých druhů scanů je proveden blíže v kapitole 1.1.5.  
[14]



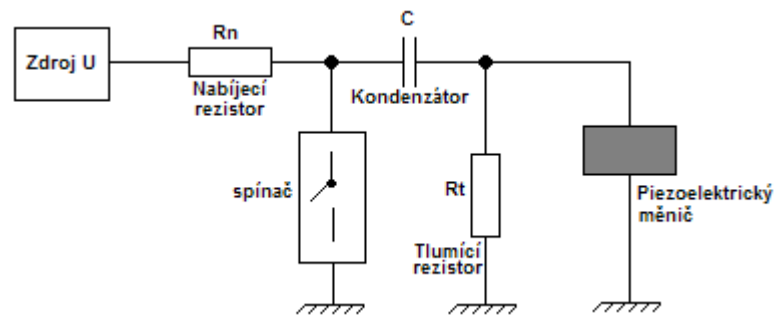
Obr. 1.9 Způsoby zobrazení „Phased array“ při šikmém prozvučování<sup>[14]</sup>

### 1.1.5 Ultrazvukové měřicí přístroje

Téměř všechny dnes používané ultrazvukové měřicí přístroje jsou schopny zpracovávat data získaná odrazovou i průchodovou technikou. Použitím odrazové techniky získáváme dvě informace. První informací je vzdálenost měniče od vady vyjádřená časem mezi vysláním impulsu a přijetím odraženého echa. Druhou informací je velikost amplitudy odraženého vlnění, tedy výška echa. Tato získaná data je možné vzhledem k jejich charakteru zobrazovat na obrazovce přístroje v závislosti na čase. Jedná se o tzv. a-scan. Typické složení měřicího řetězce je blokově znázorněno na obr. 1.10. Generátor impulsů (obr.1.11) vysílá napěťové impulsy do akustického měniče sondy. Zde se impulsy mění na akustické vlny, které se dále šíří zkoušeným materiálem. K tomu, aby bylo možné odražená echa dále zpracovávat, je nutné pomocí zesilovače zesílit jejich amplitudu. Signál je dále třeba převést do digitální formy pomocí A/D převodníku. Analogově číslicový převodník pracuje s frekvencí i více než 100 MHz, aby nedocházelo ke zkreslení vzorkovacího signálu. Vzorky signálu se dočasně uloží do paměti. Obvod synchronizace zajišťuje, aby vyslání impulsu do materiálu, spuštění časové základny přístroje a start A/D převodu proběhlo ve stejný okamžik. <sup>[10]</sup>



Obr. 1.10 Blokové schéma ultrazvukového měřicího systému <sup>[10]</sup>

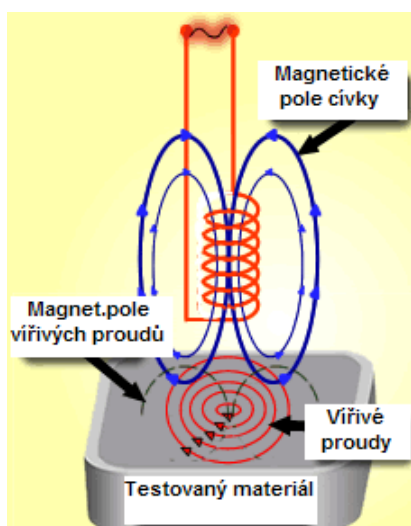


Obr. 1.11 Generátor impulsů

Vyšší třídy dnes používaných přístrojů umožňují, kromě výše popsaného a-scanu, i další způsoby projekce vad. Velmi využívané jsou například b-scany, poskytující přehledné zobrazení necelistvostí v průřezu zkoušeného objektu, a také tzv. c-scany, které umožňují zobrazení plošné mapy vad ve zvolené hloubce materiálu. Existuje ještě několik dalších způsobů zobrazení. Jedná se však jen o různé modifikace těchto základních, a v praxi nebývají příliš využívány.

## 1.2 Zkoušení vířivými proudy

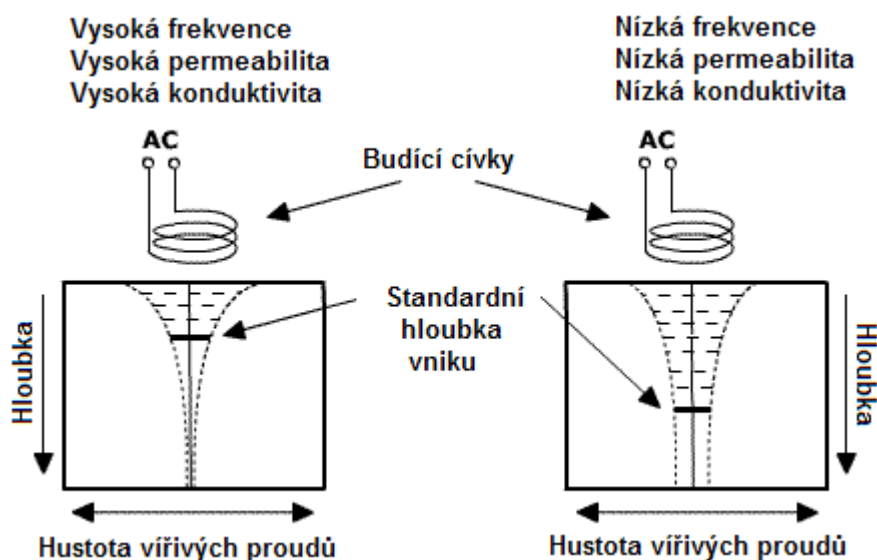
Metoda vířivých proudů patří spolu s metodou ultrazvukovou mezi nepoužívanější NDT metody. Jedná se o metodu použitelnou pro řadu aplikací. S její pomocí je například možné, kromě základní indikace nespojitosti materiálu, měřit tloušťku kovů, resp. jejich ztenčení způsobené mechanickými vlivy nebo korozivními účinky okolí, a určovat magnetickou permeabilitu či elektrickou vodivost materiálu. Princip metody (obr. 1.12) je fyzikálně velmi jednoduchý. Střídavý proud procházející cívkou, v tomto případě budící sondou, vytváří kolem této cívky magnetické pole. Takto vzniklé magnetické pole generuje vířivé proudy uvnitř testovaného materiálu. Vířivé proudy následně produkují své vlastní (sekundární) magnetické pole. Toto magnetické pole indukuje elektrický proud do vinutí cívky, čímž dochází ke změnám její impedance. Projev trhliny nebo jiné vady ve struktuře zkoušeného objektu lze tedy přirovnat ke změně vodivosti materiálu, protože vlivem této vady dochází k přerušení části vířivých proudů, což se projeví stejně, jako kdyby měl materiál v tomto místě menší vodivost.

Obr. 1.12 Princip metody vířivých proudů <sup>[5]</sup>

Protože je magnetické pole vyvoláno střídavou veličinou, je výše popsán princip provázen povrchovým jevem, nebo-li skin efektem. Ten se projevuje současným poklesem hustoty vířivých proudů s hloubkou vniku, a to v exponenciální závislosti. Hloubka vniku elektromagnetického pole je tedy pro optimalizaci měření významným parametrem. Hloubka vniku, ve které se hustota proudů sníží na 1/e nebo na přibližně 37%, se nazývá standardní hloubkou vniku a značí se  $\delta$ . <sup>[3]</sup>

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\mu_r\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f\mu_0\mu_r\sigma}} = \frac{503,3}{\sqrt{f\mu_r\sigma}} \quad [10] \quad (1.5)$$

Z výše uvedeného vztahu je zřejmé, že hloubka vniku elektromagnetického pole nepřímo závisí nejen na konduktivitě a permeabilitě materiálu, ale zejména na frekvenci budícího proudu cívky, protože tu jedinou lze v konkrétní aplikaci ovlivnit. Parametry ovlivňující hloubku vniku vířivých proudů jsou znázorněny pomocí obr. 1.13. V případě potřeby detekce vad hlouběji pod povrchem objektu je tedy třeba pracovat s nižší frekvencí budícího proudu. Snížením frekvence však zároveň způsobíme nežádoucí snížení hustoty vířivých proudů, což má za následek celkové snížení citlivosti metody. Z tohoto důvodu je použití metody omezeno na detekci povrchových a blízko povrchových vad. Dalšími nevýhodami metody jsou nemožnost detekce vad, které jsou orientovány rovnoběžně k magnetickému toku, potřeba nastavení měřící soustavy pomocí etalonu a omezení pouze na vodivé materiály. Výhodou je naopak možnost zkoušení bez přímého kontaktu mezi sondou a materiálem, což umožňuje zkoušet i tvarově složitější a hůře přístupné povrchy. <sup>[4]</sup>

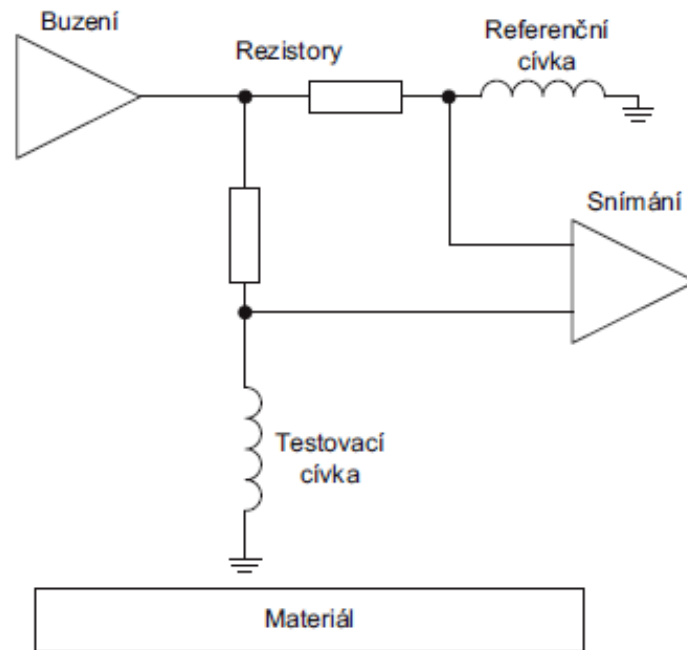
Obr. 1.13 Hloubka vniku pole do vodivého materiálu <sup>[3]</sup>

### 1.2.1 Sondy vířivých proudů

Všechny sondy vířivých proudů obecně pracují na principu popsaném v předchozí části práce. Existuje však více možností jejich provedení. Podle způsobu vnitřního uspořádání lze sondy rozdělit na absolutní a diferenční. Podle tvaru dělíme sondy na průchozí a příložné. Průchozí sondy pak dále na vnitřní a vnější. V případě vnějších průchozích sond prochází zkoušený materiál přímo středem cívky. Vnitřní průchozí sonda naopak slouží ke kontrole objektů, které není možné zkoušet z vnější strany. Typickým příkladem jsou v tomto případě teplosměnné trubky tepelných výměníků. Příložné sondy jsou nejčastěji používány ke zkoušení rovinných a nepravidelných objektů.

- Sonda absolutní

Absolutní snímače patří konstrukčně k těm nejjednodušším. Mají pouze jedinou cívku, která plní zároveň funkci vysílače i přijímače. Princip absolutního snímání (obr. 1.14) přesně odpovídá obecnému popisu metody v úvodu kapitoly. Vířivé proudy procházející materiálem působí svým magnetickým účinkem zpětně na budící magnetické pole, čímž je ovlivněna induktivní reaktance budící cívky. Měřením absolutní změny impedance cívky tak přímo získáme informaci o stavu měřeného objektu.

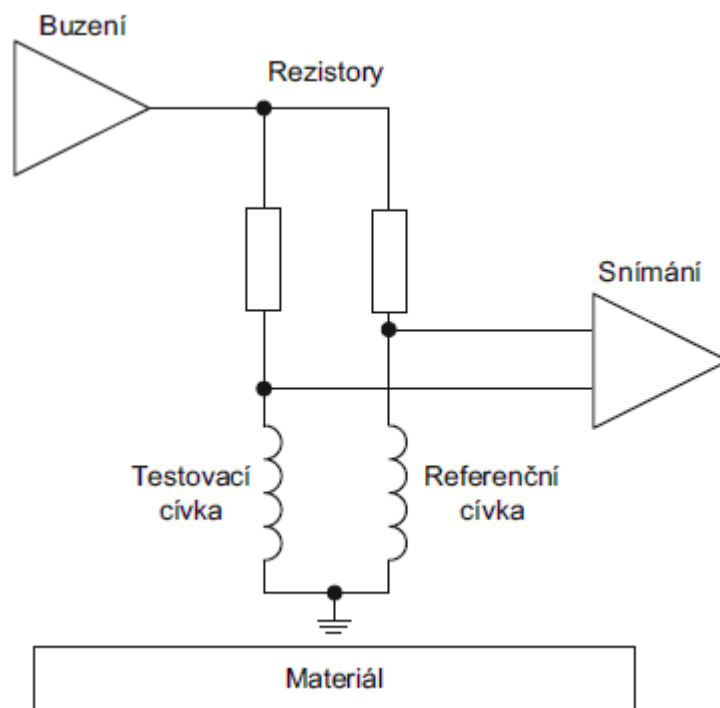


Obr. 1.14 Schéma zapojení absolutní sondy<sup>[11]</sup>

- Sonda diferenční

Základ diferenční sondy tvoří dvě aktivní cívky a systém porovnávající rozdíl jejich signálů (obr. 1.15). Pokud se jedna z cívek dostane do oblasti defektu, vznikne rozdílová impedance, resp. nenulový diferenční signál. Diferenční sondy jsou na rozdíl od absolutních méně ovlivňovány změnou vzdálenosti od testovaného objektu. Určitý problém s interpretací výsledného signálu může nastat v případě, kdy je vada delší než vzdálenost mezi cívkami. V tomto případě lze spolehlivě detekovat pouze okraje vady, protože při pohybu cívek nad stejným prostředím bude rozdílový signál nulový.<sup>[2]</sup>



Obr. 1.15 Schéma zapojení diferenční sondy<sup>[11]</sup>

### 1.2.2 Nežádoucí jevy snímačů

Při zkoušení vířivými proudy je třeba počítat s několika nepříjemnými faktory, které negativně ovlivňují citlivost metody. Pohyb (vibrace) zkoušeného objektu vůči průchozí sondě a najíždění, či vyjíždění sondy do a z objektu vedou ke vzniku rušivého signálu průchozích snímačů.

