

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Ing. Josef Bradík**

**VYJADŘOVÁNÍ NEJISTOT V ELEKTROMAGNETICKÉ  
NEDESTRUKTIVNÍ DIAGNOSTICE JAKOSTI**

**EXPRESSION OF UNCERTAINTY IN ELECTROMAGNETIC  
NON-DESTRUCTIVE DIAGNOSTICS OF QUALITY**

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

Obor: Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Školitel: Prof. Ing. Karel Hruška, DrSc.

Oponenti: Prof. RNDr. Josef Tošenovský, CSc.  
Ing. Bohumil Král, CSc.

Datum obhajoby: 14. 5. 2002

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

jakost, metrologie, nejistota měření, diagnostika, zkoušení vířivými proudy

## **KEY WORDS**

quality, metrology, uncertainty of measurement, diagnostics, eddy-current testing

## **MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE**

Vědecké oddělení FEKT VUT v Brně, Údolní 53a, 602 00 Brno

## OBSAH

1	SOUČASNÝ STAV.....	5
2	CÍL PRÁCE .....	6
3	ZPŮSOB ZPRACOVÁNÍ.....	7
3.1	NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ POMOCÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE .....	7
3.2	OBECNÁ PRAVIDLA VYJADŘOVÁNÍ NEJISTOT MĚŘENÍ .....	9
3.3	MOŽNÉ ZDROJE NEJISTOT UPLATŇUJÍCÍCH SE V ELEKTROMAGNETICKÉ NEDESTRUKTIVNÍ KONTROLE .....	10
3.4	METODIKA VYJADŘOVÁNÍ NEJISTOT U ELEKTROMAGNETICKÉ METODY .....	11
3.5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	15
4	DISKUSE A VÝSLEDKY PRÁCE .....	17
5	ZÁVĚR .....	18
6	LITERATURA .....	20
7	SEZNAM SYMBOLŮ A ZNAKŮ.....	21
8	CURRICULUM VITAE .....	23

## CONTENTS

1	CURRENT CONDITIONS .....	25
2	OBJECTIVES .....	25
3	WAY OF PROCESSING .....	26
3.1	EDDY CURRENT TESTING .....	26
3.2	UNCERTAINTY IN MEASUREMENT .....	26
3.3	POSSIBLE SOURCES OF UNCERTAINTY IN EDDY CURRENT TESTING.....	27
3.4	METHODOLOGY OF EXPRESSION OF UNCERTAINTY IN EDDY CURRENT TESTING.....	27
3.5	EXPERIMENTAL PART .....	28
4	CONCLUSION.....	28



# 1 SOUČASNÝ STAV

Současný stav výroby a konkurence vyžaduje kontrolu jakosti. Současný stav techniky umožňuje trhu nároky na deklarování jakosti neustále zvyšovat. Vývoj technických prostředků a řada nových fyzikálních objevů přináší nové možnosti měření a kontroly parametrů jakosti. Ve všech oblastech vzrůstají požadavky na množství a jakost informací.

Základním parametrem, který charakterizuje jakost výsledku měření, je nejistota měření. Nejistota měření je v podstatě intervalový odhad založený na analýze všech vlivů, které mohou výsledek měření ovlivnit. Základní požadavky na vyjadřování nejistot měření se obecně odvíjejí od normativních dokumentů, které její uvádění u výsledků kvantitativních měření vyžadují [1,2,N1,N2]. Jelikož je vyjadřování nejistoty měření jednou z podmínek našeho vstupu do Evropské Unie, bylo vyjadřování nejistoty měření v ČR stanoveno již v roce 1997 vládním nařízením zákona č. 22/1997 Sb. o všeobecných požadavcích na výrobky i jeho novelizací v roce 2000 (zákon č. 71/2000 Sb.). Z konkurenčního hlediska představuje vyjadřování nejistot nutný předpoklad pro uplatnění se na světových trzích a zapojení se do mezinárodní spolupráce.

V praxi ovšem existuje i celá řada příkladů, kdy postup a podmínky provedení zkoušky nejsou zcela vymezeny vlastním dokumentem normativního charakteru. Jednou z těchto oblastí je i oblast nedestruktivního zkoušení. Praxe vyjadřování nejistot měření v oblasti nedestruktivní diagnostiky je taková, že se nejistoty nevyjadřují vůbec nebo pouze formálně pro splnění zákonných požadavků. Zatímco dokumenty [1,2,N1,N2] vyjadřování nejistot jednoznačně vyžadují, dokument vztahující se na oblast nedestruktivní diagnostiky tvrdí: „Nedestruktivní zkušební metody zahrnují prvek subjektivního úsudku, a proto není možné poskytnout vodítko pro stanovení nejistoty měření pro různé zkušební metody, kterými se tento dokument zabývá [3].

Aktuální stav souvisejících českých norem, z nichž vycházejí obecné požadavky na jakost a spolehlivost, a norem, které stanovují postupy provádění nedestruktivních kontrol v jednotlivých případech je takový, že aktuální požadavky současné praxe z hlediska vyjadřování nejistot měření v těchto normách vůbec nejsou zohledněny.

## 2 CÍL PRÁCE

Disertační práce se zabývá problematikou vyjadřování nejistot měření v oblasti nedestruktivního zkoušení vlastností materiálů. Disertační práce si klade za cíl stanovit praktický postup pro vyjadřování nejistot měření v oblasti nedestruktivní diagnostiky. Přestože normativní dokument [3] do jisté míry osvobozuje od vyjadřování nejistot výsledků v nedestruktivní diagnostice, je nutno tuto problematiku řešit a ne ji diplomaticky obcházet. Protože se u nedestruktivního testování jedná o procesy diagnostikování, je nutno stanovit podmínky procesu diagnózy a podmínky zpracování výsledků. Podmínky procesu diagnózy a podmínky zpracování výsledků musí vycházet z analýzy fyzikální podstaty zkoušení.

