

BEZPEČNOSTNÍ NÁVODY SÚJB

Bezpečné využívání jaderné energie a ionizujícího záření

Stanovení nejistoty u výsledků ultrazvukového zkoušení

Jaderná bezpečnost

BN-JB-5.7 (Rev.0.0)



STÁTNÍ ÚŘAD
PRO JADERNOU
BEZPEČNOST

HISTORIE REVIZÍ

Revize č./č.j.	Účinnost od	Garant	Popis či komentář změny
0.0/SÚJB/OHSKaM/19943/2026	15. 6. 2026	Dlouhá	Nově vypracovaný návod

Jaderná bezpečnost

Bezpečnostní návod STANOVENÍ NEJISTOTY U VÝSLEDKŮ ULTRAZVUKOVÉHO ZKOUŠENÍ

Vydal: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, Praha, červen 2026

Č.j: SÚJB/OHSKaM/19943/2026

BN-JB-5.7 (Rev. 0.0)

Účelová publikace bez jazykové úpravy, připomínky směřujte na adresu:
připomínky_navody@sujb.gov.cz

OBSAH NÁVODU

Použité zkratky a pojmy	3
1. Úvod	5
1.1 Důvod vydání	5
1.2 Cíl.....	5
1.3 Působnost	5
1.4 Platnost	5
2. Vlastní návod.....	6
2.1 Předmět návodu	6
2.2 Účel návodu	6
2.3 Pravidla rozhodování	6
2.3.1 Binární rozhodnutí pro pravidlo jednoduchého přijetí.....	6
2.3.2 Binární rozhodnutí s vyjádřením nejistoty.....	6
2.4 Úrovně nejistoty u výsledku zkoušení	7
2.5 Postup stanovení nejistoty u výsledku zkoušení	8
3. Technické vymezení	10
3.1 Charakteristika oblasti zkoušení	10
3.2 Požadavky na NDT systém	10
3.3 Požadavky na stanovení nejistoty.....	10
3.4 Seznam dostupných zkušebních těles	10
4. Technická analýza zkoušení	11
4.1 Popis výchozích požadavků.....	11
4.2 Posouzení ovlivňujících a základních parametrů zkoušení	11
4.3 Stanovení programu RRT	11
4.4 Personální požadavky na RRT	12
4.5 Přístup ke statistickému vyhodnocení dat z RRT	12
4.6 Požadavky na formu výsledku nejistoty.....	12
4.7 Požadavky na soubor dokumentů z realizace stanovení nejistoty.....	12
5. Metodika zkoušení pro stanovení nejistoty.....	14
6. Statistické zpracování dat	15
6.1 Typy nejistot a jejich stanovení.....	15
6.1.1 Nejistoty typu A	15
6.1.2 Nejistota typu B	16
6.1.3 Kombinovaná nejistota	17
6.1.4 Rozšířená nejistota.....	17
6.2 Zpracování dat	18
6.2.1 Proces zpracování dat	18
6.2.2 Analýza dat.....	21
7. Závěr.....	23
Literatura.....	24
Zpracovatelé	25
Garant	25

POUŽITÉ ZKRATKY A POJMY

Zkratky

ENIQ	European Network for Inspection and Qualification
IK	instrukce
IP	Inspekční postup
JE	jaderná elektrárna
NDT	nedestruktivní zkoušení (Non-Destructive testing)
PAUT	ultrazvukové zkoušení technikou Phased Array
PEUT	ultrazvukové zkoušení technikou impulsní odrazovou (Pulse-Echo)
RMSE	Root Mean Square Error (střední kvadratická chyba)
RRT	Round Robin Test
SNETP	Sustainable Nuclear Energy Technology Platform
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
TAČR	Technologická agentura ČR
UT	ultrazvukové zkoušení

Pojmy

Diversifikace souboru – rozdělení dat do podsouborů podle parametrů zkoušení, tj. vybrané parametry zkoušení jsou shodné pro všechna data v daném souboru

Dokumentace ENIQ – dokumentace vydávaní sdružením ENIQ

ENIQ – sdružení provozovatelů JE zabývajících se kvalifikací NDT a rizikově orientovanými provozními kontrolami JE (European Network for Inspection & Qualification), které tvoří Technickou oblast 8 asociace NUGENIA v rámci organizace Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP)

Chyba zkoušení – výsledek zkoušení minus reálná hodnota hodnocené veličiny [1]

Interval spolehlivosti – udává hodnotu, v jakém rozmezí se s určitou pravděpodobností nachází skutečná hodnota měřené veličiny

Koeficient rozšíření – faktor, kterým se násobí kombinovaná standardní nejistota, aby se získal interval s požadovanou úrovní spolehlivosti

Kontrola – činnost realizovaná pomocí metody NDT, která má za cíl identifikovat působení degradačního mechanismu způsobeného stárnutím nebo podmínkami, které by mohly vést k poruše zařízení

Kritérium UT – maximální přípustná chyba zkoušení stanovená pro použitý UT systém

Kvantitativní zkoušení – zkoušení, při kterém se získávají číselná data, která lze hodnotit a analyzovat pomocí statistických metod

Měřicí systém – zahrnuje měřicí prvky zajišťující získání dat při zkoušení (UT přístroj se softwarem, UT sondy, kabeláž, akustická vazba a měřky)

Nejistota – parametr spojený s výsledkem měření, který charakterizuje rozptýlení hodnot, které mohou být důvodně přiřazeny k měřené veličině [1]

NDT systém – systém skládající se z inspekčního postupu/instrukce, personálu a měřicího systému

Odchylka zkoušení – rozdíl mezi naměřenou hodnotou a referenční hodnotou stanovenou jako průměr, střední hodnota, očekávaná hodnota atd.

Ovlivňující parametry – parametry NDT systémů, zkoušené komponenty a necelistvosti, které mohou mít dopad na hodnotu u výsledku zkoušení (např. druh akustické vazby, parametry UT sondy, parametry vady atd.)

Pracovník NDT – pracovník provádějící nedestruktivní zkoušení a vyhodnocení výsledků, který splňuje požadavky na kvalifikaci stanovenou provozovatelem

Provozovatel – držitel povolení k provozu jaderných zařízení dle § 9 odst. 1 písm. d) zákona č. 263/2016 Sb.

Parametr – proměnná sloužící k popisu nebo charakterizaci určitého systému, procesu, funkce nebo hodnot

Round robin test – mezilaboratorní porovnání nebo intralaboratorní porovnání výsledků zkoušení s využitím různých pracovníků

Řešitel – osoba, která zajišťuje proces stanovení nejistoty zkoušení

Technické vymezení – dokument, který podrobně popisuje použitý NDT systém a specifikuje požadavky na proces a výstupy zkoušení

Základní parametry – ovlivňující parametry, které mají průkazný vliv na výsledky zkoušky, u nichž v případě překročení jejich limitních hodnot nelze považovat dosažené výsledky za relevantní, resp. výsledky zkoušení nelze hodnotit ve společném souboru dat

Žadatel – organizace/společnost, která vznesla požadavek na stanovení nejistoty u výsledku NDT

1. ÚVOD

1.1 Důvod vydání

Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB) je ústředním orgánem státní správy, který vykonává státní správu při mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření a v oblasti zákazu chemických a biologických zbraní.