Citlivost příložných snímačů je ovlivněna tzv. efektem oddálení a efektem krajovým.

- Chyba ddálení (lift-off)

Zejména u malých sond dochází vlivem změn jejich vzdálenosti od povrchu zkoušeného objektu ke vzniku rušivého signálu, což přímo vede k poklesu citlivosti. Tento nežádoucí efekt lze eliminovat použitím sondy s přitlačnou pružinou.

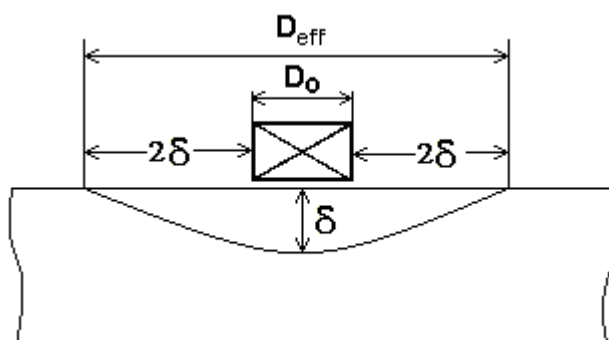
- Krajová chyba (edge)

Projevuje se vznikem rušivého signálu na okraji měřeného objektu. Možností omezení tohoto efektu je několik. První je stínění sondy pouzdem z neferomagnetického vodivého materiálu. Dále je možné volit cívku menších rozměrů nebo kmitočet o vyšší frekvenci. Změna frekvence však, jak již bylo

uvedeno, přímo souvisí se změnou parametrů měření, proto není možné toto opatření aplikovat ve všech případech. <sup>[9]</sup>

Hranice šíření vířivých proudů příložných snímačů v materiálu je dána tzv. stranovým průměrem oblasti  $D_{eff}$  (obr. 1.16). Jedná se o oblast, která ještě přispívá k signálu.

$$D_{eff} = D_0 + 4\delta \quad [9] \quad (1.6)$$

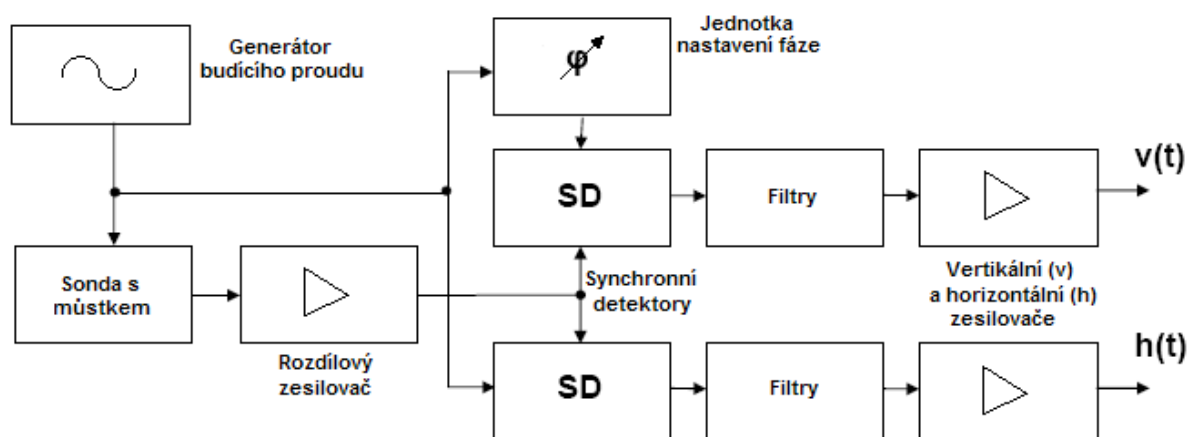


Obr. 1.16 Objem materiálu vybuzený vířivými proudy <sup>[9]</sup>

Obecně lze říci, že s rostoucí frekvencí a zmenšujícím se průměrem cívky roste citlivost a rozlišovací schopnost pro povrchové vady. Při klesající frekvenci s velkým průměrem cívky je tomu přesně naopak. Zvyšuje se ale hloubka, do které jsou vířivé proudy schopny pronikat.

### 1.2.3 Měřicí přístroje vířivých proudů

Výstupem ze snímače vířivých proudů je napětí, resp. jeho změna závislá na intenzitě proudů vytvořených magnetickým polem budící cívky. Účelem elektronické části měřícího zařízení je vybrat z tohoto napětí informace, které jsou pro měření důležité a naopak eliminovat, nebo pokud možno úplně odstranit složky signálu, které jsou nedůležité nebo proces měření ruší. Na obrázku 1.17 je blokově znázorněno typické složení měřícího systému vířivých proudů.



Obr. 1.17 Blokové schéma měřícího systému vířivých proudů

Moderní přístroje pro měření vířivých proudů obsahují kromě základních blokově znázorněných funkcí i celou řadu dalších pomocných systémů. Dnešní generátory budícího proudu umožňují současné použití více frekvenčních kanálů, tzv. multiplex, se snadným nastavením amplitudy i fáze těchto signálů z připojeného PC. K propojení zařízení s ovládacím systémem a programem pro sběr dat bývá běžně používána rychlá ethernetová linka. Integrovaný A/D převodník a vysoké zesílení analogového signálu pomocí rozdílového zesilovače maximalizují citlivost a rozlišovací schopnost zkoušení. Jednotka nastavení fáze umožňuje vzájemné natočení obou složek napětí o určitý fázový úhel. To se projeví na zobrazení signálu tak, jako by se osy komplexní roviny natáčely. Pomocí nastavení fáze tak lze nastavit složku napětí do úhlu, ve kterém nebude identifikována jako vada. K potlačení rušivých složek signálů jako např. lift-off efektu, bývají přístroje opatřeny digitálními filtry pracujícími jako horní, dolní i pásmové propusti. <sup>[10],[17]</sup>

## 2 Experimentální měření

Za účelem prokázání vhodnosti popisovaných metod k nalezení předem definovaných vad byla použita měření provedená v rámci kvalifikace ultrazvukové metody a metody vířivých proudů pro nedestruktivní zkoušení svorníků M 140x6 hlavního přírubového spoje víka s tělesem tlakové nádoby reaktoru (dále TNR) VVER 440. Společnost ŠKODA JS a.s., odbor Provozní prohlídky, provádí automatizované provozní kontroly prvků spojovacího uzlu tlakových nádob reaktorů VVER 440 od roku 1982. Kontroly svorníků M 140x6 se prováděly nejprve systémem AMAŠ, od roku 1992 systémem KOMAŠ a od roku 2006 systémem KOMAŠ II.

Ultrazvuková metoda je aplikována z vnitřního povrchu vývrtu svorníku a metoda vířivých proudů z vnějšího povrchu, tedy z povrchu závitu a dříku.

## 2.1 Popis zkoušeného objektu

Uzel hlavního přírubového spoje tlakové nádoby zajišťuje těsnost tlakové nádoby reaktoru ve všech provozních režimech. Sférické víko dosedá na přírubu tělesa tlakové nádoby. Utěsnění místa styku přírub víka a tělesa je provedeno pomocí profilového těsnění z niklového prutu. Víko je k přírubě přitlačováno celkem 60 kusy svorníků M 140x6 pomocí volné příruby.

Svorníky M 140x6 hlavního přírubového spoje tlakové nádoby reaktoru typu VVER 440 jsou vyrobeny z chrommolybdenvanadové oceli 25Ch1MF (první čtyři komplety TNR typu V-213/Č) nebo z chromnikmolybdenvanadové oceli 38ChN3MFA (od pátého kompletu TNR typu V-213/Č) s vysokou úrovní mechanických vlastností. Označení obou ocelí je podle normy GOST. Oceli 25Ch1MF a 38ChN3MFA jsou jemnozrnné a z hlediska ultrazvukového zkoušení mají prakticky stejné akustické vlastnosti – zejména útlum a rychlost šíření ultrazvukových vln.

Kvalifikační svorník M 140x6 byl navržen tak, aby reprezentoval reálný svorník. Výroba umělých realistických necelistvostí byla provedena elektroerozivním obráběním v Nástrojárně Semily. V patě druhého závitu horní a spodní závitové části a v horní části hladké části dříku kvalifikačního bloku svorníku jsou elektroerozivním obráběním vytvořeny drážky představující povrchové trhliny. Drážky mají semieliptický tvar s různou výškou (TWE) a délkou, dále jsou zde vytvořeny drážky představující trhliny konstantní výšky (TWE) postihující cca 14 % obvodu, a úsečové drážky představující hypotetické trhliny s velmi pozvolným náběhem. Rozměry a umístění umělých realistických necelistvostí (drážek) ve svorníku M 140x6 je uvedeno v Tab. 1 a 2. Výkres kvalifikačního svorníku je součástí přílohy diplomové práce.<sup>[16]</sup>

Označení	Umístění	Typ	x [mm]	y [°]	y [mm]	h [mm]	l [mm]
C1	Z	S	(444,0)	0	0,0	1,0	8,0
C2	Z	S	(444,0)	90	101,0	2,0	10,0
C3	Z	S	(444,0)	180	201,0	4,2	16,0
C4	Z	S	(444,0)	270	302,0	5,0	20,0
C5	Z	S	(444,0)	315	352,0	5,0	20,0
C6	D	S	485,0	0	0,0	(1,0)	(8,0)
C7	D	S	485,0	90	101,0	(2,0)	(10,0)
C8	D	O	485,0	180	201,0	2,3	60,0
C9	D	U	485,0	270	302,0	3,8	(45,0)
C10	D	S	521,0	90	101,0	2,0	10,0
C11	D	O	521,0	180	201,0	1,5	60,0
C12	Z	U	(1586,0)	132	147,0	4,2	(46,0)
C13	Z	O	(1586,0)	312	348,0	2,6	60,0

Tab.1 Umělé necelistvosti ve svorníku M 140x6<sup>[16]</sup>

Legenda		
Označení		Číselné označení umělé realistické necelistvosti.
Umístění		Umístění (lokalizace) umělé realistické necelistvosti. Z – Necelistvost v patě závitu. D – Necelistvost na povrchu hladké části dřívku.
Typ		Typ (tvar) umělé realistické necelistvosti. S – Necelistvost semieliptického tvaru. O – Necelistvost konstantní výšky (hloubky). U – Necelistvost ve tvaru kruhové úseče.
x	[mm]	Souřadnice „x“ se odečítá na vnějším povrchu svorníku ve směru jeho podélné osy od hrany horního čela svorníku (závit M 130x6) směrem k čelu dolnímu (závit M 140x6 nebo M 150x6).
y	[mm]	Souřadnice „y“ se odečítá po obvodu na vnějším povrchu svorníku od zvoleného počátku ve směru hodinových ručiček při pohledu na horní čelo svorníku (kladný směr); počátek se volí podle požadavků na zkoušení metodou vířivých proudů (ET).
h	[mm]	Výška (TWE) necelistvosti odečítaná od paty závitu či povrchu hladké části dřívku.
l	[mm]	Délka necelistvosti.