Cílem disertační práce je vypracovat metodický postup, který by poskytl obecné vodítko při vyjadřování nejistot měření v oblasti nedestruktivní diagnostiky. S ohledem na značnou šíři problematiky nedestruktivní diagnostiky je práce zaměřena na problematiku vyjadřování nejistot měření pouze u metody elektromagnetické, teoreticky nejsložitější metody zkoušení, vycházející z elektrických a magnetických vlastností, které se jeví pro hromadnou automatizovanou kontrolu feromagnetických materiálů jako neoptimálnější.

Problematika vyjadřování nejistot měření byla v oblasti zkušebních laboratoří mezinárodně normativně předepsána pro všechny laboratoře, jejichž výsledky mají právní sílu a jsou tak komerčně použitelné. Veškeré optimalizace se odvíjejí od požadavku na životnost výrobku. Proto z normy ISO 9001, která specifikuje mimo jiné i požadavky na jakost návrhu, který by měl být zpracován pro optimální podmínky provozu, vyplývá i řada požadavků na nedestruktivní diagnostiku. Zde hrají nejistoty významnou roli, neboť umožňují odstranit problémy spojené s pod- nebo předimenzováním výrobků, čímž přispívají k hledání jejich optimální konstrukce.

Cílem disertační práce je koncipovat uvedený metodický postup co nejobecněji, aby jej bylo možné po přizpůsobení specifikům konkrétní metody použít v co nejširším rozsahu nedestruktivních kontrol elektromagnetickou metodou. Zároveň tento postup plně odpovídá základním zákonným požadavkům, jak je specifikuje ISO Guide [5] pro vyjadřování nejistot měření. V současné době se jak mezinárodní, tak i česká odborná pracoviště snaží iniciovat vypracování podkladů pro vyjádření nejistoty v jednotlivých oblastech a postupně je zavést do technické praxe. Tato práce si klade za cíl jim v tom napomoci.

### 3 ZPŮSOB ZPRACOVÁNÍ

Podmínky procesu diagnózy a podmínky zpracování výsledků musí vycházet z analýzy fyzikální podstaty zkoušení. Zpracování práce proto vychází ze současných metodik nedestruktivní diagnostiky a současných metodik vyhodnocování jejich přesnosti a vyjadřování nejistot. Zvolený matematický aparát musí vycházet z technických principů měření, pro než je nejistota stanovována. To představuje v současnosti velmi aktuální technický problém, jehož řešení je z hlediska uplatnění se v mezinárodní i národní konkurenci nezbytné.

Řešením tohoto problému se zabývá disertační práce. S ohledem na rozsáhlost problematiky se práce omezuje na oblast elektromagnetické nedestruktivní kontroly. Práce vychází z popisu elektromagnetické metody (dle ČSN metody vířivých proudů) a ze základních obecných pravidel pro vyjadřování nejistoty měření v současnosti užívaných a požadovaných. V práci jsou stručně popsány fyzikální základy metody vířivých proudů a metodiky nedestruktivní kontroly vířivými proudy. Dále jsou stručně uvedeny obecná pravidla pro vyjadřování nejistot měření v laboratorní i technické praxi.

Jádrem disertační práce je vypracovaný přehled možných zdrojů nejistot, které se mohou při aplikaci metody vířivých proudů uplatnit, a návrh způsobu jejich kvantifikace. Kromě soupisu možných zdrojů nejistot uvedené metody nedestruktivní kontroly obsahuje práce rovněž rozbor jejich příspěvků k celkové nejistotě nedestruktivní kontroly a rozlišení na vlivy zásadní, které je nezbytné vždy uvažovat a vlivy, které lze za jistých, přesně definovaných podmínek pokládat za zanedbatelné. Na základě tohoto rozlišení je vypracována metodika vyjadřování nejistot měření u metod nedestruktivní diagnostiky elektromagnetickou metodou jako příklad vyjádření nejistoty u složitější metody nedestruktivní diagnostiky.

Teoretické závěry práce jsou prakticky doloženy provedením nedestruktivní kontroly vlastností materiálu. Na základě v práci vypracované metodiky je vyjádřena nejistota stanovení parametrů charakterizujících materiál elektromagnetickou metodou. Stanovovanými parametry jsou koeficienty vyšších harmonických složek napětí indukovaného ve snímací průchozí cívce, do níž je vložen kontrolovaný materiál. Výstupem je stanovení tolerančních pásem nejistot pro jednotlivé vymezené zdroje nejistot.

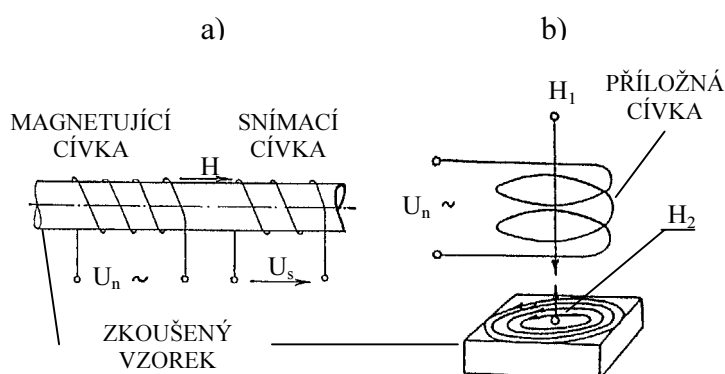
#### 3.1 Nedestruktivní zkoušení pomocí elektromagnetického pole

Metoda vířivých proudů je založena na zjišťování změn fyzikálních vlastností vzorku pomocí střídavého magnetického pole. Měření probíhá tak, že vzorek o určité elektrické vodivosti, permeabilitě a rozměrech je vložen do střídavého magnetického pole, vytvořeného cívkou protékanou proudem. Toto pole ve vzorku indukuje vířivé proudy, které svými magnetickými účinky působí zpětně na pole původní - budící. Základem metody je tedy vznik dvou magnetických polí (jednoho od magnetizační cívky -  $H_1$ , druhého od vířivých proudů -  $H_2$ ), která se vektorově

sčítají ve výsledné magnetické pole  $H$ . Jeho velikost závisí mimo frekvence magnetizačního proudu také na elektrických a magnetických vlastnostech vzorku a na jeho rozměrech. Vlastnosti a nečistoty materiálu způsobují změny tohoto pole, jež je snímáno a vyhodnocováno.