V souladu se zákonem č. 263/2016 Sb., atomový zákon, [3] je držitel povolení k provozu jaderného zařízení mimo jiné povinen:

- Soustavně sledovat stav jaderného zařízení a systémů, konstrukcí a komponent od zahájení výstavby jaderného zařízení až do jeho vyřazení z provozu z hlediska provádění procesu řízeného stárnutí podle programu řízeného stárnutí.
- Zajistit dokumentování prověřování shody vybraného zařízení s technickými požadavky a prokázat SÚJB připravenost jaderného zařízení a pracovníků k opětovnému uvedení jaderného reaktoru do kritického stavu po výměně jaderného paliva těmito dokumenty.
- Zajistit a využívat personální, technické, materiálové a finanční zdroje, včetně vhodného pracovního prostředí, které jsou nezbytné k zajišťování a zvyšování úrovně jaderné bezpečnosti, radiační ochrany, technické bezpečnosti, monitorování radiační situace, zvládnutí radiační mimořádné události a zabezpečení.

Jedním z průkazů stavu zařízení s vlivem na jadernou bezpečnost jsou výsledky zkoušení/kontrol pomocí zvláštního procesu nedestruktivního zkoušení. Uvádění nejistot u výsledků UT podává informaci o přesnosti a spolehlivosti výsledků kontrol a tím zvyšuje úroveň jaderné a technické bezpečnosti.

1.2 Cíl

Cílem Bezpečnostního návodu je definovat postup a soubor doporučení pro vyhodnocení nejistoty vznikající při stanovení rozměrů a pozice nečistoty při provádění nedestruktivního zkoušení, konkrétně při zkoušení metodou UT.

Návod vychází z mezinárodně přijímaných a ověřených postupů statistického zpracování dat a dále z výsledků a výstupů projektu TAČR THÉTA TK04010018.

1.3 Působnost

Bezpečnostní návod slouží jako návod pro zajištění jaderné a technické bezpečnosti s ohledem na stávající úroveň vědy a techniky a správné praxe při vyhodnocení výsledků zkoušek prováděných ultrazvukovými metodami nedestruktivního zkoušení.

1.4 Platnost

Tento Bezpečnostní návod je navržen pro postupy ultrazvukového zkoušení realizované technikami impulsní odrazovou (PEUT) a phased array (PAUT), které jsou používány při provozních kontrolách. Návod vychází z požadavků definovaných normami pro ultrazvukové zkoušení a standardů při stanovování statistických parametrů [1], [2].

Návod se doporučuje použít v případech, kdy nejistota zkoušení není známa z jiných zdrojů a je významná pro platnost nebo aplikaci výsledků zkoušek zařízení s vlivem na jadernou bezpečnost.

2. VLASTNÍ NÁVOD

2.1 Předmět návodu

Tento návod stanovuje obecný přístup k hodnocení výsledků zkoušení, včetně postupu stanovení nejistoty zkoušení a statistických parametrů souboru dat získaných při hodnocení výsledků v oblasti ultrazvukového zkoušení (UT) technikami PEUT a PAUT.

2.2 Účel návodu

Účelem Bezpečnostního návodu je vytvořit metodický postup pro hodnocení výsledků s deklarovanou přesností pro ultrazvukové zkoušení technikami PEUT a PAUT.

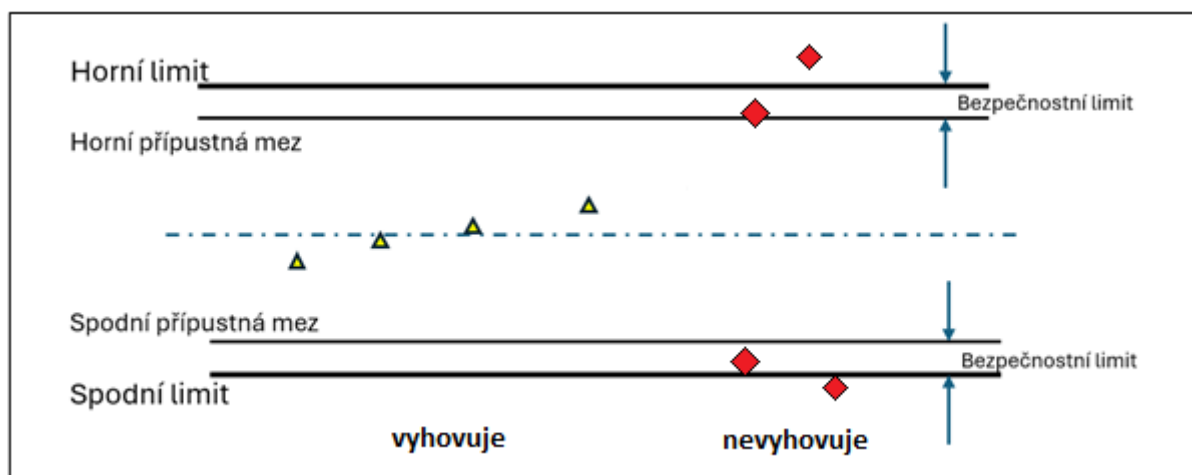
2.3 Pravidla rozhodování

Při nedestruktivním zkoušení (NDT) se zpravidla používá tzv. binární rozhodovací pravidlo o výsledku NDT, kdy je výsledek omezen na dvě možnosti – vyhovující, nebo nevyhovující.

2.3.1 Binární rozhodnutí pro pravidlo jednoduchého přijetí

Výsledek se hodnotí jako:

- Vyhovující – naměřená hodnota je v mezích přípustnosti, tj. nad spodní a pod horní mezí přípustné meze.
- Nevyhovující – naměřená hodnota je nad/pod mezí přípustnosti.

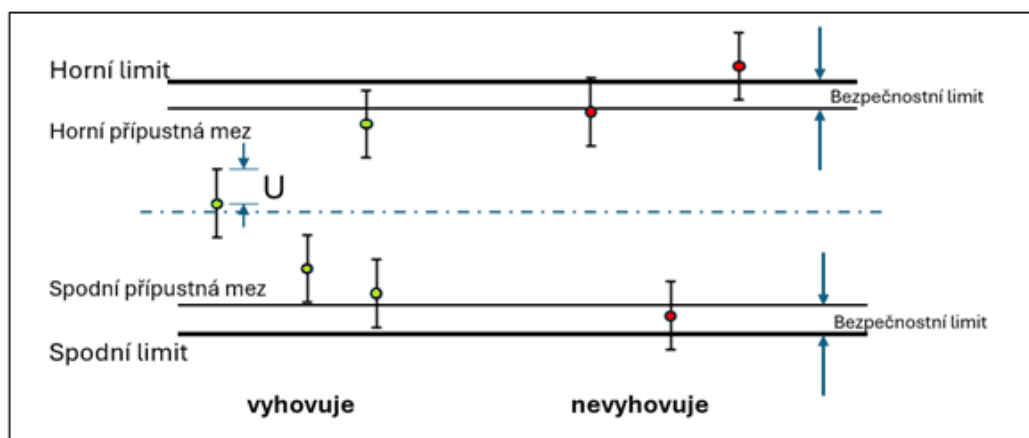


Obr. 1: Binární rozhodnutí pro pravidlo jednoduchého přijetí

2.3.2 Binární rozhodnutí s vyjádřením nejistoty

Výsledek se hodnotí jako:

- Vyhovující – přijetí, když výsledek s hodnotou U je pod limitní hodnotou.
- Nevyhovující – odmítnutí, když výsledek s hodnotou U je nad limitní hodnotou.
- U vyjadřuje odchylku nebo nejistotu zkoušení.



