

POČÍTAČOVÁ SIMULÁCIA PRI SKÚŠANÍ ULTRAZVUKOM

ing. Juraj NEUPAUER, Slovenské elektrárne a.s.

Úvod

Existuje množstvo odvetví, v ktorých modelovanie nahradzuje časovo, finančne alebo technicky náročné experimenty. Vývoj výpočtovej techniky a softwaru dospel do štádia praktického využívania modelovania a simulácie.

Počítačové modelovanie si našlo cestu aj do renomovaných laboratórií defektoskopie, kde do určitej miery dokáže nahradiť experiment na vzorke, skúšobnom telese alebo mierke. Na úvod niekoľko spôsobov využitia modelovania v technike NDT:

- vyšetrowanie poľa budeného UT alebo ET sondou
- návrh alebo optimalizácia sondy, návrh budenia phased array sondy
- vyšetrowanie dostupnosti k skúšanju v súčiastke zložitého tvaru
- skúmanie odozvy skúšobnej techniky na rôzne typy, veľkosti, polohy a orientáciu chýb

Na pracovisku pre mechanizované kontroly v Slovenských elektrárnach a.s., máme od roku 2005 program CIVA. V nasledujúcej kapitole stručne popíšeme vlastnosti a možnosti modulu UT. Neskôr ukážeme niektoré z našich aplikácií pre metódu UT.

CIVA

CIVA software je expertná platforma určená pre nedeštruktívne skúšanie. Skladá sa zo simulácie, zobrazovania a analýzy, ktorá umožňuje optimalizovať techniky skúšania a predvídať ich správanie sa v skutočných NDT konfiguráciách. V súčasnosti CIVA zahŕňa UT, ET a RT skúšobné metódy.

Nástroje pre UT simuláciu šírenia zväzku a jeho interakciu s chybami a vzorkou. Umožňuje simulovať celý proces skúšania odrazovou technikou, tandemom a technikou TOFD a PA so širokým rozsahom sond, komponentov a chýb. Zaujímavá je možnosť modelovania zložitých geometrií, ako napr. kolien, nátrubkov a otvorov, ako aj geometrií definovaných súborom CAD.

CIVA dokáže modelovať izotropické aj anizotropické materiály a viacvrstvé materiály. CIVA modeluje rôzne druhy sond, od jednoduchých, dvojitéch, s rovným alebo zakriveným kontaktným povrchom, až po zostavy tandem, TOFD a PA polia rôznej konfigurácie.

Spôsob práce spravidla pozostáva z niekoľkých krokov:

- simulácia poľa sondy
- simulácia odozvy na defekt
- analýza simulovaných dát

UT aplikácie v SE a.s.

Na úvod treba podotknúť, že ďalej uvedené aplikácie sú, z hľadiska možností použitého softwaru jednoduchými aplikáciami, na ktorých sme sa učili modelovanie. Sú to modely na rovinných povrchoch s jednomeničovými sondami s odrazovou technikou a technikou tandem. Napriek svojej jednoduchosti poskytli cenné údaje pre nastavenie a optimalizáciu skúšobných techník.

Aplikácia 1: Optimalizácia skúšobnej frekvencie pri detekcii vnútorných chýb zvarov tlakovej nádoby reaktora

Pri kvalifikácii postupu skúšania obvodových zvarov reaktora sme narazili na problém, ako overiť citlivosť techník pre detekciu rovinných chýb vo zvare TNR o hrúbke 140mm. Experimentálne meranie na skúšobných telesách umelými chybami ukázalo, že niektoré chyby sú detekované s malou rezervou odstupu s/š. Pri kvalifikácii sa musí dokázať, že aj chyba s najmenej priaznivou konfiguráciou bude odhalená. Keďže experimentálnych výsledkov nebolo dostatok, resp. umelé chyby z skúšobnom telese neboli dostatočne reprezentatívne, prišli sme k doplneniu experimentu údajmi z modelovania.

Jadrom problému bolo zistiť amplitúdovú odozvu striktno rovinnnej chyby na zmenu orientácie chyby v rovine lomu /sklon chyby/ a v rovine kolmej na rovinu lomu /natočenie chyby/. Ďalej bolo treba vyšetriť vplyv skúšobnej frekvencie na amplitúdovú odozvu, teda či používané skúšobné frekvencie 1 a 2MHz sú optimálne.

Amplitúdová odozva nás zaujíma v porovnaní k úrovni šumu, pretože odstup s/š je faktorom, ktorý rozhoduje o úspešnosti alebo neúspešnosti detekcie. Modelovaním je veľmi obtiažne stanoviť úroveň akustického šumu. Preto prvým krokom bolo stanoviť úroveň šumu kombináciou experimentu a modelovania.