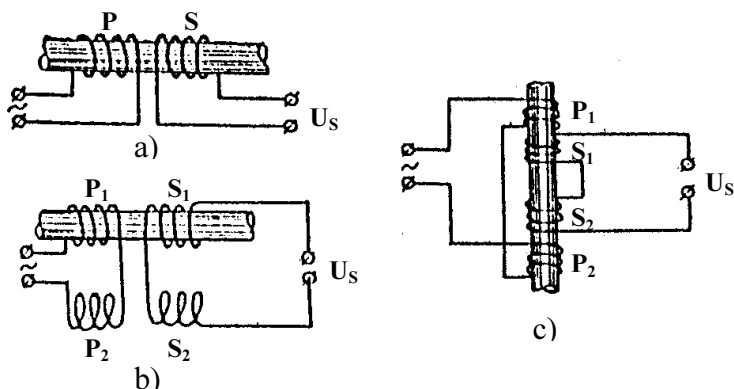
Pro snímání odezvy na působení zkušebního faktoru se užívá cívek tří různých uspořádání: příložné, průchozí, kombinované; pro praktické účely se využívá především metod s uspořádáním průchozích a příložných cívek.

Na obrázku 3.1a je znázorněn princip metody průchozí cívky, na obrázku 3.1b princip metody příložné cívky



Obr.3.1: a) Princip metody s průchozí cívkou  
b) Princip metody s příložnou cívkou

Při kontrole materiálu vířivými proudy metodou průchozí cívky mohou být měřicí cívky zapojeny v uspořádáních, jak ukazuje obr. 3.2. Uspořádání na obr. 3.2a umožňuje měření absolutní hodnoty. V tomto případě se napětí snímá ze snímací cívky S, primární magnetizační cívka P je napájena střídavým proudem.



Obr. 3.2: Možná zapojení cívek u metody průchozí cívky



Obr. 3.2b znázorňuje způsob kompenzace hodnot prázdných cívek. Vyhodnocují se rozdíly indukovaných napětí v měřicích cívkách  $S_1$  a  $S_2$ . Primární cívky jsou napájeny střídavým proudem. Do cívek  $P_2$ ,  $S_2$  může být nasunut vzorek s požadovanými vlastnostmi (normál). Měří se pak pouze odchylky kontrolovaného vzorku vůči požadovaným vlastnostem normálu. Citlivost měření při tomto zapojení je vysoká.

Na obr. 3.2c je uspořádání jako při srovnávací metodě, ale cívky jsou geometricky sestaveny tak, že srovnáváme různá místa na tomtéž vzorku v přesně definovaných vzdálenostech.

### 3.2 Obecná pravidla vyjadřování nejistot měření

Nové požadavky pro mezinárodní spolupráci vyžadují jednotnost, každá akreditovaná laboratoř musí mít vypracovaný konfirmační systém. Pak mají její výsledky právní sílu při posuzování havárií a způsobených škod. Nedílnou součástí konfirmačního systému je nejistota měření.

#### *Nejistota měření*

Obecně nejistota měření sestává z mnoha složek a může být definována jako:

- odhad přiřazený výsledku zkoušky, který charakterizuje interval hodnot, o němž se s určitou pravděpodobností tvrdí, že uvnitř leží správná hodnota. [5]

#### *Rozlišujeme 4 základní druhy nejistot:*

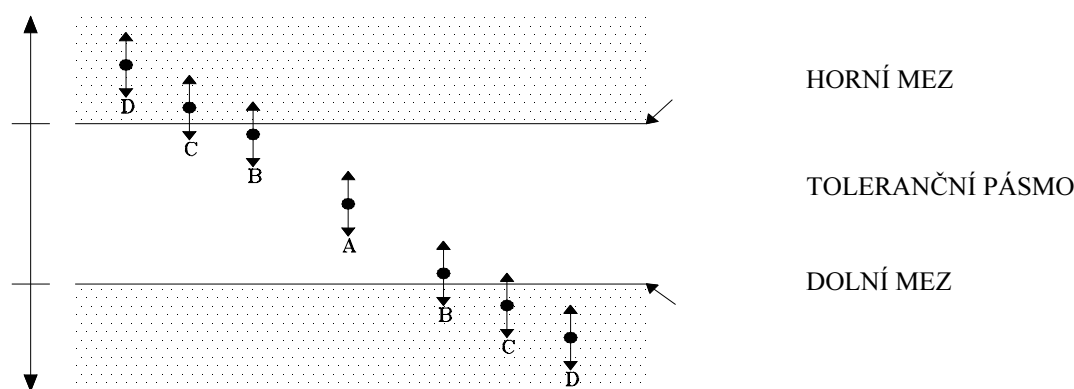
**Typ A:** Složky nejistoty určované statistickým rozbořem série měření.

**Typ B:** Složky nejistoty stanovené jinými metodami než typ A.

**Kombinovaná standardní nejistota:** je mírou nejistoty výsledku měření, který je získán z řady dalších veličin, a označuje se  $u_c(y)$ . Je to odhad směrodatné odchylky spojený s výsledkem měření a je roven kladně brané druhé odmocnině kombinovaného rozptylu získaného ze všech rozptylů a kovariancí.

**Rozšířená nejistota** se určuje v případě některých aplikací s náročnějšími požadavky (oblasti týkající se života a zdraví). Je získána vynásobením kombinované standardní nejistoty koeficientem krytí, případně odpovídajícím součinitelem Studentova rozdělení. Účelem rozšířené nejistoty je určit takový interval okolo výsledku měření, který je spojen s vyšší úrovní konfidence. Volba koeficientu krytí (obvykle v rozmezí 2 až 3) záleží na požadované úrovni konfidence intervalu. [5]

Význam nejistoty měření při posuzování shody znázorňuje obrázek 3.3.