Obr. 2: Binární rozhodnutí pro pravidlo s nejistotou

2.4 Úrovně nejistoty u výsledku zkoušení

Uvedení nejistoty u výsledku zkoušení závisí na požadavku o průkazu možné chyby zkoušení a jejím dokladování. U hodnocení výsledků zkoušení se doporučuje postupovat pomocí odstupňovaného přístupu v závislosti na úrovni čerpání projektové rezervy zařízení s vlivem na jadernou bezpečnost.

Přístupy k uvádění nejistoty výsledků zkoušení jsou rozděleny do následujících úrovní:

1. Hodnocení dle zadání provozovatele – bez vyjádření nejistoty

Vyhodnocení UT je provedeno podle kritérií přípustnosti podle technické dokumentace (norma, postup, instrukce, ...). UT je realizované bez požadavku na vyjádření nejistoty výsledků zkoušení.

2. Stanovení chyby a RMSE zkoušení

Jedná se o vyhodnocení velikosti chyby, tedy rozdílu mezi naměřenou hodnotou a reálným rozměrem/pozicí vady. Tento přístup lze použít v případě, kdy je možnost porovnat výsledky zkoušení s reálnými rozměry vad ve zkušebním tělese nebo tělesech. Vyhodnocení se provádí porovnáním chyby zjištěné při zkoušení s maximální přípustnou chybou.

Současně se stanovuje i RMSE. Zjištění RMSE zkoušení od reálných rozměrů vad poskytuje kvantitativní hodnotu pro posouzení přesnosti zkoušení a variability chyb měřicího systému v celém rozsahu rozměrů měřené komponenty. RMSE je stanovena na základě omezeného počtu vad ve zkušebních tělesech, které jsou často navrženy jako nejnepříznivější případ („worst case“).

Výpočet RMSE pro diskrétní data:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

RMSE – střední kvadratická chyba [-];
 n – počet měření;
 \hat{y}_i - naměřená hodnota i-té vady
 y_i – skutečná hodnota i-té vady [-];

V tomto případě se nejistota typu A nestanovuje, rovněž nejsou analyzovány ovlivňující parametry pro stanovení nejistoty typu B, jak je uvedeno v následujících podkapitolách.

3. Stanovení nejistoty typu B

Stanovení nejistoty typu B – je provedena analýza procesu zkoušení a nejistota je určena na základě posouzení ovlivňujících parametrů (zdrojů nejistot). Jsou identifikovány základní parametry, pro které jsou kvalifikovaně stanoveny dílčí nejistoty (možné chyby výsledku) podle dostupných informací, jako např. technické kalibrační listy, normy, postupy zkoušení a vyhodnocení dat. Při použití tohoto přístupu není potřeba provádět RRT pro stanovení nejistoty typu U_A .

Nejistota typu B udává rozsah nejistoty pro zvolený NDT systém z pohledu vlivu základních parametrů bez vztahu ke skutečnému rozměru vady, proto je nutno provést ověření přesnosti NDT systému.

Stanovení nejistoty se provádí podle kap. 6.1.2.

4. Stanovení nejistoty typu A a kombinované nejistoty zkoušení

Nejistota typu A je vždy stanovována pro konkrétní typ vady, která je za tímto účelem vytvořena ve zkušebním tělese/tělesech. Pro získání požadovaného počtu výsledků zkoušení je navržen a realizován program RRT. Z programu RRT je získán datový soubor, ze kterého je stanovena nejistota zkoušení typu A a další parametry popisující tento soubor. To slouží k ověření parametrů výsledků pro splnění kritérií pro ultrazvukové zkoušení.

Současně je provedena analýza ovlivňujících parametrů a jsou určeny základní parametry pro stanovení nejistoty typu B. Poté je stanovena kombinovaná nejistota zkoušení.

Stanovení kombinované nejistoty se provádí podle kap. 6.1, postup vyhodnocení dat se provádí podle kap. 6.2.1.

2.5 Postup stanovení nejistoty u výsledku zkoušení

Pro zkoušení s požadavkem na vyjádření nejistoty lze kombinovat přístupy uvedené pro úroveň 3 a 4, kdy pouze pro vybraný případ (rozměr, orientaci a pozici) vady je možné vyžadovat stanovení nejistoty podle úrovně 4.

Pro měření tloušťky ultrazvukem je třeba postupovat minimálně podle úrovně 3.

Podle stanovených základních parametrů a technických možností na realizaci RRT je zvolen postup pro vyjádření nejistoty u výsledku zkoušení. Postup je zvolen na základě přiblížení experimentálního zkoušení k reálnému zkoušení a zahrnutí základních parametrů do experimentu:

- a) Všechny základní parametry jsou zahrnuty experimentálním programem RRT při stanovování nejistoty zkoušení – je stanovena nejistota typu A a případně její rozšířená nejistota.
- b) Pouze část základních parametrů je zohledněna při experimentálním programu, druhá část základních parametrů je definována pomocí nejistoty typu B, dále je stanovena kombinovaná nejistota a z ní rozšířená nejistota.

Pro vyjádření nejistoty typu A, resp. kombinované nejistoty [1] a dalších statistických hodnot (úroveň 4), které charakterizují datový soubor, je nutné získat dostatečné množství dat na odpovídajícím zkušebním vzorku.

Postup stanovení nejistoty pro úroveň 4 je nutné realizovat v následujících krocích:

1. Stanovení oblasti zájmu pro stanovení nejistoty a podmínek pro provádění zkoušení – je definováno v Technickém vymezení – viz kap. 3.

2. Analýza procesu zkoušení a vyhodnocení – stanovení ovlivňujících a základních parametrů zkoušení a návržení programu RRT pro získání požadovaných dat – vypracována Technická analýza zkoušení – viz kap. 4.
3. Vypracování metodiky, podle které je prováděno zkoušení, vyhodnocení dat a jejich zpracování do požadovaných výstupů pro konkrétní případ zkoušení – metodika zkoušení – viz kap. 5.
4. Realizace RRT.
5. Statistické zpracování dat – slouží ke stanovení nejistoty zkoušení a dalších statistických hodnot ze souboru dat, které byly získány při RRT – viz kap. 6.
6. Vyjádření nejistoty – technická zpráva/protokol obsahují výsledky nejistoty pro daný konkrétní příklad vady nebo skupiny vad – viz kap. 4.6.
7. Zpracování dokumentace prokazující způsob stanovení nejistoty – viz kap. 4.7.