Na vzorke materiálu bol nameraný odstup s/š echa od bočného valcového vývrtu. Modelovaním bola zistený odstup echa od bočného valcového vývrtu od rôzne veľkých náhradných chýb v rozsahu $D_n=0.5$ až 1mm. Týmto spôsobom bolo zistené, že úrovni

šumu pri skúšobnej frekvencii 1MHz zodpovedá $D_n=0.9\text{mm}$, a pri skúšobnej frekvencii 2MHz $D_n=0.5\text{mm}$.

Pri ďalšom modelovaní bol zisťovaný odstup medzi amplitúdou echa od vyšetřovaného reflektora a amplitúdou echa príslušnej náhradnej chyby. Tento rozdiel je rovný odstup s/š.

Keďže vyšetřujeme pomery vo viacerých rovinách, jedná sa o 3-dimenzionálny problém. Preto bolo použité 3D modelovanie. Boli namodelované polia UZ zväzku sond priečných vln 41° s eliptickým meničom o rozmeroch $32\times 36\text{mm}$ a skúšobnej frekvencii 1MHz a 2MHz.

Tieto polia boli vystavené interakcii s rovinnými chybami obdĺžnikového tvaru o dĺžke 16mm a výške 7mm. Postupne boli modelované odozvy chýb rôzneho natočenia a sklonu na oboch skúšobných frekvenciách. Sklon chyby bol v rozsahu $\pm 13^\circ$ a natočenie v rozsahu $\pm 5^\circ$. Tieto údaje zodpovedajú najhoršiemu uvažovanému prípadu.

Súčasťou každého modelu bola aj náhradná chyba reprezentujúca úroveň šumu, aby sa dal z výsledkov priamo odčítať odstup s/š.

Komplikáciou pre skúšaní rôznych zvarov TNR je fakt, že niektoré zvary sa dajú skúšať iba z jednej strany. Preto ďalej uvedené výsledky sú prezentované pre jednostranný prístup, ktorý je pre detekciu nepriaznivejší, ako aj pre obojstranný prístup.

Ďalej treba uviesť, že v prípade natočenej chyby nedosiahneme maximálnu amplitúdu /a teda aj maximálny odstup s/š/ ak je sonda v osi rovinnej chyby, ale vtedy, ak je mierne vyosená. Optimálne vyosenie sondy bolo zistené taktiež modelovaním.

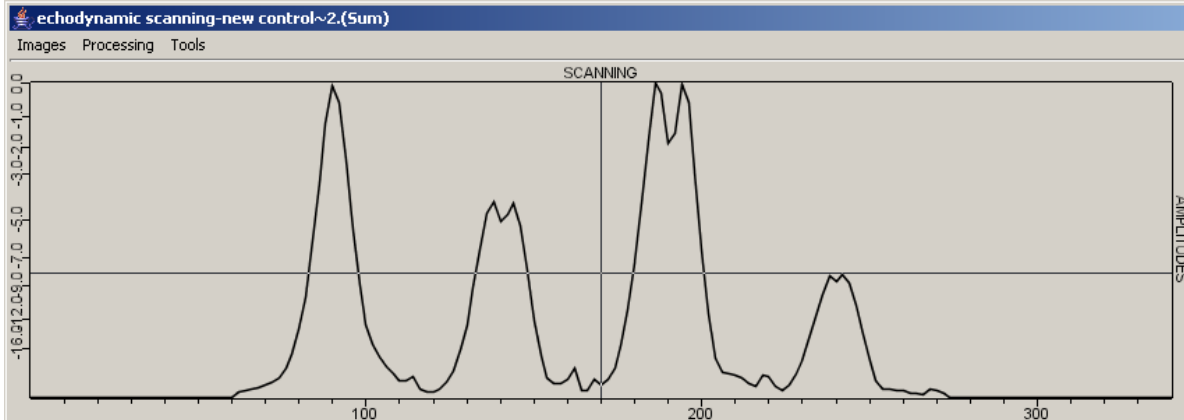
Na obrázkoch a tabuľkách sú výsledky modelovania pre najnepriaznivejšiu kombináciu natočenia a sklonu pri skúšobnej frekvencii 2MHz /hore/ a 1MHz /dole/. Na echodynamickom zobrazení môžeme odčítať amplitúdu indikácie. V tabuľke je prepočítaná na pomerné hodnoty v dB.