Tab.2 Legenda k Tab. 1<sup>[16]</sup>

## 2.2 Zkušební systém

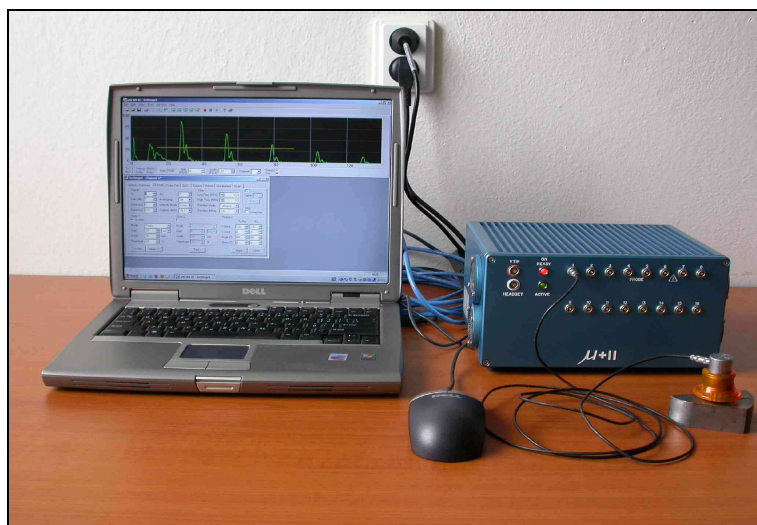
Zkušební systém pro kontrolu vnitřního objemu materiálu, povrchu závitu a dříku se skládá z následujících prvků:

- Manipulátor KOMAŠ II (samostatně popsán v kapitole věnované automatizovaným postupům zkoušení)
- Přístroj vířivých proudů MultiScan MS 5800 s počítačem pro sběr a zpracování dat (výrobce OLYMPUS - USA)



Obr. 2.1 MultiScan MS 5800<sup>[17]</sup>

- Ultrazukový přístroj MICROPLUS II s počítačem pro sběr a zpracování dat (výrobce AEA Technology Energy – UK)



Obr. 2.2 MICROPLUS II<sup>[16]</sup>

## 2.3 Zkoušení ultrazvukem

Zkoušení ultrazvukem se provádí odrazovou impulsovou technikou. Použity byly konvenční úhlové sondy příčných vln s jmenovitým úhlem lomu  $45^\circ$  a stoupáním 6 mm zabudované v tyči, která je zasunuta do středového vývrtu svorníku. Toto stoupání odpovídá stoupání závitů svorníku, rotujícího kolem své podélné osy. Zvolena byla kontaktní akustická vazba a jako kontaktní materiál voda s inhibitorem koroze. Pracovní frekvence 4,0 MHz byla zvolena s ohledem na:

- dosažitelnou citlivost (s vyšší frekvencí roste akustický tlak, což přímo vede ke zlepšení citlivosti)
- útlum ultrazvukových vln (nežádoucí snížení akustického tlaku omezuje citlivost zkoušky)
- vlnovou délku (vlna se odrazí pouze od necelistvosti s poloměrem kolmým na směr šíření vlny větším než  $\lambda/2$ , kde je  $\lambda$  je délka vlny)
- šířku svazku vln (vyšší frekvence znamená užší svazek vln při stejném rozměru měniče)

Po optimalizaci nastavení přístrojů a pracovního postupu bylo pomocí ultrazvukové metody zkoušení dosaženo následujících výsledků:

Číslo	x	y	z	Úhel	Směr	Dn	Lx	Ly	Lz	Typ	Prot	Označení
0001/1	485	0	44	45	+x	1,8	-	6,0	1,0	D	ano	C6
				45	-x	2,0						
0001/2	485	100	47	45	+x	2,5	-	6,0	1,5	D	ano	C7
				45	-x	2,9						
0001/2	485	200	46	45	+x	4,1	-	61,0	2,1	D	ano	C8
				45	-x	4,0						
0001/3	485	300	45	45	+x	4,4	-	41,0	2,6	D	ano	C9
				45	-x	5,2						
0001/2	520	100	46	45	+x	3,1	-	10,0	1,6	D	ano	C10
				45	-x	3,2						
0001/2	520	200	46	45	+x	4,4	-	61,0	2,1	D	ano	C11
				45	-x	3,4						

Tab.3 Nalezené necelistvosti ve svorníku M 140x6<sup>[16]</sup>

Legenda		
Číslo		Číslo skenu
x	[mm]	Souřadnice geometrického středu indikace necelistvosti „x“ ve zvoleném souřadnicovém systému, odečítaná na vnějším povrchu svorníku ve směru jeho podélné osy od hrany horního čela směrem k čelu dolnímu.
y	[mm]	Souřadnice geometrického středu indikace necelistvosti „y“ ve zvoleném souřadnicovém systému, odečítaná po obvodu na vnějším povrchu svorníku od určeného počátku ve směru pohybu hodinových ručiček při pohledu na horní čelo svorníku (kladný směr).
z	[mm]	Souřadnice geometrického středu indikace necelistvosti „z“ ve zvoleném souřadnicovém systému, (hloubka) se odečítá od povrchu středového vývrtu svorníku.
Úhel	[°]	Jmenovitý úhel lomu ultrazvukové sondy.
Směr		Směr prozvučování ve zvoleném souřadnicovém systému.
Dn	[mm]	Náhradní velikost podle ČSN 015022.
Lx	[mm]	Pravděpodobný rozměr indikované necelistvosti ve směru osy „x“.
Ly	[mm]	Pravděpodobný rozměr indikované necelistvosti ve směru osy „y“.
Lz	[mm]	Pravděpodobný rozměr indikované necelistvosti ve směru osy „z“.
Typ		Pravděpodobný typ necelistvosti. D ... povrchová necelistvost na hladké části dřívku svorníku.
Prot		Údaj, zda indikace necelistvosti je nebo není protáhlá.
Označení		Označení umělé necelistvosti podle Tab.1

Tab.4 Legenda k Tab. 3<sup>[16]</sup>

Porovnání výsledků získaných při zkoušení svorníku M 140x6 se skutečnými rozměry umělých necelistvostí je uvedeno v následujících tabulkách. Tabelovány jsou výšky (TWE) necelistvostí (Tab. 5), délky necelistvostí (Tab. 6) a polohy necelistvostí (Tab. 7 a 8). Společné vysvětlivky ke všem výše zmíněným tabulkám jsou uvedeny v Tab. 9.

Označení necelistvosti	Skutečná hodnota	Cíl	Praktická zkouška	
			Naměřená hodnota	Rozdíl
C6	1,0	± 2,0	1,0	± 0,0
C7	2,0	± 2,0	1,5	- 0,5
C8	2,3	± 2,0	2,1	- 0,2
C9	3,8	± 2,0	2,6	- 1,2
C10	2,0	± 2,0	1,6	- 0,4
C11	1,5	± 2,0	2,1	+ 0,6

Tab.5 Výška (TWE) necelistvostí<sup>[16]</sup>



Označení necelistvosti	Skutečná hodnota	Cíl	Praktická zkouška	
			Naměřená hodnota	Rozdíl
C6	8,0	$\pm 7,0$	6,0	- 2,0
C7	10,0	$\pm 7,0$	6,0	- 4,0
C8	60,0	$\pm 7,0$	61,0	+ 1,0
C9	45,0	$\pm 7,0$	41,0	- 4,0
C10	10,0	$\pm 7,0$	10,0	$\pm 0,0$
C11	60,0	$\pm 7,0$	61,0	+ 1,0

Tab.6 Délka necelistvostí<sup>[16]</sup>

Označení necelistvosti	Skutečná hodnota	Cíl	Praktická zkouška	
			Naměřená hodnota	Rozdíl
C6	485,0	$\pm 10,0$	485,0	$\pm 0,0$
C7	485,0	$\pm 10,0$	485,0	$\pm 0,0$
C8	485,0	$\pm 10,0$	485,0	$\pm 0,0$
C9	485,0	$\pm 10,0$	485,0	$\pm 0,0$
C10	521,0	$\pm 10,0$	520,0	- 1,0
C11	521,0	$\pm 10,0$	520,0	- 1,0

Tab.7 Poloha necelistvostí – souřadnice „x“<sup>[16]</sup>

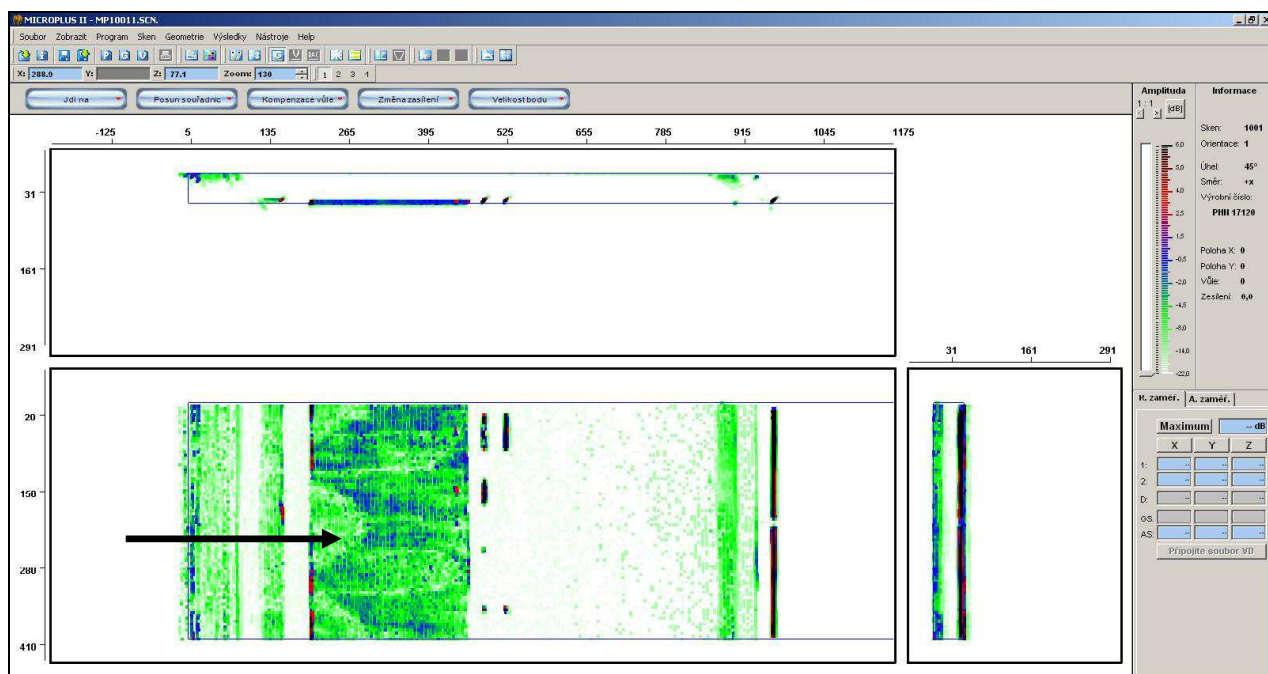
Označení necelistvosti	Skutečná hodnota	Cíl	Praktická zkouška	
			Naměřená hodnota	Rozdíl
C6	0,0	---	0,0	$\pm 0,0$
C7	101,0	---	100,0	- 1,0
C8	201,0	---	200,0	- 1,0
C9	302,0	---	300,0	- 2,0
C10	101,0	---	100,0	- 1,0
C11	201,0	---	200,0	- 1,0

Tab.8 Poloha necelistvostí – souřadnice „y“<sup>[16]</sup>

<b>Označení necelistvosti</b>	Označení umělé necelistvosti.
<b>Skutečná hodnota</b>	Skutečná hodnota parametru necelistvosti [mm].
<b>Cíl</b>	Maximální dovolená chyba stanovení hodnoty parametru necelistvosti [mm].
<b>Naměřená hodnota</b>	Naměřená (vypočtená) hodnota parametru necelistvosti [mm].
<b>Rozdíl</b>	Rozdíl naměřené (vypočtené) a skutečné hodnoty parametru necelistvosti (chyba stanovení hodnoty parametru necelistvosti) [mm].

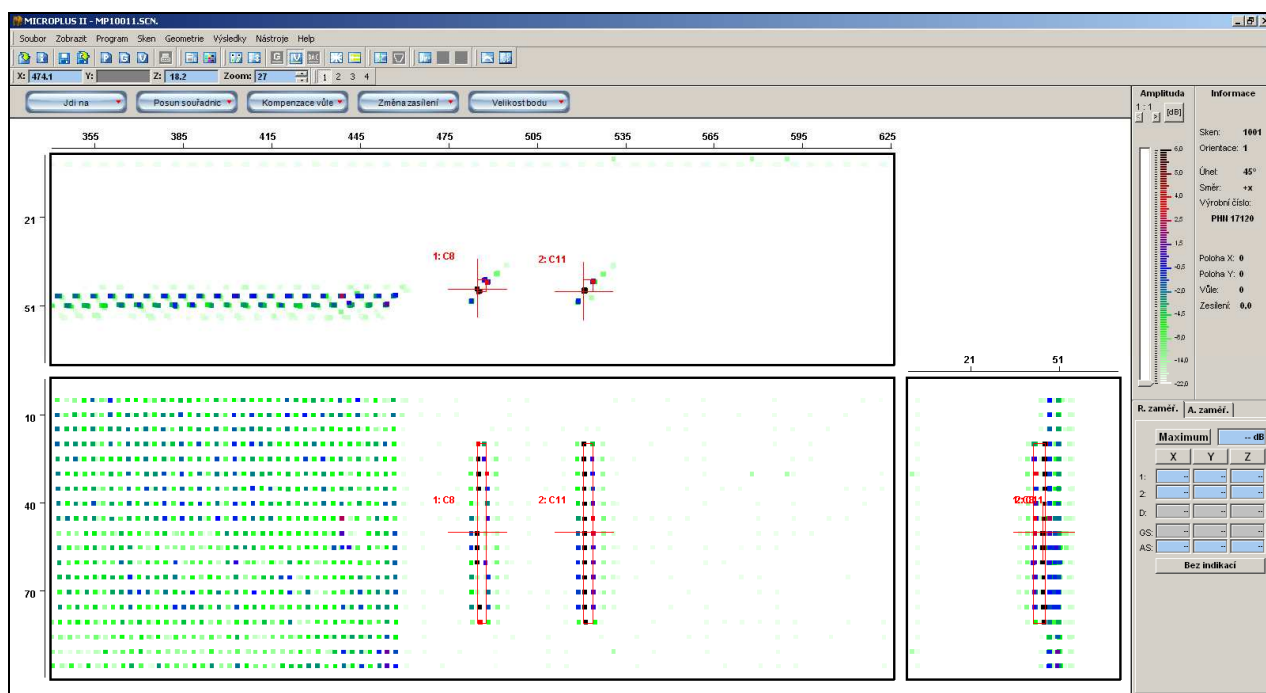
Tab.9 Legenda k Tab.5-8<sup>[16]</sup>

Příklad grafického zobrazení umělých necelistvostí ve svorníku M 140x6 pomocí programu SAUT 3.0 je na obr. 2.3. Umělé necelistvosti, označené C6 až C11 jsou zřetelně vidět jako svislé indikace necelistvostí uprostřed obrázku. Výrazné indikace v levé části jsou šумы od závitů svorníku. Indikace v pravé části jsou způsobeny spojením svorníku vzniklým při jeho výrobě. S ohledem na rozměrové možnosti výrobního zařízení Nástrojárny Semily, byl svorník rozdělen na dvě části, konce upraveny a opatřeny vnitřními závitmi. Po zhotovení umělých necelistvostí byl svorník prostřednictvím spojovací závitové části opět zkompletován tak, aby rozměry a drsnost povrchu souhlasily se skutečným svorníkem.