*Bod A: Vyhovuje - hodnota i nejistota jsou v tolerančním pásmu*

*Body B: Nevyhovují - hodnota je v tolerančním pásmu, nejistota však hranice tolerančního pásma překračuje*

*Body C: Nevyhovují - hodnota je mimo toleranční pásmo, nejistota do tolerančního pásma zasahuje*

*Body D: Nevyhovují - hodnota i nejistota jsou mimo toleranční pásmo*

*Obr. 3.3: Význam nejistoty při posuzování shody*

### **3.3 Možné zdroje nejistot uplatňujících se v elektromagnetické nedestruktivní kontrole**

Následující kapitola obsahuje přehled možných zdrojů vedoucích k nepřesnostem, z nichž vyplývají složky nejistot, které se uplatňují v elektromagnetické nedestruktivní diagnostice. Výpis vychází z teoretického rozboru metody a obsahuje přehled možných složek, které mohou mít vliv na celkovou nejistotu prováděné nedestruktivní kontroly.

#### ***Napájení***

Prvním zdrojem nejistot, který je nezbytné uvažovat, je napájení. Pro vyhodnocení nejistoty vnášené do nedestruktivní kontroly napájením měřicího obvodu je nezbytné především sledovat následující parametry:

- Napětí a proud
- Frekvence
- Zkreslení
- Části měřicího obvodu před magnetizační cívkou

#### ***Typ použitého snímače***

Jedním ze základních prvků elektromagnetické nedestruktivní kontroly je použitý snímač indukovaného napětí. Na typu použitého snímače závisí citlivost sejmutého signálu i použitelnost snímače pro daný typ nedestruktivní kontroly. Z těchto základů je třeba vycházet při stanovení nejistoty, která je s použitím daného typu snímače spojena.

### ***Vztah snímače a kontrolovaného objektu***

Kvalita prováděné nedestruktivní kontroly je závislá na vhodném impedančním přizpůsobení použitého snímače, kontrolovaného materiálu a měřícího obvodu. Možné zdroje nejistot spojené s vazbou mezi snímačem a kontrolovaným materiálem jsou:

- Způsob magnetizace
- Vzduchová mezera mezi sondou a kontrolovaným materiálem
- Homogenita pole v materiálu
- Parametry zkušební cívky
- Volba zkušební frekvence

### ***Kontrolovaný materiál***

Kontrolovaný materiál a veličiny, které jej charakterizují, je třeba při analýze zdrojů nejistot uvažovat. Jedná se především o následující:

- Hloubka vniku
- Permeabilita
- Změny průměru kontrolovaného materiálu
- Elektrická a magnetická vodivost kontrolovaného materiálu

### ***Velikost sycení***

Mezi nejistoty spojené s magnetickým sycením kontrolovaného materiálu patří nejistoty spojené s veličinami, které toto sycení charakterizují. Mezi tyto veličiny patří magnetická indukce  $B$ , velikost budícího magnetického pole  $H_1$  a hodnota magnetujícího proudu. Nejistoty těchto veličin jsou závislé na způsobu jejich stanovení. Další složka nejistoty spojená s velikostí magnetického nasycení je nejistota spojená s teplotou materiálu.

### ***Indikátor***

Indikátor použitý v procesu diagnostikování do výsledku diagnózy vždy vnáší prvek nejistoty. Není-li tento prvek vůči ostatním složkám nejistoty zanedbatelný, je třeba jej uvažovat.

## **3.4 Metodika vyjadřování nejistot u elektromagnetické metody**

Při analýze zdrojů nejistot u elektromagnetické metody je třeba vyjít z jejího účelu, kterým může být zjišťování struktury, necelistvosti či záměny materiálu. Vždy se vychází z měření primárních a sekundárních magnetických veličin. Z metodiky stanovení měřené veličiny vycházejí zdroje nejistot, které se v konkrétním měření budou uplatňovat. Zbylé nejistoty jsou dány měřícím zapojením a jeho členy, kolísáním parametrů měření a chybami při vyhodnocování.

Základní metodický postup pro stanovení nejistot měření v oblasti nedestruktivní diagnostiky, který je zcela obecný a lze jej při přihlédnutí ke specifikům konkrétního řešeného úkolu přizpůsobit konkrétním potřebám, lze shrnout do následujících bodů.

### **1. krok: Analýza vstupních podmínek**

Podle popsanych požadavků na přesnost výsledku, podle finančních prostředků, které jsou k dispozici, podle povahy výrobku, který je posuzován, podle časových možností a podle předmětu a rozsahu akreditace je třeba zvážit výběr a volbu měřicí metody s užitím měřicího zařízení, které musí být k dispozici. Již v této fázi je vhodné provést předběžný kvalifikovaný odhad případných zdrojů nejistot, který může ovlivnit i volbu měřicí metody.

### **2. krok: Matematický model zvolené metodiky**

Po provedené volbě metody měření je třeba matematicky vyjádřit závislost měřené (výstupní) veličiny  $Y$  na vstupních veličinách  $X_i$ . Jako měřené veličiny jsou uvažovány ty, které jsou konečným cílem měření. Obecný tvar matematického modelu je:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

Funkce  $f$  představuje postup měření a metodu měření a popisuje, jak jsou hodnoty výstupní veličiny  $Y$  stanovovány z hodnot vstupních veličin  $X_i$ .

Matematické modely pro stanovení možných výstupních veličin uplatňujících se v nedestruktivní diagnostice, jako je indukčnost cívky, hloubka vniku, permeabilita či magnetická indukce jsou podrobně rozpracovány v disertační práci.

### **3. krok: Identifikace a provedení všech významných korekcí**

Je-li měření zatíženo známými systematickými chybami, je třeba provést odpovídající korekce, a je-li to třeba, vyjádřit i nejistoty těchto korekcí.

### **4. krok: Identifikace všech zdrojů nejistot**

Zdroje nejistot vycházejí ze zvoleného matematického modelu. Důležité je, aby nebyl žádný zdroj nejistoty opomenut či zanedbán, pokud není prokázáno, že s ohledem na ostatní uplatňující se nejistoty je zanedbatelný. V případě složitějších měření je účelné zajistit, aby nebyla žádná nejistota do celkové nejistoty započítána vícekrát.