V případě pouze stanovení nejistoty typu B u výsledku zkoušení (úroveň 3) je postup realizován pomocí následujících kroků:

1. Stanovení oblasti zájmu pro stanovení nejistoty a podmínek pro provádění zkoušení – Technické vymezení – viz kap. 6.
2. Analýza procesu zkoušení a vyhodnocení – stanovení ovlivňujících a základních parametrů zkoušení a ocenění jejich vlivu na hodnotu výsledku. Součástí je stanovení nejistoty typu B pro úroveň 3 – Technická analýza zkoušení (kap. 4.1, 4.2, 4.6 a 4.7)

V případě, že dokumentace vytvořená pro úrovně 1 a 2 obsahově splňují požadavky na dokumentaci požadovanou pro úroveň 3 a 4 (viz kap. 3, 4 a 5), lze jimi tuto dokumentaci nahradit.

3. TECHNICKÉ VYMEZENÍ

V technickém vymezení jsou uvedeny výchozí požadavky pro stanovení nejistot UT. Tyto požadavky vypracuje Žadatel ve spolupráci s Provozovatelem. Tyto vstupní informace slouží pro definování ovlivňujících parametrů NDT systému, stanovení přístupu ke stanovení nejistoty, návrh experimentálního programu a stanovení rozsahu RRT programu pro stanovení nejistoty zkoušení.

Pokud již existuje jiný dokument, který obsahově naplňuje Technické vymezení, není potřeba tento dokument tvořit.

3.1 Charakteristika oblasti zkoušení

V technickém vymezení je definována zkoušená komponenta a podmínky pro realizaci zkoušení.

Popis musí obsahovat, pro jaké kontrolní místo je zkoušení prováděno, zejména geometrie a materiál zkoušené oblasti. Dále jsou zde uvedeny podmínky pro zkoušení jako je např. přístupnost ke kontrolovanému místu, pracovní podmínky atd.

Dále je nutné uvést pro jaký typ vad, orientaci a pozici budou nejistoty stanovovány, a to včetně kritérií přípustnosti těchto vad, pokud jsou známy.

3.2 Požadavky na NDT systém

V dokumentu je popsán NDT systém pro ultrazvukové zkoušení, pro který je stanovována nejistota. Součástí popisu NDT systému je:

- inspekční postup a instrukce zkoušení UT,
- charakteristika měřicího zařízení,
- vyhodnocovací software,
- definice požadavků na personál provádějící UT.

3.3 Požadavky na stanovení nejistoty

V dokumentu je definováno, pro jaké parametry a podmínky zkoušení bude nejistota stanovena:

- geometrie a rozměry zkoušené oblasti,
- materiálové parametry,
- prostorová omezení pro zkoušení,
- parametry prostředí,
- parametry místa měření na komponentě (odstranění barvy, drsnost povrchu apod.).

3.4 Seznam dostupných zkušebních těles

V dokumentu je uveden seznam a parametry dostupných zkušebních těles, která jsou k dispozici pro realizaci RRT.

4. TECHNICKÁ ANALÝZA ZKOUŠENÍ

Řešitel provádějící stanovení nejistot UT zpracuje technickou analýzu, které musí obsahovat minimálně informace uvedené v kap. 4.1 až 4.7. Dokument se vypracovává v případě stanovení nejistoty podle úrovně 3 a 4 kap. 2.4.

4.1 Popis výchozích požadavků

Popis a kontrola úplnosti výchozích požadavků pro realizaci stanovení nejistoty.

4.2 Posouzení ovlivňujících a základních parametrů zkoušení

Pro vyjádření nejistoty zkoušení je nutná znalost celého procesu zkoušení včetně vyhodnocení. Analýza procesu umožní stanovení ovlivňujících parametrů a z nich určení základních parametrů zkoušení mající zásadní dopad na výsledek. Tyto parametry souvisejí s přesností a opakovatelností UT dat a jejich interpretací.

Pro stanovení ovlivňujících parametrů zkoušení je nutné provést analýzu procesu zkoušení a vyhodnocení dat. To znamená zjistit všechny činnosti a zařízení, které do procesu vstupují a identifikovat vlivy (parametry), které se mohou měnit a mají vliv na výslednou hodnotu u nalezené indikace vady.

Proces zkoušení a zhodnocení parametrů musí být proveden pro následující oblasti:

1. **Měřicí systém** (UT přístroj se softwarem, UT sondy, kabeláž, akustická vazba a měrky)
2. **Dokumentace** (inspekční postup, resp. instrukce, případně normy a předpisy)
3. **Personál** (kvalita školení, praxe, znalost problematiky UT včetně kontrolovaného objektu)
4. **Podmínky zkoušení** (pracovní podmínky, rozdíly oproti laboratorním zkušebním tělesům atd.)

4.3 Stanovení programu RRT

Pro stanovení nejistoty zkoušení na úrovni 4 dle kap. 2.4 musí být navržen experimentální program pro realizaci zkoušení. Součástí hodnocení musí být provedena detailní analýza předmětu reálného zkoušení a stanoven požadavek, jaké parametry budou zahrnuty mezi nejistoty typu A, a jaké budou zahrnuty mezi nejistoty typu B. Na základě analýzy je Řešitelem stanoven rozsah experimentálního programu, který zahrnuje:

- geometrie a materiál zkušebního tělesa
- typ, počet a rozměry vad
- pozice vad v tělese
- podmínky a způsob zkoušení
- počet pracovníků provádějících zkoušku (minimálně 3 pracovníci)

4.4 Personální požadavky na RRT

V technické analýze je definováno, jaké množství dat, respektive objem zkoušení, je nutné získat během RRT pro statistické zpracování dat. Pro zajištění odpovídajícího množství dat musí být stanoven min. počet NDT pracovníků, počet měřených vad, hodnocené veličiny jako např. hloubka vad, délka vad, pozice vad apod. Dále je určen postup zkoušení, počet opakování zkoušení a forma vyhodnocení zkoušení.

Doporučené složení pracovního týmu RRT je následující:

1. Předseda týmu RRT
2. Člen týmu – statistik
3. Člen týmu – vedoucí NDT
4. Personál NDT

Požadavky na jednotlivé členy týmu RRT jsou definovány v Metodice zkoušení pro stanovení nejistoty (kap. 5) a musí být v souladu s požadavky Provozovatele a platných standardů. Pro zajištění posouzení vlivu personálu na výsledek zkoušení je nutné, aby zkoušení prováděli min. 3 pracovníci NDT (v odůvodněných případech to mohou být 2 pracovníci).