Z výsledkov modelovania môžeme odvodiť nasledovné závery:

1. Pri skúške technikami 41° v jednom, alebo oboch smeroch a skúšobnej frekvencii 2MHz nie je zaručená dobrá detekovateľnosť chýb, ak uvažujeme najhorší prípad so sklonom v rozsahu $\pm 13^\circ$, a natočenie 5° .
2. Pri skúšobnej frekvencii 1MHz pri prezvučovaní oboma smermi bude odstup s/š vynikajúci, a bude ešte vyhovujúci aj pri prezvučovaní iba jedným smerom.

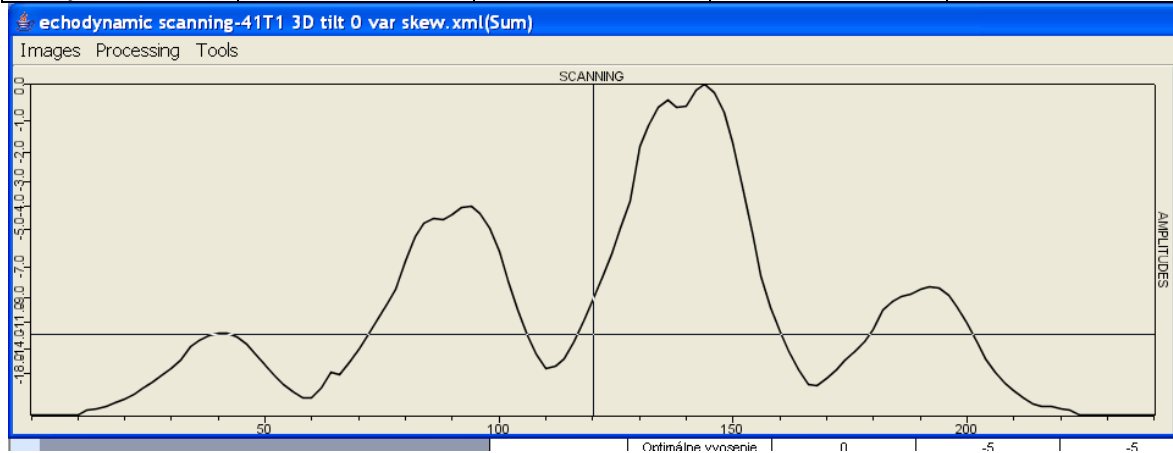
41T2 2MHz

Rozmer reflektora mm	Dn=0.5	16x7	16x7	16x7
Sklon °	41	0	-13	13
Natočenie °	90	85	85	85
Level dB	0	-4	0	-8
Optimálne vyosenie sondy mm	0	-5	-5	-5



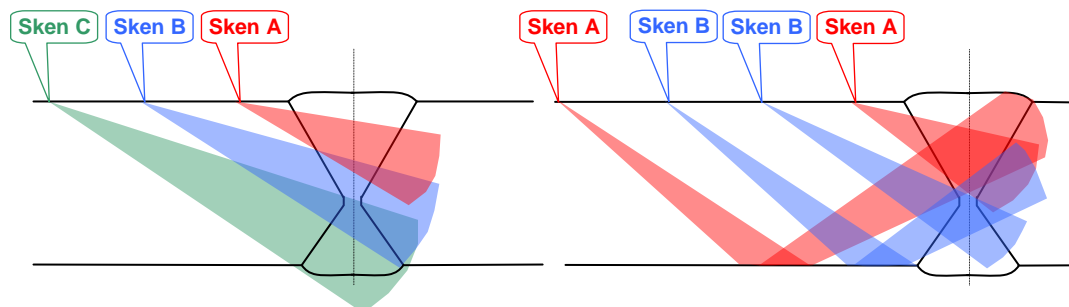
41T1 1MHz

Rozmer reflektora mm	Dn=0.9	16x7	16x7	16x7
Sklon °	41	0	-13	13
Natočenie °	90	85	85	85
Level dB	-12	-4	0	-8
Optimálne vyosenie sondy mm	0	-5	-5	-5



Aplikácia 2: Kontrola citlivosti líniových skenov pri skúšaní obvodových zvarov privádzačov na elektrárni Čierny Váh

Pri mechanizovanom skúšaní zvarov veľkej dĺžky s výhodou používame tzv. líniové skeny, pri ktorých sa sondy pohybujú pozdĺž zvaru namiesto tradičného rastrového pohybu. Vykonáva sa viacero skenov /A, B, C/ s rôznou vzdialenosťou sond od zvaru tak, aby UZ zväzok postupne vyplnil požadovaný skúšobný objem zvaru. Na obrázku je znázornený príklad pre techniku s priamym UZ zväzkom /vľavo/ a pre techniku tandem /vpravo/.