### **5. krok: Stanovení vstupních standardních nejistot**

Pro všechny identifikované zdroje nejistot je třeba kvantifikovat standardní nejistoty. Jako míra nejistot se užívají rozptyly a směrodatné odchylky rozdělení pravděpodobnosti, které přináležejí veličině, jejíž nejistota je stanovována (Typ A), nebo rozdělení pravděpodobnosti, které je této veličině na základě zkušenosti přisouzeno (Typ B). Správné vyhodnocení informací o nejistotách typu B vyžaduje důkladné pochopení technické problematiky. Stanovení nejistoty typu B odborným

odhadem může být stejně spolehlivé jako u typu A, a to zejména v případech malého počtu vyhodnocovaných hodnot.

### 6. krok: Stanovení kombinované standardní nejistoty

Na základě matematického modelu lze zapsat rovnici rozvoje nejistot, vyjádřit koeficienty citlivosti a stanovit kombinovanou standardní nejistotu  $u_c(y)$  jako míru nejistoty výsledku, který byl získán z řady dalších veličin. Je to odhad směrodatné odchylky spojený s výsledkem, který je roven kladné druhé odmocnině kombinovaného rozptylu získaného ze všech rozptylů vstupních veličin a ze všech případných kovariancí.

Pro veličiny nekorelované je rovnice rozvoje nejistot:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i)$$

kde  $f$  je funkční závislost mezi výstupní měřenou veličinou a vstupními veličinami

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$  jsou koeficienty citlivosti vstupních veličin  $x_i$

$u(x_i)$  jsou standardní nejistoty vstupních veličin  $x_i$

Pro veličiny korelované je rovnice rozvoje nejistot:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i^{(k)}} \frac{\partial f}{\partial x_j^{(k)}} r(x_i^{(k)}, x_j^{(k)}) \cdot u(x_i^{(k)}) \cdot u(x_j^{(k)})$$

kde  $r(x_i, x_k)$  je korelační koeficient vyjadřující míru závislost dvou vstupních proměnných  $x_i$  a  $x_j$ . Horní index (k) je u veličin uveden pro zdůraznění, že se jedná o korelované veličiny.

Kombinovaná standardní nejistota  $u_c(y)$  se vypočte jako odmocnina kombinovaného rozptylu  $u_c^2(y)$  získaného z rovnice rozvoje nejistot.

Pro ilustraci je vyjádření rozvoje nejistoty a stanovení koeficientů citlivosti uvedeno pro případ určování nejistoty stanovení indukčnosti výhylkovou metodou.

Matematický model pro určení indukčnosti cívky je dán rovnicí:

$$L = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{\left( \frac{U}{I} \right)^2 - R^2} \quad , \text{tedy:} \quad L \text{ je funkcí } (U, I, R, f)$$

Při uvažování korelací mezi  $U$ ,  $I$  a  $R$  vyplývá z uvedeného matematického modelu rovnice rozvoje nejistot:

$$\begin{aligned} u_c^2(L) = & \left( \frac{\partial L}{\partial U} \right)^2 \cdot u^2(U) + \left( \frac{\partial L}{\partial I} \right)^2 \cdot u^2(I) + \left( \frac{\partial L}{\partial R} \right)^2 \cdot u^2(R) + \left( \frac{\partial L}{\partial f} \right)^2 \cdot u^2(f) + \\ & + 2 \frac{\partial L}{\partial U} \cdot \frac{\partial L}{\partial I} \cdot r(U, I) \cdot u(U) \cdot u(I) + 2 \frac{\partial L}{\partial U} \cdot \frac{\partial L}{\partial R} \cdot r(U, R) \cdot u(U) \cdot u(R) + \\ & + 2 \frac{\partial L}{\partial I} \cdot \frac{\partial L}{\partial R} \cdot r(I, R) \cdot u(I) \cdot u(R) \end{aligned}$$

Vyjádřením parciálních derivací získáme koeficienty citlivosti  $c_x$ :

$$c_U = \frac{\partial \left( \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2} \right)}{\partial U} = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2}} \cdot \frac{2U}{I^2} = \frac{U}{2\pi f I^2 \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2}}$$

$$c_I = \frac{\partial \left( \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2} \right)}{\partial I} = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2}} \cdot \left( -\frac{U^2}{I^3} \right) = -\frac{U^2}{4\pi f I^3 \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2}}$$

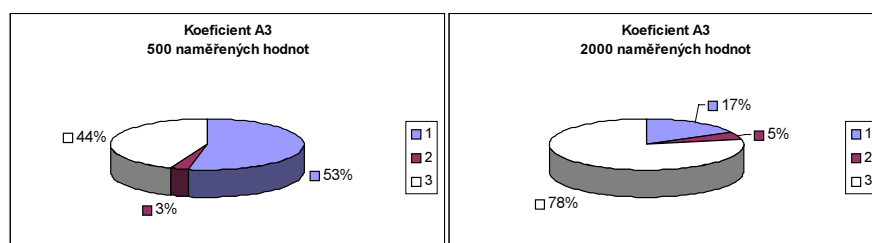
$$c_R = \frac{\partial \left( \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2} \right)}{\partial R} = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2}} \cdot (-2R) = -\frac{2R}{4\pi f \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2}}$$

$$c_f = \frac{\partial \left( \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2} \right)}{\partial f} = -\frac{1}{2\pi f^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2}$$

Dosazením koeficientů citlivosti do rovnice rozvoje nejistot a numerickým dosazením hodnot veličin lze určit příspěvky jednotlivých zdrojů k celkové kombinované standardní nejistotě a posoudit velikosti nejistot v závislosti na hodnotách naměřených či zvolených vstupních veličin. Na základě této rozvahy je možné nejen zvolit nejvýznamnější zdroj nejistoty a případně jej snížit, ale rovněž stanovit vstupní parametry prováděného měření (např. kmitočet) tak, aby byla výsledná nejistota měření co nejnižší.