4.5 Přístup ke statistickému vyhodnocení dat z RRT

Typ nejistoty, který je stanovován u výsledku zkoušení, je určen stanovenými základními parametry, jeho předpokládaným vlivem na výsledek (podle konfigurace zkoušené oblasti a použitého NDT systému) a realističností RRT programu vzhledem k reálným podmínkám zkoušení. Typy nejistot a jejich stanovení je popsán v kap. 6.1 a požadavky a postup na zpracování dat jsou uvedeny v kap. 6.2.

Žadatel Řešiteli odsouhlasí zvolený přístup.

4.6 Požadavky na formu výsledku nejistoty

Při kvantitativním měření nebo zkouškách je výstupem vždy určitá hodnota, která by měla být vyjádřena v jednotkách SI.

Pokud má být naplněn požadavek normy ISO/IEC 17025 [2], součástí výsledku je i určitý typ sdružené nejistoty. Jakmile bude proveden výpočet nejistoty pro stanovenou hladinu spolehlivosti (rozšířená nejistota), měl by být pro dané zkoušení uveden **výsledek zkoušky a rozšířená nejistota U** ve formátu $y \pm U$.

4.7 Požadavky na soubor dokumentů z realizace stanovení nejistoty.

Součástí výsledků a stanovení nejistoty zkoušení je i soubor dokumentace z realizace a stanovení nejistoty UT. Dokumentace k stanovení nejistoty u výsledku zkoušení pro úroveň 4 dle kap. 5.3 musí obsahovat následující dokumentaci (případně jinou naplňující obsahem níže uvedenou):

1. technické vymezení
2. technickou analýzu
3. Metodiku pro stanovení nejistoty zkoušení
4. soubor naměřených dat ze zkoušek v RRT

5. technickou zprávu / protokol ze statistického zpracování dat změřených v RRT a vyjádřením nejistoty
6. IP, instrukci
7. průkazy kvalifikace defektoskopického personálu
8. doklad o platné kalibraci použitého měřicího zařízení

V případě stanovení nejistoty úrovně 3 dle kap. 2.4 bude dokumentace omezena na následující dokumenty:

1. technické vymezení,
2. technická analýza zkoušení s vyjádřením hodnoty pro nejistotu typu B,
3. IP, instrukce,
4. doklad o platné kalibraci použitého měřicího zařízení.

5. METODIKA ZKOUŠENÍ PRO STANOVENÍ NEJISTOTY

Na základě dokumentů popisujících požadavky pro stanovení nejistoty zkoušení a NDT systém (technická vymezení), analýzy procesu zkoušení a jeho vlivu na nejistotu měření (viz technická analýza zkoušení) pro stanovení nejistot UT zpracuje Řešitel metodiku zkoušení pro stanovení nejistoty (dále Metodika). Metodika definuje postup, podle kterého je prováděno zkoušení, vyhodnocení dat a jejich zpracování do požadovaných výstupů pro konkrétní případ zkoušení.

Doporučený obsah Metodiky je následující:

1. účel a rozsah platnosti metodiky
2. popis NDT systému (popis zkoušené oblasti, předpokládaných necelistvostí, popis měřicích přístrojů, inspekční postup, podmínky pro zkoušení)
3. stanovení programu RRT (požadavky na tým, rozsah experimentálního zkoušení, podmínky pro vyhodnocení dat atd.)
4. požadavky na výstup z RRT (typ a způsob záznamu dat)
5. postup zpracování dat a stanovení nejistoty pro vybrané hodnoty zkoušení
6. vyjádření nejistoty
7. požadavky na vstupní a výstupní dokumentaci

Metodika pro stanovení nejistot by měla obsahovat i požadavky na způsob a záznam dat. Podle Metodiky musí být pro všechny záznamy stanoven způsob odečtu hodnot včetně jejich zaokrouhlování a ukládání do databáze, aby nedošlo k ovlivnění výsledku.

Určené hodnoty ze zkoušení pro stanovení nejistoty je třeba uvádět v řádu o jeden menší, než je standardně uváděna hodnota v protokolu, aby nedošlo k ovlivnění výsledků vlivem zaokrouhlování a skokové distribuci dat.

V případě PEUT a PAUT by se měly výsledky měření uvádět v desetinách mm.

6. STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ DAT

Statistické zpracování dat slouží k stanovení nejistoty zkoušení a dalších statistických hodnot ze souboru dat, které byly získány při RRT. Cílem je charakteristika datového souboru naměřených hodnot a určení spolehlivosti.

V kap. 6.1 jsou uvedeny typy nejistot a jejich matematické vyjádření. V kap. 6.2 je zpracován doporučený postup zpracování dat získaných v rámci RRT.

6.1 Typy nejistot a jejich stanovení

Podle rozsahu experimentálních měření realizovaných pro vyjádření nejistoty zkoušení je stanoveno, jakou nejistotu je v rámci RRT možno stanovit (viz odstupňovaný přístup kap. 2.4) a jakým způsobem bude interpretována hodnota nejistoty zkoušení [1].

6.1.1 Nejistoty typu A

Mezi složky nejistoty typu A patří složky stanovené pomocí statistického zpracování opakovaných měření. Složky nejistoty typu A jsou charakterizovány odhady rozptylů (s_x^2), a směrodatných odchylek (s_x) stanovených z opakovaných měření. Opakovaným měřením veličiny x získáme n naměřených hodnot: x_1, x_2, \dots, x_n .

Nejistota typu A se určí jako výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru podle vztahu:

$$u_{Ax} = s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} \quad (6.1)$$

u_{Ax} – nejistota měření [-];
 $s_{\bar{x}}$ – směrodatná odchylka výběrového průměru [-];
 s_x – výběrová směrodatná odchylka [-];
 n – počet měření;
 x_i – naměřená hodnota i -tého měření [-];

kdy výběrový průměr \bar{x} je dán vztahem:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.2)$$

\bar{x} – výběrový aritmetický průměr ze souboru měření 1 až n ;
 n – počet měření;
 x_i – naměřená hodnota i -tého měření;

Tento vztah je dle popisné statistiky rovněž definován jako chyba střední hodnoty. Je vždy definován pro danou pravděpodobnost, s jakou lze v intervalu $(k \cdot u = U) - X + (k \cdot u = U)$ hodnotu nalézt. To je následně vázáno na koeficient rozšíření k , viz kap. 6.1.4.