Obr. 2.3 Grafické zobrazení ultrazvukového zkoušení kvalifikačního bloku – celkový pohled<sup>[16]</sup>

Detailní zaměření indikací umělých necelistvostí C8 a C11 je znázorněno na obr. 2.4. Program SAUT 3.0 znázorňuje zaměřené akustické maximum i stanovené náhradní rozměry, včetně identifikace či poznámek červenou barvou.



Obr. 2.4 Grafické zobrazení ultrazvukového zkoušení kvalifikačního bloku – detail umělých necelistvostí C8 a C11 <sup>[16]</sup>

## 2.4 Zkoušení výřivými proudy

Zkoušení povrchu dířku a závitů svorníku M 140x6 se provádí bezkontaktně pomocí dvou podélných diferenčních sond upevněných v rameni nad sebou. Stoupání ramene 6 mm odpovídá, stejně jako v případě ultrazvukových sond, stoupání závitů svorníku při jeho rotačním pohybu. Souřadnice „x“ se odměřuje po obvodu na vnějším povrchu svorníku od zvoleného počátku proti směru pohybu hodinových ručiček při pohledu na horní čelo svorníku (kladný směr). Souřadnice „y“ se odměřuje na vnějším povrchu svorníku ve směru jeho podélné osy od hrany horního čela směrem k čelu dolnímu. Před nasazením prostředků automatizované kontroly bylo třeba experimentálně určit a také ověřit několik parametrů kontroly vířivými proudy. Mezi hlavní parametry, které byly experimentálně zjišťovány, patří vliv šířky kroku zkoušení (vzdálenosti dvou sousedních drah plynulého pohybu sondy) na citlivost zkoušení a na přesnost lokalizace necelistvostí. Experimentální měření byla prováděna s ručním vedením sondy. Výsledná nastavení parametrů měření jsou uvedena v Tab. 10. Nalezené necelistvosti a porovnání výsledků získaných při zkoušení svorníku M 140x6 se skutečnými rozměry umělých necelistvostí jsou uvedeny v tabulkách 11 až 14. Indikace necelistvostí C1 až C11 byly detekovány sondou horní, indikace C12 a C13 sondou spodní.

Kanál	Buzení sondy [V]:	Frekvence [kHz]:	HW zesílení [dB]:	SW zesílení:	Fáze [°]:
H <sub>z</sub> L <sub>1</sub>	3,49	20	62	2,384	283
H <sub>z</sub> L <sub>2</sub>	3,49	50	62	2,522	38
H <sub>z</sub> L <sub>3</sub>	3,49	100	62	3,738	343
H <sub>z</sub> L <sub>4</sub>	3,49	200	62	6,708	181
S <sub>z</sub> L <sub>1</sub>	3,49	20	62	2,474	284
S <sub>z</sub> L <sub>2</sub>	3,49	50	62	2,579	40
S <sub>z</sub> L <sub>3</sub>	3,49	100	62	3,841	345
S <sub>z</sub> L <sub>4</sub>	3,49	200	62	6,777	184
H <sub>d</sub> L <sub>1</sub>	3,49	20	62	0,306	290
H <sub>d</sub> L <sub>2</sub>	3,49	50	62	0,300	45
H <sub>d</sub> L <sub>3</sub>	3,49	100	62	0,424	349
H <sub>d</sub> L <sub>4</sub>	3,49	200	62	0,735	186
S <sub>d</sub> L <sub>1</sub>	3,49	20	62	0,307	292
S <sub>d</sub> L <sub>2</sub>	3,49	50	62	0,296	46
S <sub>d</sub> L <sub>3</sub>	3,49	100	62	0,414	350
S <sub>d</sub> L <sub>4</sub>	3,49	200	62	0,714	186
Hz	Horní sonda - závit				
Hd	Horní sonda - dřík				
Sz	Spodní sonda - závit				
Sd	Spodní sonda - dřík				
L1,L2,L3,L4	Označení (identifikace) kanálu dané sondy				

Tab.10 Nastavení parametrů měření<sup>[18]</sup>

Číslo indikace	Amplituda Indikace [V]	Fáze Indikace [°]	Hloubka Indikace [mm]	Souřadnice $X_{C\text{-scan}} / X_{C\text{-scan}} + \text{Posun}_x$ [°]	Souřadnice Y [mm]	Označení necelistvosti
1	1,77	91	1,5	56 / 91	432	C2
2	2,62	91	3,5	146 / 181	432	C3
3	2,67	87	3,5	238 / 273	438	C4
4	2,98	92	4	282 / 317	438	C5
5	1,02	86	1	327 / 2	432	C1
6	1,49	86	1,5	59 / 94	480	C7
7	2,23	92	2,5	148 / 183	480	C8
8	1,19	89	1	240 / 275	486	C9
9	0,74	91	1	328 / 3	486	C6
10	1,56	87	1,5	59 / 94	516	C10
11	1,50	89	1,5	148 / 183	516	C11
12	1,44	91	1,5	97 / 132	1590	C12
13	2,00	88	2	278 / 313	1596	C13
<b>Souřadnice <math>X_{C\text{-scan}}</math></b>	[°]	Souřadnice „x“, odměřovaná v záznamu C-scanu od pravého okraje k levému (ve směru měření).				
<b>Posun<sub>x</sub></b>	[°]	Posunutí počátku C-scanu vůči počátku rozvinutého pláště kvalifikačního bloku v ose „x“				
<b>Souřadnice y</b>	[mm]	Souřadnice „y“, odměřovaná od horního okraje bloku směrem dolů.				

Tab.11 Nalezené necelistvosti ve svorníku M 140x6<sup>[18]</sup>

Označení necelistvosti	Skutečná hodnota	Cíl	Praktická zkouška	
			Naměřená hodnota	Rozdíl
C1	1	± 2	1	0
C2	2	± 2	1,5	-0,5
C3	4,2	± 2	3,5	-0,7
C4	5	± 2	3,5	-1
C5	5	± 2	4	-1
C6	1	± 2	1	0
C7	2	± 2	1,5	-0,5
C8	2,3	± 2	2,5	+0,2
C9	3,8	± 2	1	-2,8
C10	2	± 2	1,5	-0,5
C11	1,5	± 2	1,5	0
C12	4,2	± 2	1,5	-2,7
C13	2,6	± 2	2	-0,6

Tab.12 Výška necelistvostí<sup>[18]</sup>

Označení necelistvosti	Skutečná hodnota	Cíl	Praktická zkouška	
			Naměřená hodnota	Rozdíl
C1	8	± 5	8,4	+0,4
C2	10	± 5	12	+2
C3	16	± 5	18	+2
C4	20	± 5	21,6	+1,6
C5	20	± 5	21,6	+1,6
C6	8	± 5	10	+2
C7	10	± 5	12	+2
C8	60	± 5	64	+4
C9	45	± 5	46	+1
C10	10	± 5	11	+1
C11	60	± 5	65	+5
C12	46	± 5	48	+2
C13	60	± 5	62	+2

Tab.13 Délka necelistvostí<sup>[18]</sup>

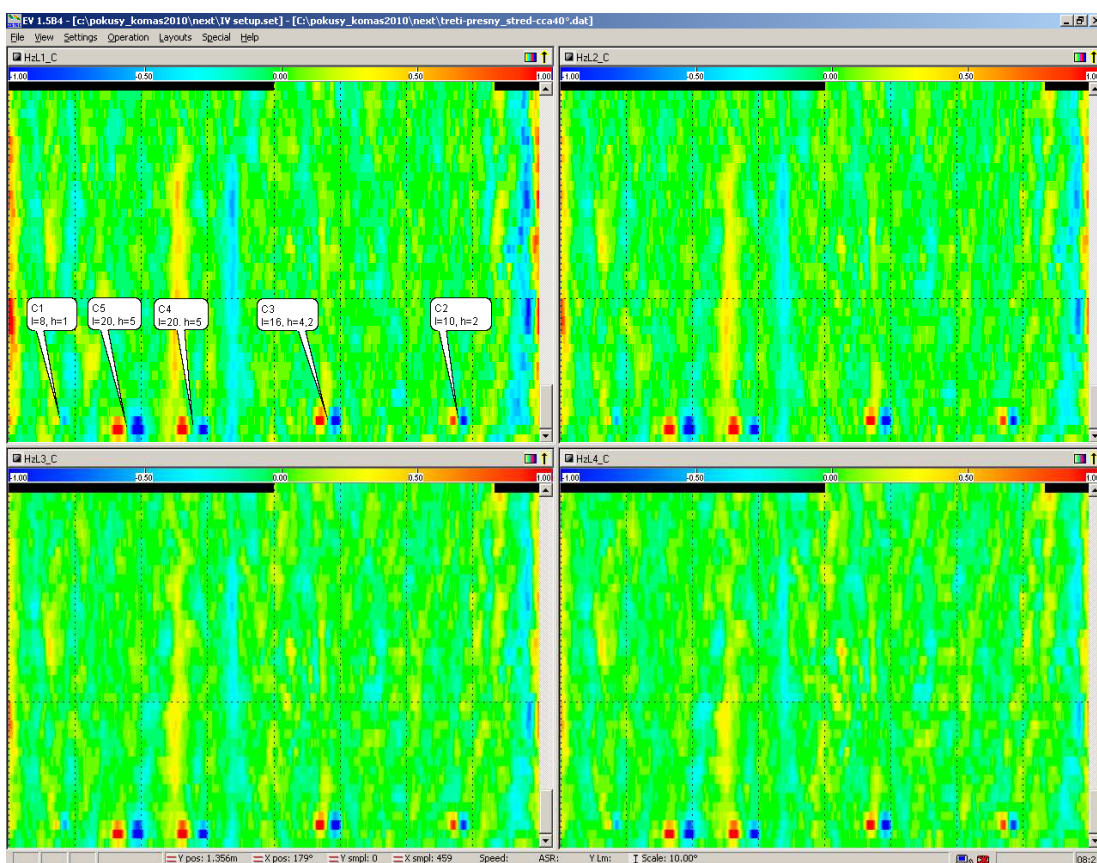
Označení necelistvosti	Poloha „x“			
	Cíl [°]	Stanovená poloha indikace necelistvosti $X=X_{C\text{-scan}} - \text{posun}_X$ [°]	Skutečná poloha umělé necelistvosti [°]	Rozdíl mezi stanovenou a skutečnou polohou necelistvosti [°]
C1	±8	2	0	+2
C2	±8	91	90	+1
C3	±8	181	180	+1
C4	±8	273	270	+3
C5	±8	317	315	+2
C6	±8	3	0	+3
C7	±8	94	90	+4
C8	±8	183	180	+3
C9	±8	275	270	+5
C10	±8	94	90	+4
C11	±8	183	180	+3
C12	±8	132	132	+2
C13	±8	313	312	+1
Označení necelistvosti	Poloha „y“			
	Cíl [mm]	Stanovená poloha indikace necelistvosti [mm]	Skutečná poloha umělé necelistvosti [mm]	Rozdíl mezi stanovenou a skutečnou polohou necelistvosti [mm]
C1	±10	432	433	-1
C2	±10	432	434,5	-2,5
C3	±10	432	436	-4
C4	±10	438	437,5	+0,5
C5	±10	438	438	0
C6	±10	486	485	+1
C7	±10	480	485	-5
C8	±10	480	485	-5
C9	±10	486	485	+1
C10	±10	516	520	-4
C11	±10	516	520	-4
C12	±10	1590	1590	0
C13	±10	1596	1594	+2