Pre základné experimentálne overenie sme použili skúšobné telesá, v ktorých sú zabudované rovinné chyby v rôznej hĺbke. Experimentálne údaje však nepostačovali k tvrdeniu, že celý skúšobný objem je pokrytý pre rôzne orientované rovinné chyby. Problém je v tom, že sondy sa pohybujú v riadkoch pozdĺž zvaru, a je nutné zaistiť dostatočnú citlivosť tak, aby sa vo zvare nenachádzali tzv. „hluché“ miesta.

Problém sme vyšetřili modelovaním. Pre každú techniku skúšania bol namodelovaný referenčný reflektor, na ktorom sa nastavuje citlivosť pri kalibrácii. Referenčný reflektor pre odrazové techniky je bočný valcový vývrt. Referenčný reflektor pre techniky tandem je rovinný reflektor kolmý k povrchu, nachádzajúci sa v priesečníku UZ zväzku prijímača a vysielača.

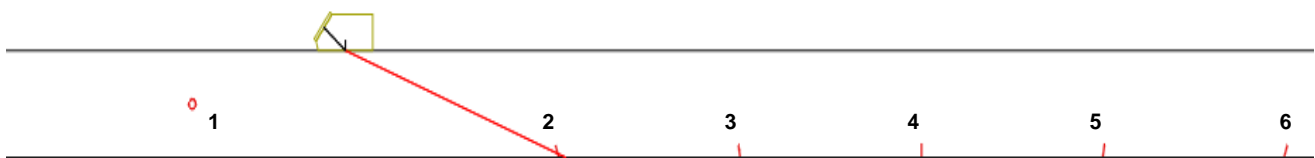
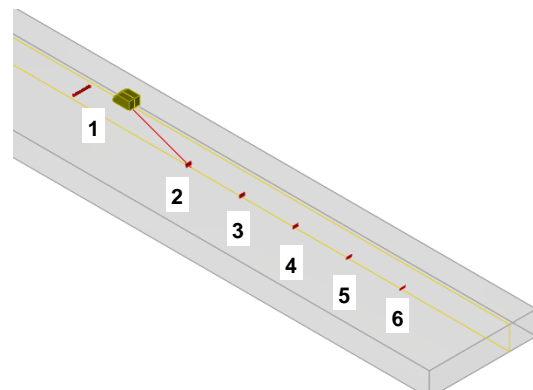
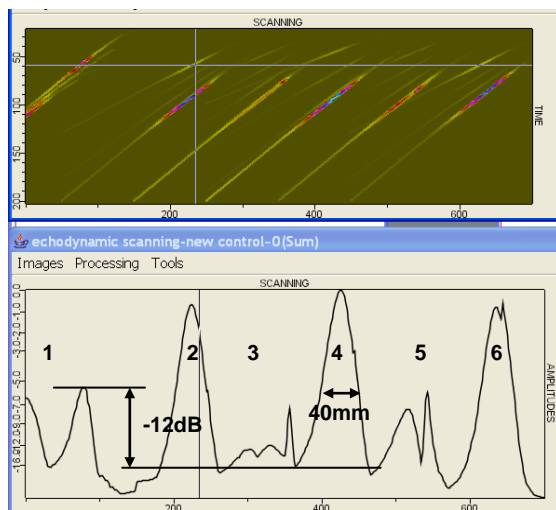
Bola porovnávaná amplitúdová odozva od referenčného reflektora s odozvou od rovinných reflektorov v rôznej hĺbke, s rôznym sklonom a rôznej polohe vzhľadom k osi UZ zväzku, resp. priesečníku UZ zväzkov tandemovej dvojice sond. Na základe poklesu amplitúdy bolo posúdené, či daná konfigurácia skenov dostatočne „vyplňuje“ zvar.

V tomto príspevku nie je priestor na uvedenie všetkých vypočítaných modelov. Na nasledujúcich obrázkoch sú ukázané iba príklady výsledkov simulácie.