6.1.2 Nejistota typu B

Vyhodnocení nejistot typu B je založeno na jiných než statistických přístupech. Nejistota je určena podle identifikovaných ovlivňujících a následně základních parametrů, tj. zdrojů nejistot. Pro tyto parametry jsou kvalifikovaně stanoveny dílčí nejistoty na základě všech možných a dostupných informací:

- údaje výrobce o měřicí technice
- zkušenosti z předchozích měření
- zkušenosti s vlastnostmi chování materiálů a techniky
- údaje získané při kalibraci a z certifikátů
- nejistoty referenčních údajů v příručkách

Nejistoty, které vznikají při jednotlivých měřeních, mohou být způsobeny dvěma třídami chyb – systematickými chybami a náhodnými chybami. Určení standardní nejistoty typu B u každého zdroje je možné provést jedním z uvedených způsobů:

- Převzetím hodnot nejistot z technické dokumentace: certifikace, kalibrační listy, technické normy, údaje výrobců použitých zařízení, tabulky technických a fyzikálních konstant. Tyto hodnoty jsou ale též zatíženy nejistotou.
- Odhadem standardní nejistoty: nejprve se určí maximální očekávaná chyba hodnoceného parametru $\pm z_{max}$ od nominální (skutečné) hodnoty, jejichž překročení je málo pravděpodobné. Posoudí se průběh pravděpodobnosti chyby v tomto intervalu a určí se nejvhodnější aproximace (typ rozdělení). Standardní nejistota typu B spojená s tímto zdrojem se určí ze vztahu:

$$u_{Bx} = \frac{z_{max}}{\chi} \quad (6.3)$$

u_{Bx} – nejistota měření typu B [-];

z_{max} – expertní odhad chyby vznikající při měření [-];

χ – je součinitelem vycházejícího ze zákona rozdělení, kterým se příslušný zdroj nejistoty řídí, takže např. pro normální rozdělení je $k=2$, popř. 3, pro rovnoměrné $k=1.73$ atd. Takto i tyto nejistoty získají charakter směrodatné odchylky.

Pro jednotlivé ovlivňující parametry je nutné stanovit pravděpodobnostní rozdělení výskytu hodnot v daném intervalu [1]. Základní pravděpodobnostní rozdělení výskytu jsou následující:

1. Rovnoměrné (uniformní) rozdělení:
 - Používá se, když máme omezené informace o pravděpodobnostním rozdělení chyby a předpokládáme, že všechny hodnoty v určitém intervalu jsou stejně pravděpodobné.
 - Pokud je nejistota rovnoměrně rozložena v intervalu $\pm a$, standardní nejistota (u) je: $u=3a$
 - Příklad: Pokud výrobce uvádí, že přesnost přístroje je ± 0.02 cm bez dalších specifikací, použijeme rovnoměrné rozdělení.
2. Normální (Gaussovo) rozdělení:
 - Používá se, když jsou chyby měření způsobeny mnoha malými, nezávislými faktory a máme důvod předpokládat, že chyby mají normální rozdělení.

- Pokud je nejistota normálně rozložena s rozptylem (standardní odchylkou) σ , standardní nejistota (u) je: $u=\sigma$
 - Příklad: Pokud máme kalibrační certifikát, který uvádí nejistotu měření s normálním rozdělením, použijeme toto rozdělení.
3. Trojúhelníkové rozdělení:
- Používá se, když je pravděpodobnost výskytu hodnot nejvyšší uprostřed intervalu a klesá lineárně směrem k okrajům.
 - Pokud je nejistota trojúhelníkově rozložena v intervalu $\pm a$, standardní nejistota (u) je: $u=6a$
 - Příklad: Pokud máme odhad nejistoty založený na zkušenostech, kde střední hodnota je pravděpodobněji než krajní hodnoty, použijeme trojúhelníkové rozdělení.
4. U-rozdělení:
- Používá se, když je pravděpodobnost výskytu hodnot vyšší na okrajích intervalu než uprostřed.
 - Pokud je nejistota rozložena podle U-rozdělení v intervalu $\pm a$, standardní nejistota (u) je: $u=2a$
 - Příklad: Toto rozdělení je méně běžné, ale může být použito v situacích, kde jsou extrémní hodnoty pravděpodobněji než střední hodnoty.

6.1.3 Kombinovaná nejistota

Kombinovaná standardní nejistota je výsledek získaný z hodnot stanovených jako standardní nejistota typu A nebo standardní nejistota typu B. Kombinovaná nejistota se rovná kladné hodnotě druhé odmocniny součtu veličin; kde veličiny jsou rozptyly nebo kovariance jednotlivých nejistot. Matematicky je to vyjádřeno podle následujícího vzorce:

$$u_{Cx} = \sqrt{u_{Ax}^2 + u_{Bx}^2} \quad (6.4)$$

u_{Cx} – kombinovaná nejistota měření [-];

u_{Ax} – nejistota měření typu A [-];

u_{Bx} – nejistota měření typu B [-];

6.1.4 Rozšířená nejistota

Definuje interval okolo výsledku měření, v němž se s určenou požadovanou úrovní konfidence (pravděpodobnosti) nalézá pravá hodnota. Rozšířená nejistota se získá z kombinované nejistoty jejím vynásobením příslušným koeficientem rozšíření, stanoveným na základě požadované pravděpodobnosti výskytu skutečné hodnoty změřené veličiny.

Rozšířená nejistota je dána vztahem:

$$U = k u_{Cx} \quad (6.5)$$

U – rozšířená nejistota měření [-];

u_{Cx} – kombinovaná nejistota měření [-];

k – koeficient rozšíření;

V případech, kdy lze usuzovat normální (Gaussovo) rozdělení měřené veličiny a kdy standardní nejistota odhadu x je stanovena s dostatečnou přesností, lze použít hodnoty níže uvedených koeficientů:

1. **k = 1:** Odpovídá přibližně 68% interval spolehlivosti. Používá se, když je požadována nižší úroveň spolehlivosti.
2. **k = 2:** Odpovídá přibližně 95% interval spolehlivosti. Toto je nejběžněji používaná hodnota v mnoha oblastech, včetně metrologie a laboratorních měření.
3. **k = 3:** Odpovídá přibližně 99.7% interval spolehlivosti. Používá se, když je požadována velmi vysoká úroveň spolehlivosti.

Pro hodnocení výsledků ultrazvukového zkoušení je vždy požadována spolehlivost cca 95 % a větší, proto pro hodnocení je nutné používat koeficient rozšíření 2 nebo větší.

Poznámka: Z pohledu zdrojů nejistot se některé ze zdrojů projevují výhradně či výrazněji v nejistotách vyhodnocovaných nejistotou typu A, jiné při použití nejistoty typu B. Mnohé zdroje ale mohou být příčinou obou skupin nejistot, v těchto případech se nesmí opomenout zdroj ani v jedné ze složek, což by mohlo mít zkreslující účinek.