Tab.14 Poloha necelistvostí – souřadnice „x“ a „y“<sup>[18]</sup>

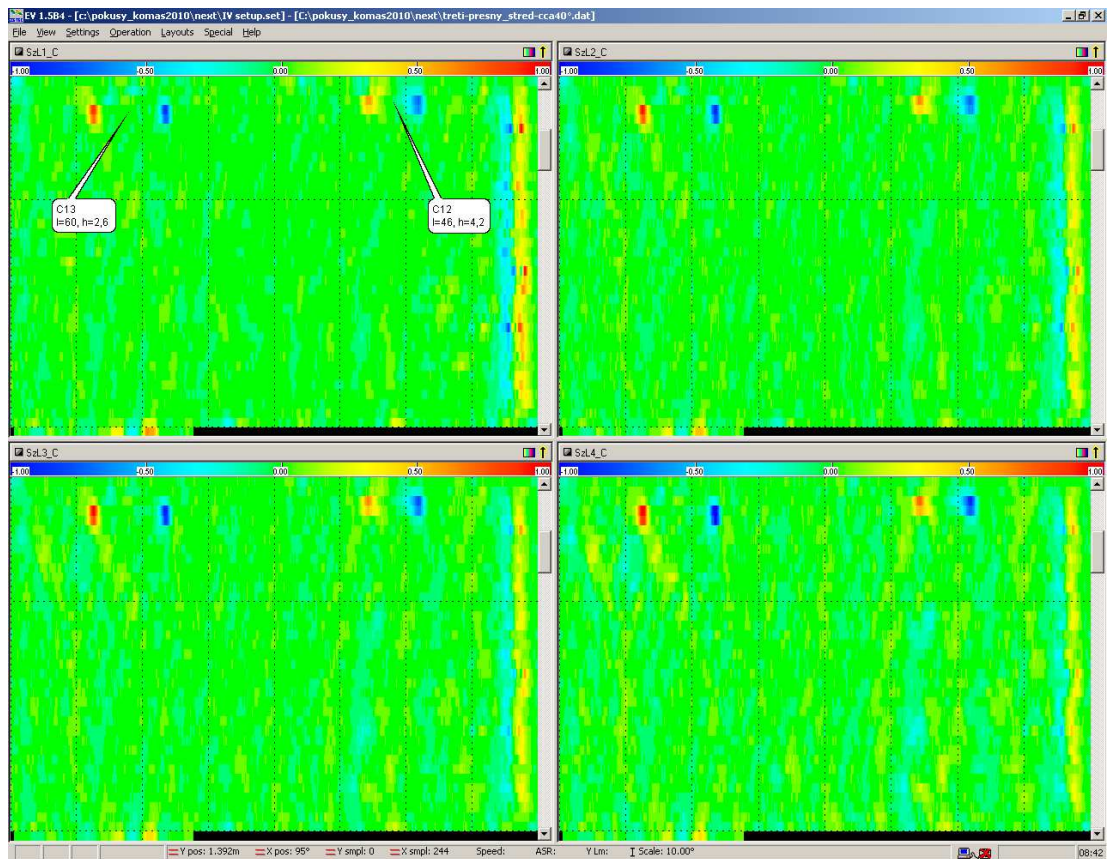
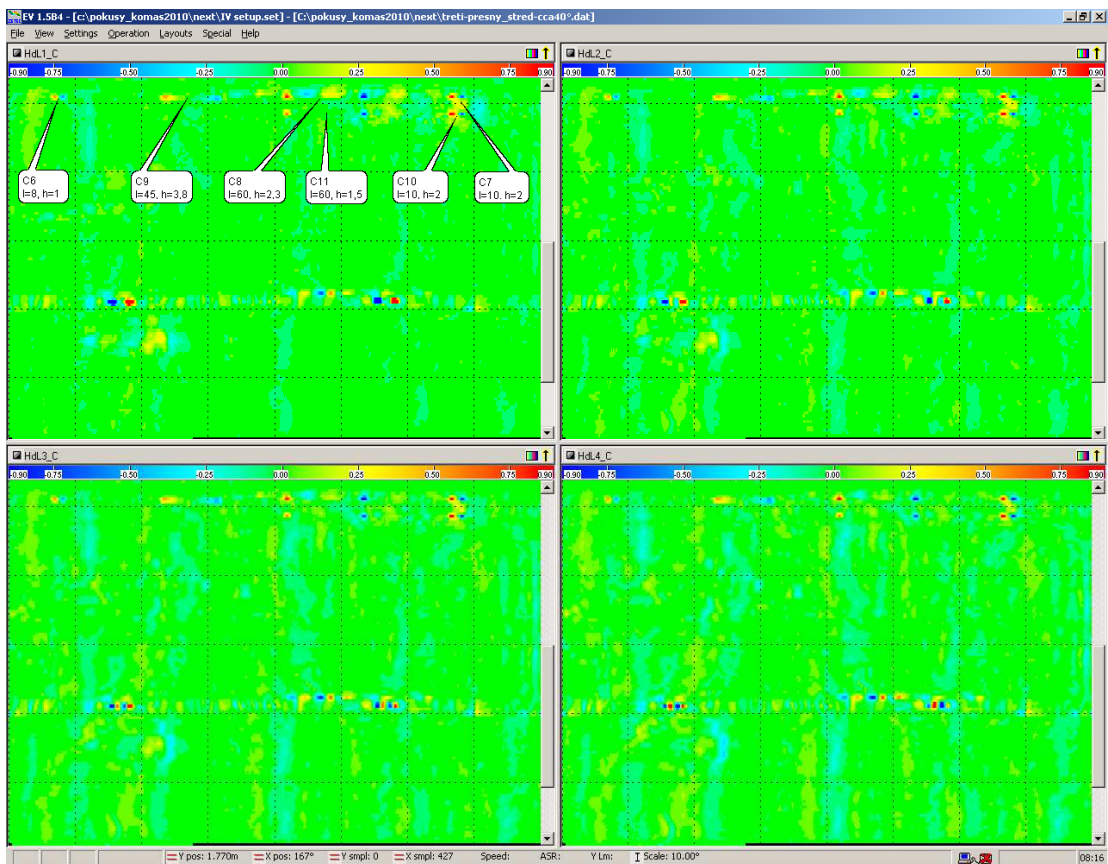
Zpracování naměřených dat získaných při zkoušení svorníků uzlu hlavního přírubového spoje tlakové nádoby reaktoru se provádí pomocí programového produktu EDDY VIEW Version 1.5B4. V programu jsou zaznamenány v každém měřeném scanu jednotlivé tripy (záznam dat z jedné otáčky zkoušené komponenty). K analýze dat je k dispozici zobrazení X-Y, X-t, Y-t a C-scan tj. plošné zobrazení měřené plochy, barevně odlišené dle velikosti amplitudy zaznamenaného signálu pro usnadnění činnosti při analýze dat. Zoom s libovolným zvětšením lze použít pro zobrazení X-t, Y-t, X-Y i pro C-scan. V každém zaznamenaném tripu je možno přečíst souřadnice jeho počátku, konce, souřadnici Y, na které probíhalo měření

konkrétního tripu, a souřadnici X libovolně zvoleného místa např. reprezentujícího polohu indikace.

U jednotlivých indikací je možno přečíst velikost jejich amplitudy a velikost fázového úhlu. Veškeré výše popsané možnosti lze současně provádět pro všechny použité pracovní frekvence (kanály) při libovolném nastavení zobrazovaných oken. Ukázky grafického zobrazení umělých necelistvostí ve svorníku M 140x6 pomocí programu EDDY VIEW Version 1.5B4 je na obrázcích 2.5 až 2.7.



Obr. 2.5 C-scan svorníku M 140x6 horní sondou při zkoušení závitu<sup>[18]</sup>

Obr. 2.6 C-scan svorníku M 140x6 spodní sondou při zkoušení závitu<sup>[18]</sup>Obr. 2.7 C-scan svorníku M 140x6 horní sondou při zkoušení dřívku<sup>[18]</sup>



## 2.5 Zhodnocení měření

Kritéria hodnocení detekce necelistvostí (cíle), uvedené v tabulkách s výsledky měření, vychází z požadavků na kvalifikaci ultrazvukové metody a metody vířivých proudů pro kontrolu svorníků M 140x6.

Během zkoušení materiálu pomocí ultrazvukové metody dochází v oblasti závitů svorníku vlivem odrazů od závitů ke zvýšenému akustickému šumu, což se projeví jako výrazná indikace. Na Obr. 2.3 je tato oblast označena šipkou. Citlivost odrazové techniky na povrchové necelistvosti je v této oblasti výrazně nižší než v oblasti hladké části dřívku svorníku. Z tohoto důvodu nebylo možné pomocí ultrazvukové metody vady C1 až C5 v oblasti závitů spolehlivě detekovat. Stejný problém vniká s detekcí vad C12 a C13 v druhé závitové části svorníku. Pro zbylé vady byly pomocí ultrazvukové metody splněny všechny požadované cíle.

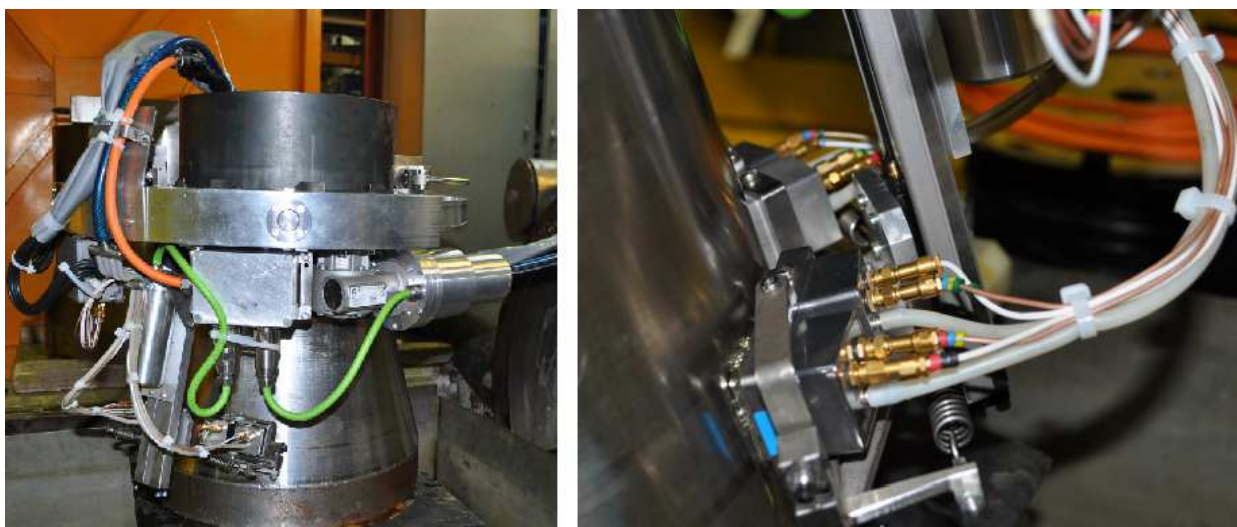
Pomocí metody vířivých proudů byly splněny všechny cíle, kromě kritéria stanovení výšky necelistvostí s přesností  $\pm 2$  mm u umělých necelistvostí tvaru úseče s označením C9 a C12 (v tabulkách jsou tyto hodnoty zbarveny červeně). U necelistvostí tohoto typu dochází vlivem pomalého náběhu k deformaci výsledného signálu, neboť pozvolná geometrická změna, způsobená přítomností trhliny, ovlivňuje obě vinutí použitého snímače současně. Tato skutečnost má za následek podhodnocení velikosti hloubky těchto vad. K přesnému určení hloubky vad tohoto typu lze v tomto případě použít ultrazvukovou metodu. U necelistvostí vyskytujících se v oblasti závitu lze považovat veškeré indikace od délky 25 mm, což odpovídá hloubce cca 1 mm, za úsečové a systematicky nadhodnocovat jejich hloubku o 2 – 3 mm, neboť výsledný signál vířivých proudů neposkytuje žádnou informaci o jejich tvaru. S ohledem na reálný výskyt těchto spíše hypotetických indikací však nemá výše uvedený postup příliš velký význam.

### 3 Automatizované postupy zkoušení

Automatizované zkoušení je pro nedestruktivní zkoušení komponent JE velmi důležité. Důvodů, proč tomu tak je, lze sledovat hned několik. Pomocí dnes používaných moderních manipulátorů lze výrazně zkrátit celkovou dobu provádění kontroly, což v případě odstavených bloků JE přináší nemalé finanční úspory. Dalším důvodem využívání automatizované techniky je ionizující záření, resp. jeho negativní vliv na lidský organismus. V prostorách, kde je hodnota ionizujícího záření nad přijatelnými limity, je použití automatizovaného zkoušení nevyhnutelné. V neposlední řadě je pro nás velmi podstatným hlediskem kvalita naměřených dat. Pomocí souvislého souřadnicového pohybu sond lze získat komplexní obraz testovaného objektu, což usnadňuje jeho následné vyhodnocení. Složení takového celistvého obrazu by bylo ručním způsobem zkoušení nemožné.