### 7. krok: Analýza příspěvků jednotlivých zdrojů nejistot

Z vyjádření rozvoje nejistot jsou patrné příspěvky jednotlivých zdrojů nejistot k nejistotě celkové. Proto je účelné provést v této fázi analýzu nejistoty a případně provést úpravu metodiky provedeného měření za účelem snížení nejistot, které se na celkové nejistotě nejvíce podílejí. Praktický význam takové analýzy je patrný z následujících grafů, v nichž je zřejmý rozdíl příspěvku náhodných chyb měření k celkové nejistotě ve vztahu na změnu počtu opakování měření při stanovení koeficientů  $A_3$  Fourierova rozvoje napětí indukovaného ve snímací cívce.



Veličiny v grafech: 1 Nejistota náhodných vlivů

2 Nejistota daná přesností použitého měřicího přístroje

3 Nejistota zkreslení napájecího napětí

Grafy jsou převzaty z experimentální části disertační práce.

## 8. krok: Stanovení rozšířené nejistoty a vyjádření výsledku

Rozšířená nejistota je standardní nejistota vynásobená koeficientem pokrytí  $k_p$ :  
 $U(y) = k_p \cdot u_c(y)$ . Výsledek měření se vyjadřuje:

$$y = \bar{y} \pm U(y).$$

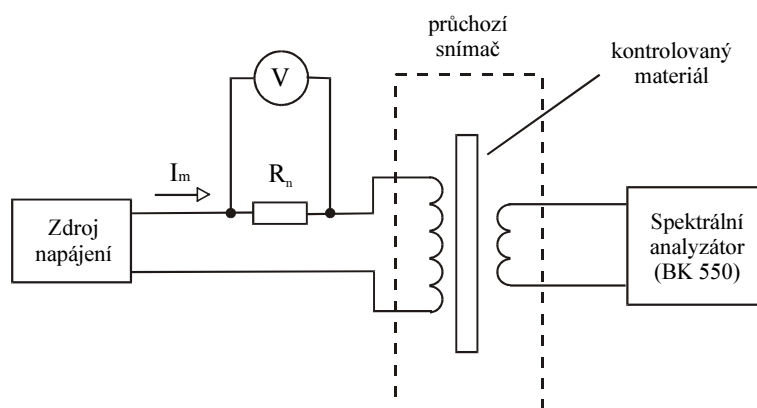
Z normativních dokumentů vztahujících se na oblast vyjadřování nejistot měření [3] u metod nedestruktivní diagnostiky vyplývá, že nedestruktivní zkušební metody zahrnují prvek subjektivního úsudku, a proto není možné poskytnout vodítko pro stanovení nejistoty měření pro různé nedestruktivní zkušební metody.

Z uvedeného je zřejmé, že pro celou řadu případů a vlivů, je možné nejistotu měření vyjádřit. V případech, které zahrnují subjektivní vliv operátora, sice není možné stanovit nejistotu měření tak, jak ji chápou současné mezinárodní normativní dokumenty, lze však aplikovat obecné vztahy spolehlivosti pro stanovení spolehlivosti operátora a rizik odběratele a dodavatele.

### 3.5 Experimentální část

Pomocí navržené metodiky jsou v experimentální části zpracovány výsledky konkrétního měření. Je sestaven model zkušebního zařízení, kterým jsou změřeny parametry charakterizující konstrukční oceli. Jako tyto parametry byly vybrány koeficienty vyšších harmonických složek napětí indukovaného ve snímací cívce. Pro účely experimentu bylo změřeno cca 10 000 hodnot indukovaného napětí magnetického pole ve vzorcích a analyzováno jeho zkreslení. Byly stanoveny parametry hodnotící materiálové vlastnosti s uvažováním nejistot, které se v procesu diagnostikování vyskytly.

Základním cílem prováděného experimentu bylo rozlišení vzorků materiálů různých tříd ocelí v surovém stavu. Každý materiál má jinou strukturu v závislosti na chemickém složení, technologii výroby i způsobu zpracování materiálu. Kontrolované materiály byly feromagnetické, pro jejich kontrolu byl využit princip metody vířivých proudů. Schéma měřícího zapojení je uvedeno na obr. 3.4.



Obr. 3.4: : Zapojení měřícího obvodu při napěťové magnetizaci vzorku

$$R_n = 1 \Omega$$

Zvolená metodika měření byla:

- Napájení - komerční síť 230V, 50 Hz
- Kontrolované parametry a jim náležející koeficienty  $A_1, B_1, A_3, B_3, A_5, B_5$ .  
(Koeficienty Fourierova rozvoje pro 1, 3. a 5. harmonickou složku napětí indukovaného ve snímací cívce)
- Velikost intenzity magnetického pole  $H_1$  - 5000 až 6000  $\text{Hm}^{-1}$
- Rozsah statistického souboru - 500 opakovaných měření

Pro experiment bylo použito vzorků čtyř různých tříd ocelí – ČSN 11 109, ČSN 12 050, ČSN 14 220 a ČSN 16 220, které mají různé mechanické a magnetické vlastnosti. Všechny kontrolované vzorky byly tyčové.



## 4 DISKUSE A VÝSLEDKY PRÁCE

Cílem disertační práce bylo vypracovat metodický postup, který poskytuje obecné vodítko při vyjadřování nejistot měření v oblasti nedestruktivní diagnostiky. Cíl práce byl zvolen na základě zkušeností ze spolupráce s technickou komisí Českého institutu pro akreditaci (ČIA) pro nedestruktivní zkoušení a na základě připomínek na celorepublikovém školení o vyjadřování nejistot měření zajišťované pro ČIA. Z těchto zkušeností a připomínek jednoznačně vyplynula potřeba vypracování metodického postupu pro vyjadřování nejistot měření v oblasti NDT.

Pro vyřešení úkolu bylo nezbytné popsat zdroje nejistot, které se v nedestruktivní kontrole vyskytují a stanovit postup jejich vyhodnocení. S ohledem na širší problematiku nedestruktivního zkoušení byl cíl práce zúžen na oblast nedestruktivního zkoušení využívajícího elektromagnetické pole. Tato oblast byla zvolena ze dvou důvodů. Jednak proto, že je metodou, která je nejkomplicovanější s nejčastějším výskytem vlivů, které se na nejistotách podílejí, jednak proto, že se jedná o neoptimálnější a nejpoužívanější metodu pro kontrolu jakosti feromagnetických výrobků a její význam v technické praxi neustále vzrůstá.