6.2 Zpracování dat

Každý parametr vady, u kterého je stanovována nejistota ultrazvukového zkoušení, je hodnocen samostatně. Pro statistické zpracování dat jsou používány soubory dat, které musí splňovat následující podmínky:

- soubor dat musí obsahovat hodnoty stejného parametru zkoušení včetně jednotek, který byl získán stejným způsobem vyhodnocení dat
- musí obsahovat dostatečný počet hodnot pro statistické posouzení (doporučeno 10 a více, ale lze hodnotit i menší soubory)
- musí být známy, za jakých podmínek byla data stanovena/změřena

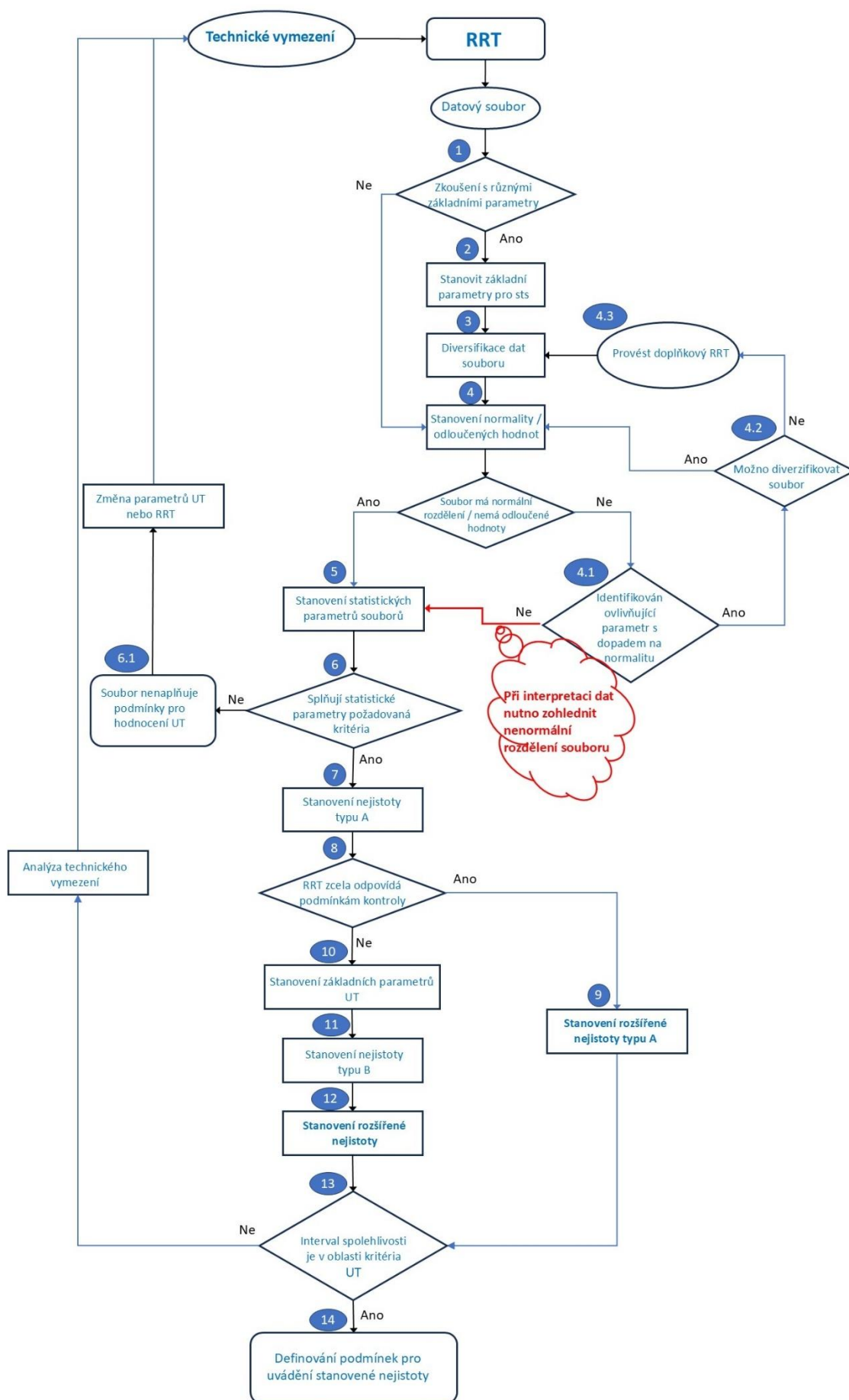
6.2.1 Proces zpracování dat

Zpracování dat pro realizovaný RRT program je charakterizováno podle následujícího postupu (vazby mezi jednotlivými body jsou uvedeny ve vývojovém diagramu uvedeném níže):

1. Určit, zda analyzovaný soubor dat RRT zahrnuje více základních parametrů ultrazvukového zkoušení, tj. při RRT byly měněny parametry zkoušení nebo NDT systému. Pokud ne, realizuje se bod 4.
2. Stanovit základní parametry zkoušení (parametry s dopadem na hodnotu výsledku), pro které je stanovována nejistota (definovány při analýze NDT systému a návrhu RRT).
3. Podle základních parametrů (stanovených v bodě 2) provést rozdělení souborů na podsoubory (rozdělení lze aplikovat pro více základních parametrů současně v závislosti na množství dat získaných při RRT).
4. Posouzení souboru dat (diversifikovaného souboru) – stanovení normality, odlehlých hodnot – pokud je rozdělení normální a bez odlehlých hodnot, pokračuje se se zpracováním dat, pokud ne, je cílem analýza souboru, tj. posouzení ovlivňujících parametrů (další diverzifikace) nebo stanovení příčiny vzniku. Postup je uveden v kap. 6.2.2 - bod 1.
 - 4.1. Pokud soubor dat nemá normální rozdělení, doporučuje se provést analýzu dat v souboru s cílem identifikovat příčinu (ovlivňující/základní parametr, náhodná nebo systematická chyba atd.).

- 4.2. Pokud je zjištěn ovlivňující parametr, který má dopad na nenormální rozdělení dat, je provedena diversifikace naplňuje-li počet dat v souboru podmínku pro statistické zpracování těchto diversifikovaných dat.
- 4.3. Pokud je objem dat nedostatečný, je vhodné provést doplňkový RRT pro získání dat pro požadované ovlivňující parametry.
- 4.4. Soubor lze dále analyzovat, i když není zdroj/parametr nenormálního rozdělení identifikován a nebyl proveden doplňkový RRT program. U výsledků je nutné ale zohlednit nenormální rozdělení dat v souboru.
5. Stanovení statistických parametrů souboru pro charakterizaci datového souboru – popis jednotlivých hodnot je uveden v kap. 6.2.2.
6. Posouzení, zda statistické parametry souborů splňují kritéria pro dané soubory (definováno v rámci požadavků na UT).
 - 6.1. Pokud kritéria nejsou splněna, je nutné provést změnu parametrů v IP a provést nový RRT.
7. Stanovení nejistoty typu A (dle kap. 6.1.1).
8. Posouzení základních parametrů, které nebyly zahrnuty do experimentálního programu = stanovení nejistoty typ B.
9. Pokud RRT zcela zahrnovalo všechny stanovené základní parametry – lze stanovit rozšířenou nejistotu typu A podle požadované pravděpodobnosti (dle kap. 6.1.4).
10. Stanovení základních parametrů, které mají dopad na hodnocený parametr UT (dle kap. 6.1.2).
11. Stanovení nejistoty typu B.
12. Stanovení kombinované nejistoty daného datového souboru (dle kap. 6.1.3) a její rozšíření podle požadované pravděpodobnosti (dle kap. 6.1.4).
13. Je prověřeno, že celý interval spolehlivosti se nachází v oblasti kritéria UT. Pokud ne, je nutné analyzovat příčinu v použitém NDT systému / inspekčnímu postupu a použitém UT zařízení.
14. Stanovení podmínek pro uvádění stanovení nejistoty u výsledků zkoušení.