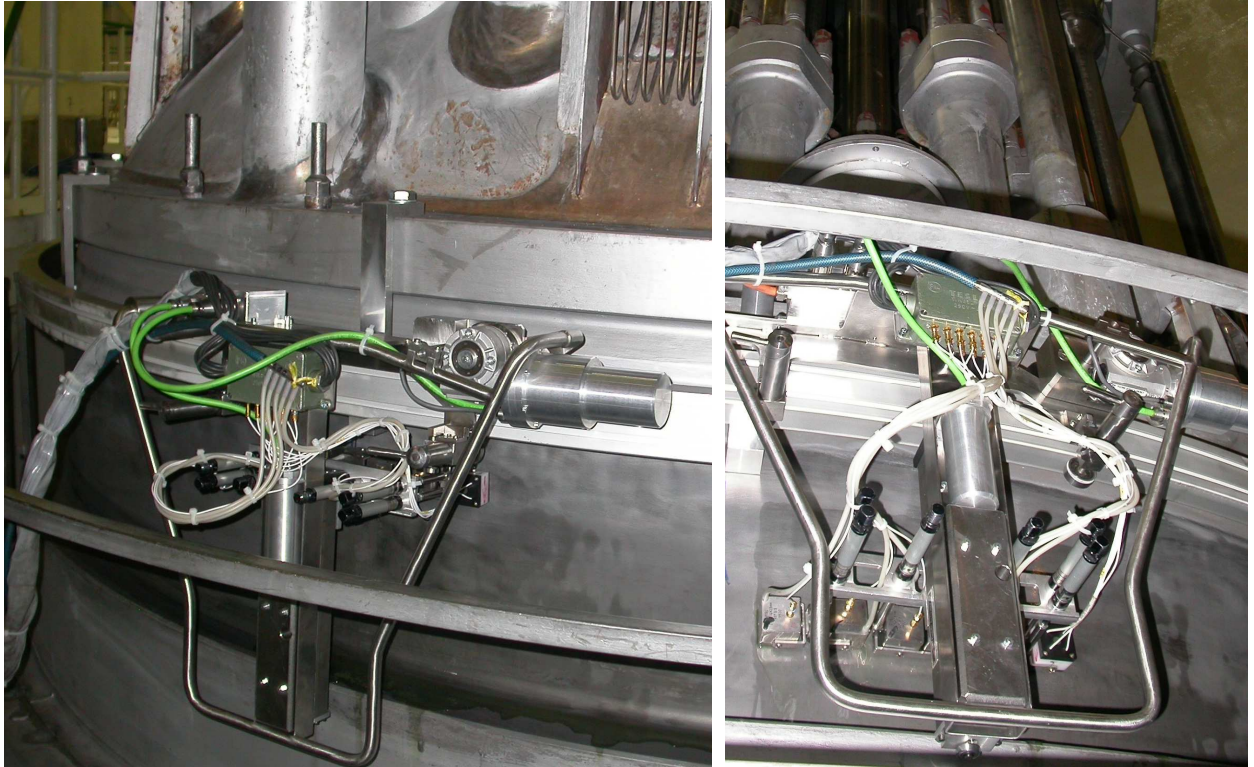
Společnost ŠKODA JS a.s., odbor Provozní prohlídky, používá ke kontrole pomocí ultrazvukové metody a metody vířivých proudů několik systémů automatizované kontroly. Podrobnější popis jednotlivých systémů není vzhledem k rozsahu diplomové práce možný, proto je zde proveden pouze jejich výpis s upřesněním použité metody. Pouze manipulátor KOMAŠ II je zde, v návaznosti na experimentální měření v předchozí kapitole, popsán detailněji:

- Manipulátory Automat 250 a Automat 500 pro zkoušení hrdel tlakové nádoby reaktoru (kontrola ultrazvukovou metodou)



Obr. 3.1 Vlevo celkové uspořádání manipulátoru Automat 250 na zkušební vzorku, vpravo detail ultrazvukových sond

- Manipulátor Traktor pro zkoušení svarů hrdlových prstenců a víka tlakové nádoby reaktoru (současná kontrola ultrazvukovou metodou a vířivými proudy)



Obr. 3.2 Vlevo celkové uspořádání manipulátoru Traktor, vpravo spodní pohled na ultrazvukové a vířivoproudé sondy

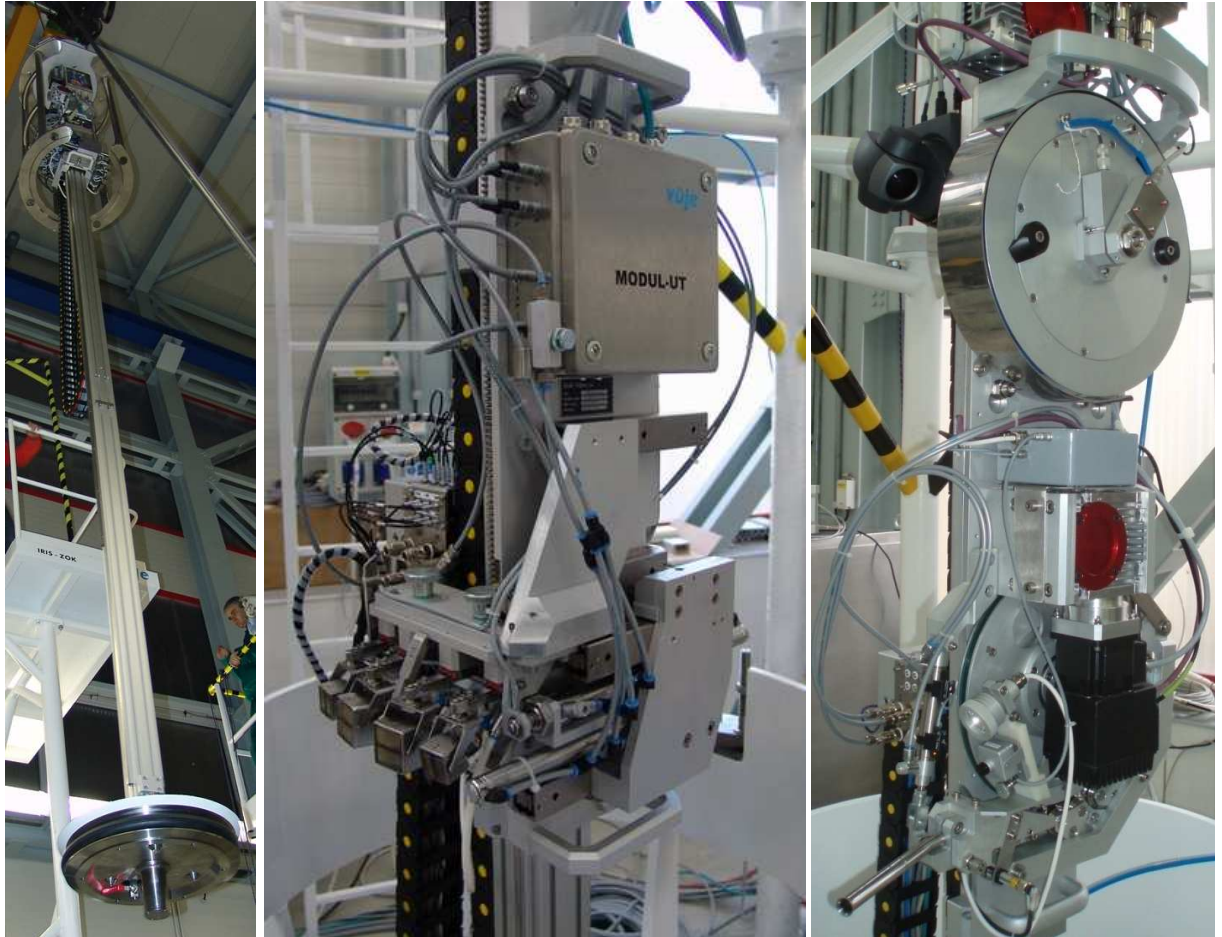
- Manipulátor USK-213 pro kontrolu tlakové nádoby reaktoru typu VVER 440 z vnějšího povrchu (současná kontrola ultrazvukovou metodou a vířivými proudy)
- Manipulátor SK-187 pro kontrolu tlakové nádoby reaktoru typu VVER 1000 z vnějšího povrchu (současná kontrola ultrazvukovou metodou a vířivými proudy)

- Manipulátor SKIN pro kontrolu tlakové nádoby reaktoru typu VVER 440 a VVER 1000 z vnitřního povrchu (současná kontrola ultrazvukovou metodou a vířivými proudy). V současné době probíhá vývoj nového systému (MKS), který stávající manipulátor nahradí



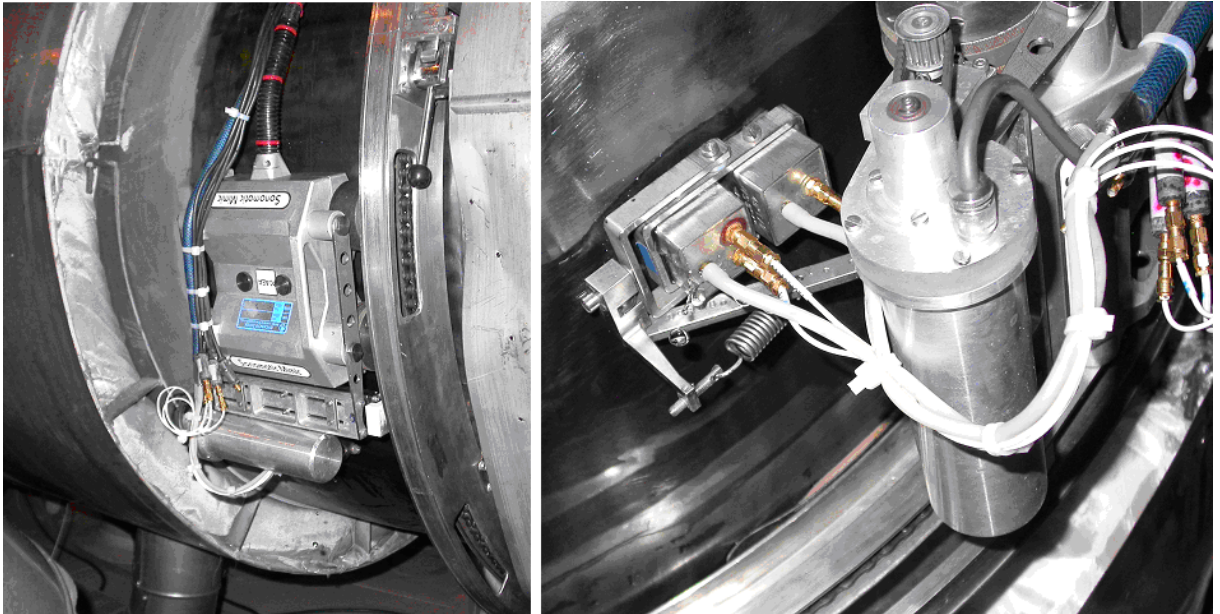
Obr. 3.3 Vlevo nahoře detail ramene se sondami, vlevo dole usazený manipulátor SKIN na přírubě reaktoru VVER 1000, vpravo manipulátor SKIN při zavážení do reaktorové šachty VVER 440

- Manipulátor ZOK-PG pro kontrolu parogenerátorů (současná kontrola ultrazvukovou metodou a vířivými proudy). Manipulátor ZOK-PG lze modifikovat pomocí výměnných modulů a provádět tak pomocí něj všechna měření, včetně následného odvrtání a zavaření teplosměnné trubky v případě nalezení vady



Obr. 3.4 Vlevo manipulátor ZOK-PG, uprostřed ultrazvukový modul, vpravo vířivoproudý modul

- Manipulátor MIMIC pro kontrolu svaru víka tlakové nádoby reaktoru typu VVER 440 a svarů smyček hlavního cirkulačního potrubí VVER 1000 (současná kontrola ultrazvukovou metodou a vířivými proudy)



Obr. 3.5 Vlevo celkové uspořádání manipulátoru MIMIC při kontrole svaru HCP, vpravo detail ultrazvukové a vířivoproudé sondy

- Manipulátor JEKOZ pro kontrolu matic a závitových hnízd (lůžek) typu VVER 440 a VVER 1000 (kontrola vířivými proudy)