Při řešení úkolu se nabízela dvě možná řešení. První možné řešení spočívalo ve volbě konkrétního zkušební postupu na základě platných norem z oblasti nedestruktivního zkoušení a provedení kompletní analýzy nejistot pro tento postup. Druhé možné řešení představovalo vypracování obecné analýzy nejistot pro nedestruktivní kontrolu pomocí elektromagnetického pole bez zvláštního zaměření na jednotlivé normované zkoušky.

S ohledem na potřebnost co největší univerzality vypracovaného metodického postupu bylo pro řešení úkolu zvoleno druhé řešení, tedy vypracování univerzálnějšího obecně aplikovatelného metodického postupu pro vyjádření nejistoty v elektromagnetické nedestruktivní diagnostice.

Vlivů, které představují základní zdroje nejistot v nedestruktivní kontrole pomocí elektromagnetického pole, je velmi mnoho. Tyto vlivy byly v práci popsány z hlediska jejich fyzikální podstaty a byla stanovena metodika vyjádření jejich nejistot. Tato metodika je plně v souladu s obecnými pravidly a postupy požadovanými legislativou a normativními dokumenty. Princip zvoleného řešení je založen na stavebnicovém modelu, který umožňuje kombinovat jednotlivé zdroje nejistot podle toho, pro jakou metodu je nejistota vyjadřována, a tak umožňuje širší využitelnost navrhované metodiky.

Účelem experimentální části práce bylo prokázání významu a nezbytnosti vyjadřování nejistot měření v oblasti nedestruktivní diagnostiky a ověření matematického aparátu navrženého v teoretické části práce. Význam vyjadřování nejistot byl experimentem doložen nejen ve vztahu k výsledkům měření, ale i s ohledem na volbu metodiky prováděného měření. Kvantifikace vstupních složek nejistoty umožnila přesně vymezit, jaký je procentní podíl jednotlivých vlivů na

celkové nejistotě měření a dále pak na základě znalosti příspěvků jednotlivých nejistot zvolit nejvhodnější metodu zkoušení a optimalizovat metodiku tohoto zkoušení.

Výsledky prováděného experimentu byly ovlivněny třemi základními složkami nejistoty, a to nejistotou náhodných vlivů (způsobují náhodná kolísání měřených veličin), nejistotou spojenou s přesností použitého měřicího přístroje a nejistotou danou zkreslením použitého napájecího napětí. Byly stanoveny podíly jednotlivých nejistot k nejistotě celkové. Stanovení podílů jednotlivých složek nejistot ukázalo, že rozhodující podíl na celkové nejistotě má nejistota způsobená zkreslením napájecího napětí.

Kromě nejistot, které zatěžují přímo hodnoty stanovovaných parametrů byly v práci stanoveny i hodnoty parametrů charakterizujících vztažné podmínky prováděné nedestruktivní kontroly a jejich nejistoty. U provedeného experimentu byly těmito parametry hodnota magnetické indukce  $B$  ve vzorku a hodnota hloubky vniku.

Pro optimální stanovení podmínek nedestruktivní kontroly a pro optimální návrh měřicího zapojení by bylo dále účelné provést analýzu nejistoty zkreslení napájecího napětí na základě stanovení nejistot zkreslení při použití zdrojů napájecího napětí, kde je předpoklad, že by úroveň harmonického zkreslení dodávaného napětí byla nižší. Na základě této analýzy by pak bylo možné navrhnout optimální způsob napájení.

## 5 ZÁVĚR

Vypracovaný přehled možných zdrojů nejistot a vypracovaný způsob jejich stanovení přináší pro praxi vodítko, které umožní lidem určit dominantní složku nejistoty a míry příspěvků ostatních složek. Na tomto základě je již možné zvolit optimální metodiku prováděné kontroly a objektivně stanovit, které složky nejistoty jsou zanedbatelné, a které se na výsledku projevují. V případě, že celková nejistota překračuje hodnoty předepsané zákazníkem nebo normou, je z rozvoje nejistot zřejmé, jaké kroky a pro které zdroje nejistot je třeba podniknout pro snížení vstupních složek nejistot a tím i celkové nejistoty.

Výstupy teoretické části práce byly prakticky ověřeny v experimentální části, jejímž úkolem bylo provést rozlišení různých materiálů pomocí metody vířivých proudů a ukázat, že i v nedestruktivní diagnostice se dá pomocí navrženého aparátu na základě dílčích nejistot jednotlivých prvků a vlivů určit celkovou nejistotu měření. Bylo provedeno vyjádření nejistot měření koeficientů Fourierova rozvoje, magnetické indukce a hloubky vniku jako základních parametrů charakterizujících měření. Experimentální část je zpracována v souladu s postupem vypracovaným v teoretické části práce a dokumentuje, jak by mělo být postupováno.

Řešení předkládané v práci bylo vypracováno pro základní zdroje nejistot uplatňující se u elektromagnetického nedestruktivního zkoušení (dle ČSN metody vířivých proudů). Práce se zabývá postupy určování nejistot u základních parametrů nedestruktivní kontroly, jako je hloubka vniku, magnetické veličiny charakterizující pole použité ke zkoušení a magnetické veličiny vyjadřující vlastnosti zkoušených vzorků.

Pro další rozvoj by bylo vhodné provést analýzy nejistot v závislosti na typu vad a nejistoty způsobené případnými necelistvostmi kontrolovaných objektů. Metodika vyjadřování nejistot zahrnuje mechanické vlastnosti materiálu odpovídající jak struktuře, tak necelistvosti. Pro lokalizaci necelistvostí je třeba měnit program magnetizace, případně předmagnetizace, což může vést ke změně složek nejistoty hodnot pole. Dále by bylo účelné rozšířit řešení o rozbor nejistot s ohledem na různé druhy snímacích čidel a jejich geometrické parametry. V práci bylo užito snímačů cylindrického tvaru, v technické praxi se však vyskytují součástky složitějších tvarů a pro konkrétní složité tvary snímačů je třeba vyjádřit případné odchylky od cylindrických snímačů s ohledem na specifika tvaru.