Proces stanovení kombinované nejistoty pro vybraný parametr zkoušení (úroveň 4) je uveden v následujícím vývojovém diagramu.



Obr. 3: Vývojový diagram popisující proces zpracování dat pro stanovení nejistoty

6.2.2 Analýza dat

Při statistickém zpracování dat má soubor dat specifické vlastnosti, které jsou dány hodnotami dat v souboru. Pro jeho specifikaci je nutné provést posouzení, zda:

1. **Soubor dat má nebo nemá normální rozdělení** – určuje, zda pro tento soubor lze použít statistické metody, které předpokládají normální rozdělení. Posouzení normality souboru je možno provádět velkým počtem testů (Shapirův-Wilkův test, Kolmogorovův-Smirnovův test, Andersonův-Darlingův test, test dle metodiky podle Hebák – Hustopecský atd.). Normalitu souborů lze hodnotit, resp. vyjádřit i pomocí tzv. **p-hodnoty** (pravděpodobnostní), potažmo **hodnoty Z** (kvantilové).

Pro malé soubory ($n < 10$) se doporučuje použití Studentova rozdělení (též zvané t-rozdělení). Při němž pro $P = 0,95$ nalezený kvantil kolem $t = \text{cca } 2$ názorně simuluje koeficient rozšíření $k = 2$ pro normální rozdělení, potažmo pro $P = 0,99$ nalezený kvantil kolem $t = 3$ simuluje rozšíření $k = 3$ pro normální rozdělení.

I přes nenormální rozdělení lze dále hodnotit soubor dat a vyhodnotit nejistotu. V případě souboru s nenormálním rozdělením není zajištěna přesnost zkoušení odpovídající nejistotě. Při hodnocení výsledků nutno posoudit výsledek testu na normalitu a velikost jeho odchýlení od normálního rozdělení. V případě významného odchýlení nutno identifikovat ovlivňující parametry, které způsobily rozptyl hodnot.

2. **Soubor dat obsahuje odchýlené (extrémní) hodnoty** – tato data jsou ze statistického hodnocení vyloučena. Proveďte analýzu příčiny vzniku těchto hodnot. V případě zjištění systematické chyby, poměrově velkého počtu hodnot se provede opravné zkoušení, nutno upravit IP nebo NDT systém.

Při statistickém hodnocení souborů se doporučuje hodnotit následující parametry (z pohledu komplexního posouzení dat nelze samostatně aplikovat pouze nejistotu daného souboru):

- a) **Stanovení střední hodnoty souboru** – v případě, že střední hodnota je významně posunuta od nominální (skutečné) hodnoty, ukazuje to na systematickou chybu celého souboru nebo přirozenou vlastnost souboru způsobenou parametrem zkoušení nebo způsobem vyhodnocení. V případě zjištění systematické chyby se provede analýza příčiny, případně opravné zkoušení. Pro chybu střední hodnoty vzhledem k nominální hodnotě je nutné mít stanovené kritérium přípustnosti.
- b) **Stanovení směrodatné odchylky souboru** – poskytuje informaci, jak jsou data rozložena a jaké jsou jejich vlastnosti. Hodnota bude záviset na velikosti souboru a ovlivňujících parametrech, které jsou v posuzovaném souboru zahrnuty. Čím je hodnota menší, tím jsou výsledky konzistentnější. Možné provést analýzu rozptylu.
- c) **Stanovení nejistoty zkoušení** – pro vybrané soubory je uvedena nejistota zkoušení. Vzhledem k vlivu počtu hodnot na výslednou hodnotu nejistoty zkoušení by v případě potřeby vzájemného porovnání hodnot jednotlivých souborů datové soubory měly mít podobný počet hodnot.

Pro podrobnější analýzu datového souboru je možné analyzovat další statistické parametry jako např.:

- d) **Interval chyby střední hodnoty** – rozsah hodnot, ve kterém se s určitou pravděpodobností nachází skutečný průměr dat, ze kterého byl vytvořen soubor dat. Tento interval nám poskytuje informaci o přesnosti odhadu průměru u použitého datového podsouboru.
- e) **Medián** – střední hodnota z vybraného datového souboru, tj. hodnota, která rozděluje soubor dat na dvě stejně velké poloviny podle počtu hodnot.
- f) **Šikmost** – statistická hodnota, která definuje asymetrii rozdělení hodnot v datovém souboru. Šikmost nám říká, zda jsou data více rozložena na jedné straně průměru než na druhé.

- g) **Špičatost** – statistická hodnota, která popisuje tvar rozdělení dat, konkrétně jak "špičaté" nebo "ploché" je rozdělení ve srovnání s normálním rozdělením.

7. ZÁVĚR

Bezpečnostní návod definuje přístup k určování nejistoty zkoušení v oblasti nedestruktivního zkoušení, konkrétně pro ultrazvukové zkoušení technikami impulsní odrazovou (PEUT) a phased array (PAUT).

Dokument definuje úrovně při stanovování a hodnocení nejistoty výsledků ultrazvukového zkoušení. Pro úrovně 1 a 2 nejsou stanovovány nejistoty výsledků zkoušení a nejsou předmětem tohoto bezpečnostního návodu. Pro úrovně 3 a 4 jsou zde uvedeny činnosti a popsány dokumenty, které definují způsob stanovení nejistoty u vyhodnocovaných parametrů vad při UT. Pro úroveň 3 je nejistota výsledku zkoušení vyjádřena stanovením nejistoty typu B, a to pouze pomocí kvantifikace ovlivňujících parametrů. Pro úroveň 4 je nejistota výsledku zkoušení vyjádřena stanovením nejistoty typu A a současně stanovením nejistoty typu B. Poté je stanovena kombinovaná nejistota. Nejistota typu A je stanovena na základě kvantifikace základních parametrů zkoušení a současně podle výsledků RRT.

Uvedením nejistoty u výsledku kontroly je doplněna informace o přesnosti a spolehlivosti výsledku měření. Při rozhodnutí o výsledku NDT kontroly s vyjádřením nejistoty je zvýšena úroveň hodnocení stavu komponenty, a tím je nepřímo zvýšeno hodnocení její technické bezpečnosti.

Tento dokument byl vytvořen v rámci projektu TAČR č. TK04010018 realizovaného se státní podporou Technologické agentury ČR, programu THÉTA.

LITERATURA

- [1]. Suchánek, M., Skopal, J.: POKYN PRO VYJADŘOVÁNÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ (GUM) – Sborníky technické harmonizace 2012 (originál: JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví)
- [2]. Všeobecné požadavky na kompetenci zkušebních a kalibračních laboratoří, duben 2018, ČSN EN ISO/IEC 17025
- [3]. Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon, účinnost od 1. 1. 2017, ve znění pozdějších předpisů

ZPRACOVATELÉ

Petr Vlček, Jaroslav Brom, Daniel Dopjera

GARANT

Hana Dlouhá