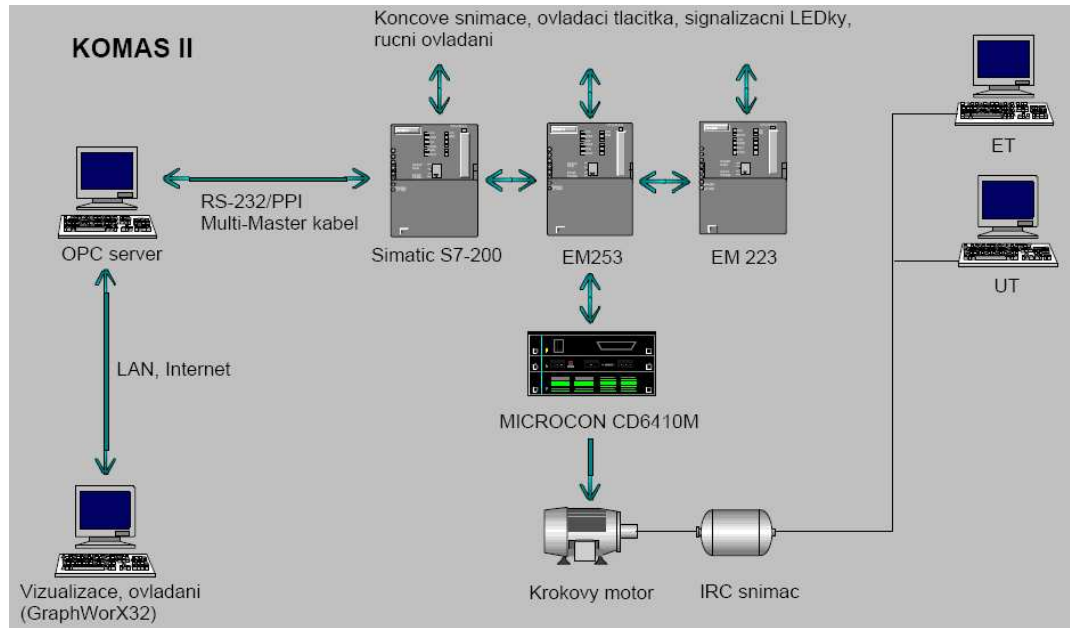
Obr. 3.6 Celkové uspořádání manipulátoru JEKOZ

- Manipulátor KOMAŠ II pro kontrolu svorníků tlakové nádoby reaktoru typu VVER 440 a VVER 1000 (současná kontrola ultrazvukovou metodou a vířivými proudy)

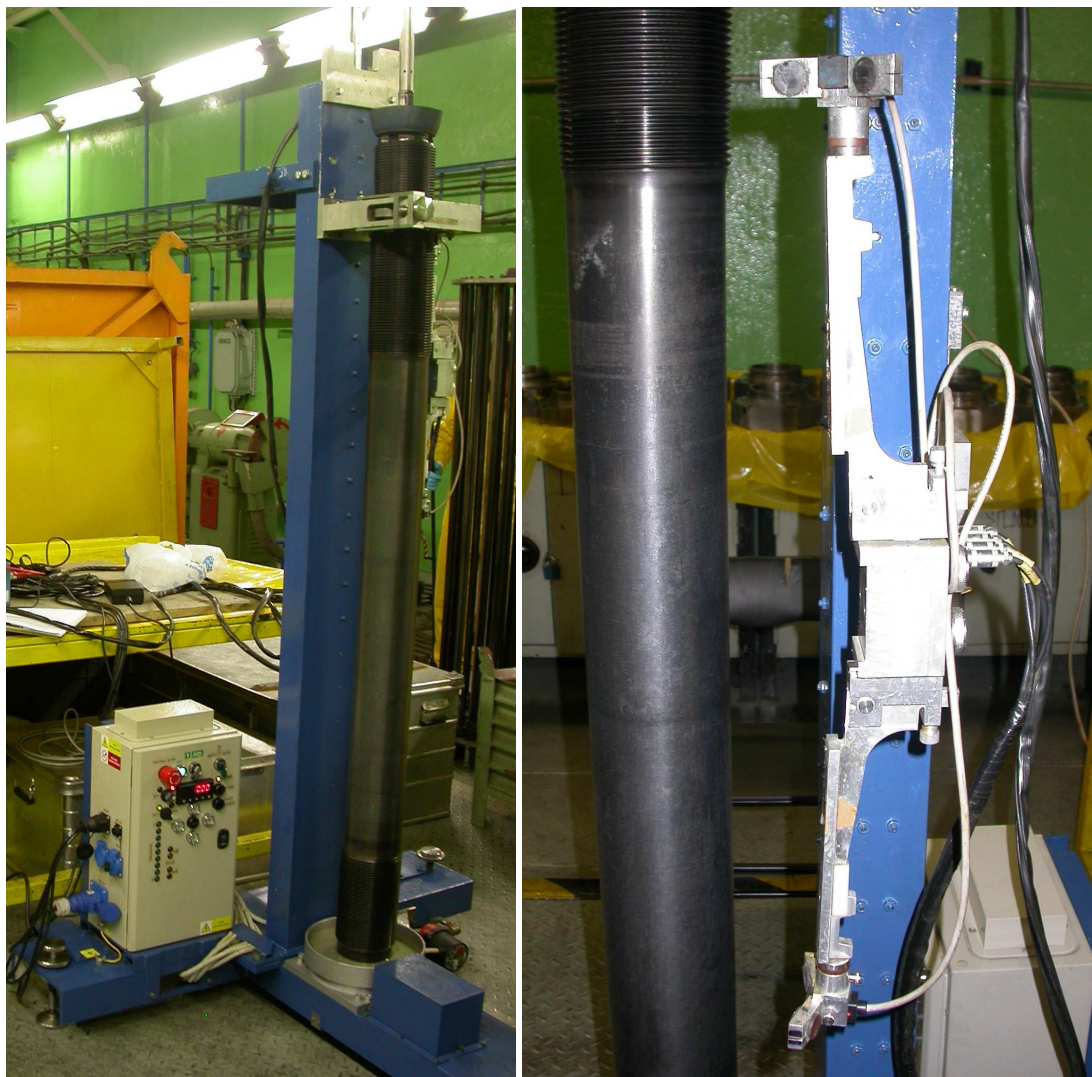
Hlavní částí manipulátoru KOMAŠ II je stojan, do kterého se upíná svorník M 140x6 ve svislé poloze. Stojan vytváří rotační pohyb svorníku a současně podélný posuvný pohyb nosičů sond. Oba pohyby jsou vzájemně vázané. Jedné otáčce svorníku odpovídá vertikální posun sond o 6 mm. Ultrazvukové sondy jsou umístěny v tyči, která se vkládá do středového vývrtu tělesa svorníku. Vývrt je dole utěsněn na otočném talíři a je vyplněný vodou s inhibátorem koroze, která slouží jako vazební prostředek. Sondy vířivých proudů jsou nesené držáky po vnějším povrchu svorníku. Technický výkres manipulátoru KOMAŠ II je součástí přílohy práce.

Ovládání manipulátoru KOMAŠ II je realizováno pomocí tlačítek na předním ovládacím panelu, nebo přes protokol OPC (program firmy Siemens S7-200\_PC\_Access) na PC, případně notebooku. Vizualizace je naprogramována v prostředí GraphWorX32 od firmy Iconic. Vizualizace i server mohou běžet na jednom PC. Program je napsaný v prostředí SIMATIC STEP7 jazykem FBD (function block diagram).

Manipulátor KOMAŠ II je blokově znázorněn na obr. 3.7. Samotný pohyb svorníku zajišťuje krokový motor MICROCON. Programovatelná jednotka pro řízení krokového motoru CD6410M převádí pulzy dodávané polohovacím modulem EM253 na výkonové napájení krokového motoru. Motor a pohyb sloupu je zpřevodován 2:1, jedna otáčka motoru tedy odpovídá polovině otáčky stojanu. Informace měřicím přístrojům o poloze (pohybu) svorníku dává inkrementální snímač polohy (IRC) s 500 pulzy na jednu otáčku.

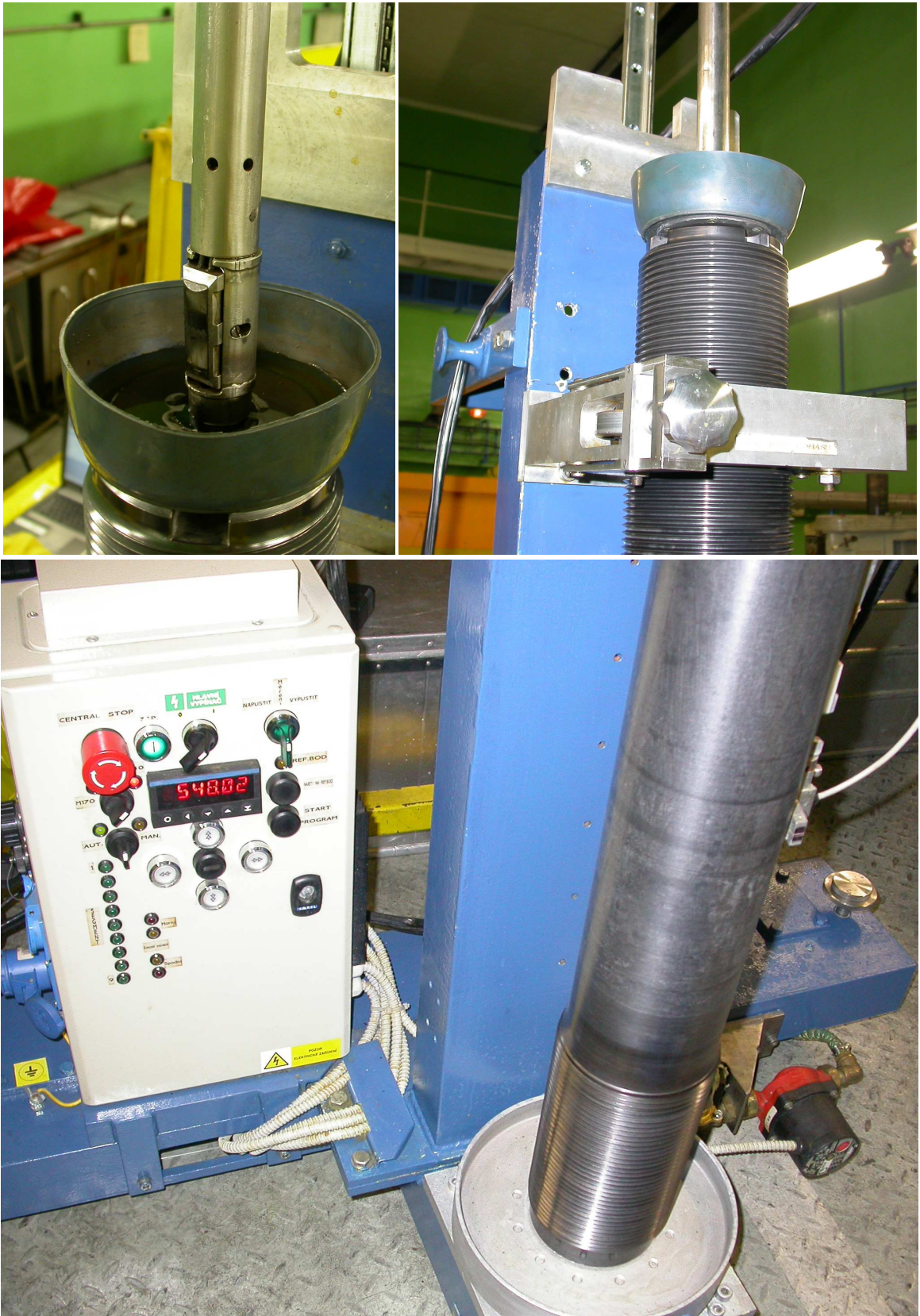


Obr. 3.7 Blokové znázornění měřícího systému KOMAS II



Obr. 3.8 Vlevo celkový pohled na manipulátor KOMAS II, vpravo detail uchycení sond vířivých proudů





Obr. 3.9 Vlevo nahoře detail ultrazvukových sond umístěných v zásuvné tyči, vpravo uchycení horní závitové části svorníku, dole ovladací pult a detail otočné části manipulátoru

## 4 Zpracování dat a vyhodnocování výsledků

V bývalém Československu a později i v České republice byl od roku 1982 až do roku 1999 používán pro provádění a hodnocení provozních kontrol jaderných elektráren předpis PK 1514-72 (Pravidla kontroly svarových spojů a návarů uzlů a konstrukcí jaderných elektráren, zkušebních a výzkumných jaderných reaktorů a zařízení), případně jeho modifikace, rozšíření a doplnění. Tento dokument vycházel z výrobních předpisů a stanovoval jako cíl ultrazvukové zkoušky zjištění vnitřních vad bez udání druhů vady, ale s určením jejich počtu, náhradní velikosti, náhradní délky a polohy. Necelistvost byla poté označena jako „přípustná“, nebo „nevyhovující“.