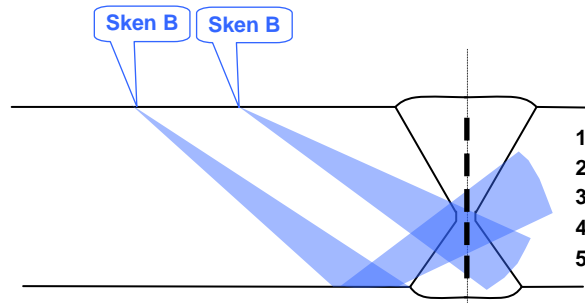
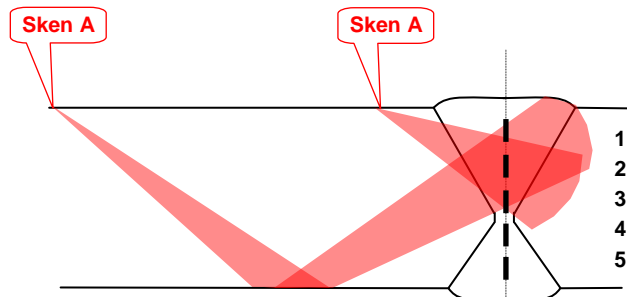
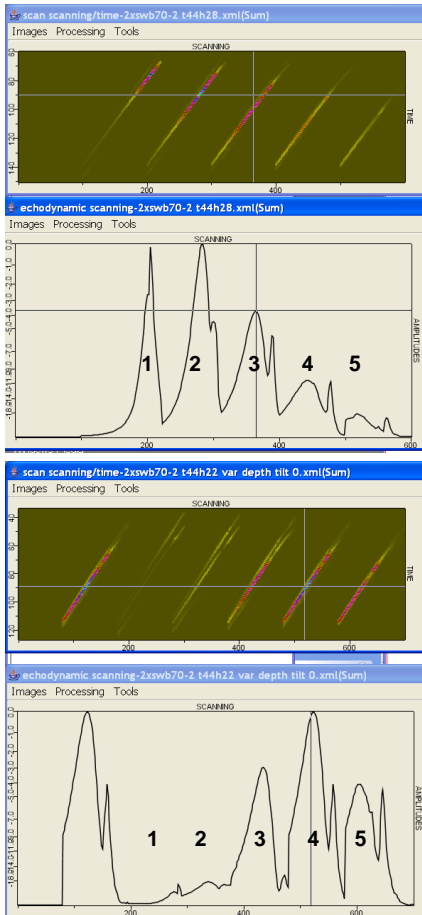
Prvý obrázok ukazuje model interakcie jednoneničovej uhlovej sondy priečných vln 70° s rovinnými reflektormi /2 až 5/ umiestnenými na protiľahlom povrchu pod rôznym sklonom od -20° až +20°. Ako referenčný reflektor je použitý bočný valcový vývrt o priemere 4mm /1/.

Z echodynamického zobrazenia sa dá vyčítať:

1. Kolísanie amplitúdy +/- 6dB v porovnaní s referenčným reflektorom, v závislosti od sklonu reflektora
2. Šírka echodynamiky pre pokles 6dB je asi 40mm, čo je menej ako vzdialenosť stôp, v ktorých sa pohybujú sondy v jednotlivých skenoch. Z toho vyplýva dobré prekrytie stôp.
3. Odozva na rovinný reflektor na protiľahlom povrchu je asi -12dB v porovnaní s referenčným reflektorom, pri najnepriaznivejšej kombinácii sklonu a polohy reflektora vzhľadom k osi UZ zväzku,



Druhý obrázok ukazuje model interakcie dvoch tandemov fokusovaných do rôznej hĺbky, s rovinnými reflektormi kolnými k povrchu umiestnenými v rôznych hĺbkach. Z echodynamického zobrazenia je možné odčítať amplitúdy odoziev. Je zrejmé, že každý z oboch tandemov dobre pokrýva oblasť ideálneho odrazu a jeho okolie. Stred hrúbky je pokrytý oboma tandemami – detekčná schopnosť techník sa tu prekrýva.



Validácia modelov

Model je z fyzikálneho, matematického aj softwarového hľadiska veľmi zložitý nástroj a je nutná jeho validácia, t.j. porovnanie jeho odozvy na odozvu nameranú pri praktickom experimente. Samozrejme validáciu je možné naraz vykonať iba pre určitý obor vstupných údajov, t.j. geometriu, materiál, typ chyby apod. Tvorca modelu validuje svoj software pre rôzne aplikácie.

Je pravdou, že čím realistickejšie podmienky skúšky chceme modelovať, tým je validácia obtiažnejšia. Napr. prechod UZ zväzku austenitickým zvarom je veľmi ťažké modelovať, pretože v prvom rade potrebujeme matematický model štruktúry zvaru a tá môže byť premenlivá aj v jednom zvare. O to ťažšie je validovať model pre takýto komplexný prípad.

Uvedený príklad nám poslúži pre tvrdenie, že modelovanie nie je v defektoskopii použiteľné osamote, bez praktického experimentu. Nie je namieste slepá dôvera v model, ak nebolo vykonané aj adekvátne meranie na vzorke. Modelovanie môže doplniť informácie získané pri experimente, môže interpolovať jeho výsledky, alebo dokonca extrapolovať tam, kde experiment z rôznych dôvodov nie je možné realizovať.