Podle současného přístupu vyhodnocování výsledků je nutné nevyhovující necelistvosti dále analyzovat. Hlavním cílem analýzy je určení pravděpodobných rozměrů necelistvosti. Dále je třeba tuto necelistvost schematizovat a určit její výšku z náhradní velikosti  $D_n$ . Rozměry necelistvostí se poté porovnávají s kritérii přípustnosti, které jsou obsaženy v tabulkách v příloze XI normativně technické dokumentace A.S.I., sekce IV (Hodnocení zbytkové životnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER). Necelistvosti, přípustné podle tohoto dokumentu, se označují jako „vyhovující“, ostatní jsou zařazeny do kategorie „k posouzení“. <sup>[20]</sup>

Předběžné vyhodnocení přípustnosti těchto necelistvostí se provádí srovnáním s dříve analyzovanými případy, srovnáním s předchozím nálezem a případně orientačními výpočty, nebo jiným způsobem v souladu s pravidly schválenými orgánem státního dozoru (SÚJB). Pokud předběžné vyhodnocení nevede k uspokojivým závěrům, je objednateli navrženo provedení podrobných výpočtů. Při nich se zjišťuje rychlost růstu rozměrů posuzované necelistvosti pod vlivem provozních namáhání, a stanovuje se doba, za kterou by mohla necelistvost dosáhnout kritické, tj. nepřípustné velikosti. Necelistvosti hodnocené „k posouzení“ lze za určitých podmínek opravit na základě zpracovaného technologického postupu opravy. Opravu necelistvostí lze také nahradit výměnou celků nebo části zařízení na kterém byla daná necelistvost nalezena. <sup>[21]</sup>

Zvýšené požadavky na bezpečnost jaderných elektráren dále vedly k nutnosti prokázání způsobilosti použité metody a zařízení pro provádění nedestruktivních kontrol komponent jaderných elektráren. Prokazování této způsobilosti se provádí v rámci tzv. technické kvalifikace podle metodiky SÚJB č. 01966 (Metodika kvalifikace provozních prohlídek hlavních komponent primárních okruhů JE typu VVER) a v souladu s metodikami: <sup>[19]</sup>

- ENIQ (European network for inspection qualification) s názvem „European methodology for qualification of non-destructive testing (Third issue)“, EUR 22906 EN
- IAEA (International atomic energy agency) s názvem „Methodology for qualification of in-service inspection systems for WWER nuclear power plants“, EBP-WWER-11

## 5 Závěr

Nedestruktivní zkoušení komponent jaderných elektráren hraje v oblasti zajištění bezpečnosti provozu a prodloužení životnosti jaderných elektráren jako celku nezastupitelnou a velmi významnou roli. Zejména v současné době, kdy provozovatelé jaderných elektráren zvyšují instalovaný výkon provozovaných bloků s tlakovodními reaktory a plánují jejich bezpečný a spolehlivý provoz po dobu delší, než původně předpokládal projekt.

Každá z popisovaných metod NDT má ze své fyzikální podstaty omezené pole působnosti. Doménou ultrazvukové metody jsou spíše objemové zkoušky, zatímco metoda vířivých proudů se vyznačuje lepší schopností odhalit povrchové a těsně podpovrchové vady. Experimentální měření svorníku M 140x6 jasně ukazuje určitá úskalí, se kterými je potřeba při volbě zkušební metody, návrhu systému i stanovení parametrů samotného měření počítat. Před nasazením automatizované techniky je proto nezbytné celý měřicí systém odzkoušet na vzorku, který odpovídá reálnému objektu, s uměle vytvořenými a přesně definovanými vadami. Tímto způsobem lze parametry zkoušení optimalizovat tak, abychom byli schopni detekovat předepsané nečelistvosti a jiné vady uvnitř i vně zkoušeného materiálu. Tento postup je normativně upraven systémem technických kvalifikací, který je podle současného přístupu nutné provádět pro každou metodu nedestruktivního zkoušení vybraných komponent jaderných elektráren.

Pro automatizované zkoušení komponent jaderných elektráren se jako vhodné jeví obě popisované metody zkoušení. Většina aplikací nedestruktivního zkoušení popsaných v této práci vhodně využívá kombinací ultrazvukové metody a metody vířivých proudů. Automatizované zkušební systémy jsou obecně koncipovány tak, aby se obě metody vzájemně doplňovali v případech, kdy je použití některé z nich z jakéhokoliv důvodu omezeno. Nedílnou součástí automatizovaného nedestruktivního zkoušení je také téměř vždy nepřímá vizuální metoda, využívající kamerové systémy.

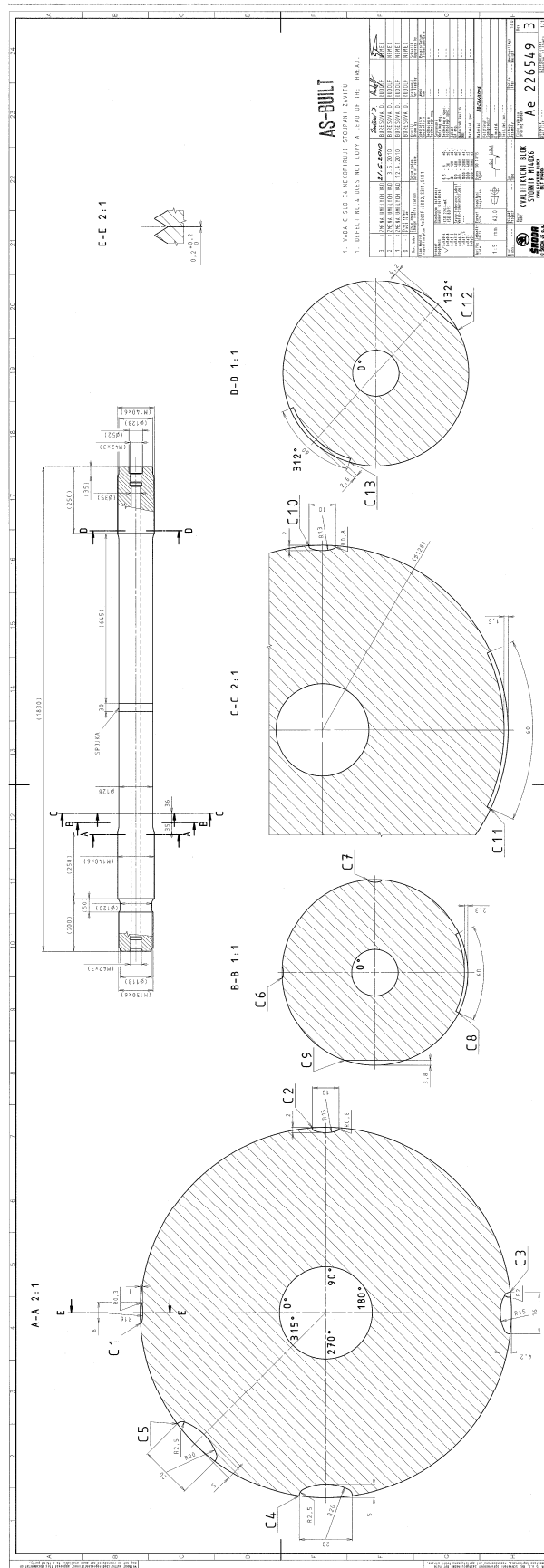
## Použitá literatura a zdroje použitých obrázků

- [1] KREIDL, M., ŠMÍD, R., MATZ, V., ŠTARMAN, S.: ULTRAZVUKOVÁ DEFEKTOSKOPIE, PRAHA 2011
- [2] MRÁZEK, M.: SYSTÉM PRO NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ POMOCÍ VÍŘIVÝCH PROUDŮ, BAKALÁŘSKÁ PRÁCE, ČVUT, PRAHA 2010
- [3] [ONLINE] WWW.NDT-ED.ORG, EDDY CURRENT TESTING, [CIT. 2011-12-20], DOSTUPNÝ Z WWW: [http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/cc\\_ec\\_index.htm](http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/cc_ec_index.htm)
- [4] [ONLINE] WWW.NDT.CZ, ET DEFEKTOSKOPIE – VÍŘIVÉ PROUDY, [CIT. 2011-12-22], DOSTUPNÝ Z WWW: <http://www.ndt.cz/?mnu=17,0>
- [5] [ONLINE] WWW.QVSLIMITED.CO.UK, QUALITY VERIFICATION SERVICES, [CIT. 2011-12-28], DOSTUPNÝ Z WWW: [http://www.qvslimited.co.uk/inspection\\_overview.html](http://www.qvslimited.co.uk/inspection_overview.html)
- [6] [ONLINE] HTTP://RESOURCES.EDB.GOV.HK, SCIENCE LEARNING THROUGH ELECTRONIC LIBRARY, [CIT. 2012-01-23], DOSTUPNÝ Z WWW: [http://resources.edb.gov.hk/physics/articleE/smartmaterials/SmartMaterials\\_e.htm](http://resources.edb.gov.hk/physics/articleE/smartmaterials/SmartMaterials_e.htm)
- [7] [ONLINE] HTTP://STROJIRENSTVI-UCIVO.BLOGSPOT.COM, [CIT. 2012-01-23], DOSTUPNÝ Z WWW: <http://strojirenstvi-ucivo.blogspot.com/2011/03/3342-zkouska-ultrazvukem.html>
- [8] ŠIMEČEK, R.: MODERNÍ METODY V NEDESTRUKTIVNÍM ZKOUŠENÍ POMOCÍ ULTRAZVUKU, BAKALÁŘSKÁ PRÁCE, VUT, BRNO 2011
- [9] TICHÝ, P., ŠNAJBERK : METODA VÍŘIVÝCH PROUDŮ – ET2, UČEBNÍ MATERIÁLY K ODBORNÉMU KVALIFIKAČNÍMU KURZU, ATG, s.r.o., PRAHA 2004
- [10] KOPEC, B. A KOLEKTIV : NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ A KONSTRUKCÍ, AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., BRNO 2008
- [11] KUBEŠ, M.: DIAGNOSTIKA VODIVÝCH MATERIÁLŮ VÍŘIVÝMI PROUDY, BAKALÁŘSKÁ PRÁCE, ČVUT, PRAHA 2010
- [12] [ONLINE] WWW.NDT-ED.ORG, ULTRASOUND, [CIT. 2012-01-23], DOSTUPNÝ Z WWW: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/transducertypes.htm>
- [13] [ONLINE] SPECTRUM INSPECTION ENGINEERING, [CIT. 2012-02-06], DOSTUPNÝ Z WWW: <http://www.spectruminspection.org/>

- [14] [ONLINE] KOVÁČIK, M., KOLÁŘ, J.: ZKOUŠENÍ HETEROGENNÍCH A AUSTENITICKÝCH SVARŮ TECHNIKOU PHASED ARRAY A TECHNIKOU TOFD, [CIT. 2012-02-08], DOSTUPNÝ Z WWW: [www.ndttrade.cz/UserFiles/File/heterogenni.pdf](http://www.ndttrade.cz/UserFiles/File/heterogenni.pdf)
- [15] ZKOUŠENÍ MATERIÁLU ULTRAZVUKEM, STUDIJNÍ MATERIÁLY PRO II KVALIFIKAČNÍ STUPEŇ, DŮM KULTURY KOVOPRŮMYSLU, PRAHA 1987
- [16] VÍT, J., STAINER, L., SAMEK, J., FAIT, L.: TECHNICKÉ ZDŮVODNĚNÍ ZKOUŠENÍ SVORNÍKŮ M 140X6 ULTRAZVUKOVOU METODOU (Ae 13691 Dok Rev. 2), ŠKODA JS a.s., PLZEŇ 2011
- [17] UŽIVATELSKÝ MANUÁL PŘÍSTROJE MULTISCAN MS 5800, R/D TECH INC.
- [18] FORMAN, J., FIKRLE, M.: TECHNICKÉ ZDŮVODNĚNÍ ZKOUŠENÍ SVORNÍKŮ M 140X6 VÍŘIVÝMI PROUDY V EDU (Ae 14313 Dok Rev. 0), ŠKODA JS a.s., PLZEŇ 2011
- [19] VÍT, J., SKÁLA, Z., STAINER, L.: ŠKODA JS – 25 LET AUTOMATIZOVANÉHO NEDESTRUKTIVNÍHO ZKOUŠENÍ NA JADERNÝCH ELEKTRÁRNÁCH TYPU VVER, 37. MEZINÁRODNÍ KONFERENCE DEFEKTOSKOPIE 2007 , ČNDT, 2007
- [20] VÍT, J., SKÁLA, Z., STAINER, L.: URČOVÁNÍ PRAVDĚPODOBNÝCH (SKUTEČNÝCH) ROZMĚRŮ NECELIVOSTÍ DETEKOVANÝCH ULTRAZVUKEM PŘI AUTOMATIZOVANÉM ZKOUŠENÍ TLAKOVÝCH NÁDOB REAKTORŮ TYPU VVER, ŠKODA JS a.s., PLZEŇ 2009
- [21] VÍT, J., SAMEK, J., FAIT, L.: ZKOUŠKA ULTRAZVUKEM TĚLESA A NOSNÝCH ZÁVITŮ SVORNÍKŮ M 140X6 (M 150X6) ODRAZOVOU TECHNIKOU SYSTÉMEM KOMAŠ II, (Ae 19085 T Rev. 5), ŠKODA JS a.s., PLZEŇ 2011
- [22] RYBÍN, Z., VÝKRES MANIPULÁTORU KOMAŠ II S UPNUTÝM SVORNÍKEM M 140X6 A PŘÍSTROJOVÝM VYBAVENÍM, ŠKODA JS a.s., Plzeň 2011

# Přílohy

Příloha č. 1: Výkres svorníku M 140x6 s uměle vytvořenými necelistvostmi [16]



**Příloha č. 2:** Výkres manipulátoru KOMAŠ II s upnutým svorníkem M 140x6 a přístrojovým vybavením <sup>[22]</sup>