Vypracovaná disertační práce může sloužit jako příklad, jakým způsobem je třeba přistupovat k problematice vyjadřování nejistot měření. Práce je rámcovým příkladem metodiky postupu vyjádření nejistot, které je nutno uvažovat při nedestruktivním zkoušení.

## 6 LITERATURA

- [1] Dokumenty EAL: EAL – R2: Metodika vyjadřování nejistot měření při kalibracích. EAL-ČIA/ČSNI, 1996
- [2] Dokumenty EAL: EAL – G23: Vyjadřování nejistot v kvantitativním zkoušení. EAL-ČIA/ČSNI, 1996
- [3] Dokumenty EAL: EAL – G15: Akreditace laboratoří provádějící nedestruktivní zkoušky. EAL-ČIA/ČSNI, 1996
- [4] Ludvík, V.: Význam stanovování nejistot v akreditovaných kalibračních a zkušebních laboratořích. Sborník semináře „Hodnocení nejistot zkoušení“. Brno, 1997.
- [5] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). ISO, Switzerland, 1995.
- [6] National Standard of Canada CAN/CGSB. Advanced Manual For: Eddy current test method. Standard Council of Canada, 1991
- [7] Bradík, J. - Hruška, K.: Problematika nejistot měření u metod NDT. Sborník celostátního semináře o nejistotách pořádaný Českým institutem pro akreditaci, 10 stran, Praha, 1999.
- [8] Bradík, J. - Hruška, K.: Stanovení nejistot při měření parametrů jakosti. Monografie. Nakladatelství VUTIUM, Brno, 2001. ISBN 80-214-1656-4.
- [N01] ČSN EN 45001: Všeobecná kritéria pro činnost zkušebních laboratoří. ČSNI, 1994.
- [N02] ČSN EN ISO/IEC 17025: Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří. ČSNI, 2001.

## 7 SEZNAM SYMBOLŮ A ZNAKŮ

$A_k$	koeficient Fourierova rozvoje	[V]
$B$	magnetická indukce	[T]
$B_k$	koeficient Fourierova rozvoje	[V]
$c_i$	koeficient citlivosti (parciální derivace: $c_i \equiv \delta f / \delta x_i$ )	[-]
$f$	frekvence	[Hz]
$H$	intenzita výsledného magnetického pole	[Am <sup>-1</sup> ]
$H_1$	intenzita budícího magnetického pole	[Am <sup>-1</sup> ]
$H_2$	intenzita magnetického pole vířivých proudů	[Am <sup>-1</sup> ]
$I$	elektrický proud	[A]
$I_p$	elektrický proud primárního obvodu	[A]
$I_s$	proud tekoucí vzorkem	[A]
$k_p$	koeficient pokrytí	[-]
$L$	indukčnost cívky	[H]
$n$	počet opakování měření	[-]
$N_p$	počet závitů cívky	[-]
$R$	elektrický odpor	[Ω]
$r(x_i^{(k)}, x_j^{(k)})$	odhadnutý výběrový korelační koeficient spojený se vstupními odhady $x_i^{(k)}$ a $x_j^{(k)}$ veličin $X_i^{(k)}$ a $X_j^{(k)}$	[-]
$t$	čas	[s]
$t_p(v)$	t-součinitel z t-rozdělení pro $v$ stupňů volnosti odpovídající zadané konfidenční úrovni	[-]
$u(x_i)$	standardní nejistota vstupního odhadu $x_i$ veličiny $X_i$ , rovná kladné druhé odmocnině $u^2(x_i)$	[-]
$u^2(x_i)$	odhadnutý rozptyl vstupního odhadu $x_i$ veličiny $X_i$	[-]
$u_c^2(y)$	kombinovaný rozptyl odhadu výstupní veličiny $y$	[-]
$u_c(y)$	kombinovaná standardní nejistota odhadu výstupní veličiny $y$	[-]
$u(x_i^{(k)}, x_j^{(k)})$	odhadnutá kovariance spojená se dvěma odhady $x_i^{(k)}$ a $x_j^{(k)}$ veličin $X_i^{(k)}$ a $X_j^{(k)}$	[-]
$U(y)$	rozšířená nejistota odhadu veličiny $Y$	[-]
$U$	elektrické napětí	[V]
$U_n$	napájecí napětí	[V]

$U_s$	indukované napětí	[V]
$x_i$	odhad vstupní veličiny $X_i$	[-]
$y$	odhad výstupní měřené veličiny $Y$ ; výsledek měření	[-]
$Y$	výstupní měřená veličina	[-]
$\omega$	kruhový kmitočet	[s <sup>-1</sup> ]
$\rho$	měrný elektrický odpor	[ $\Omega\text{m}$ ]
$\delta$	hloubka vniku	[m]
$\nu$	počet stupňů volnosti	[-]
$\mu_r$	relativní magnetická permeabilita	[-]

Poznámka:

*Nachází-li se za označením veličin horní index ( $k$ ) (např.  $X_i^{(k)}$ ), jedná se o veličiny korelované*

## 8 CURRICULUM VITAE

### *Ing. Josef Bradík*

- Narozen: 22.7.1971 v Brně
- V letech 1985 až 1989 studoval na gymnáziu na ulici Vídeňské v Brně ve třídě se zaměřením na programování, maturoval v roce 1989 s vyznamenáním.
- V letech 1989 až 1994 studoval na Fakultě elektrotechniky a informatiky (FEI) VUT v Brně obor elektrotechnologie. Studium zakončil státní zkouškou s prospěchem výborně a obhájením diplomové práce na téma „Užití magnetických nedestruktivních metod pro zjišťování vlastností feromagnetik“ rovněž s prospěchem výborně. Celkově promoval s prospěchem výborně v pořadí 4. ze 43 v oboru a získal titul „inženýr“.
- Po ukončení vysoké školy byl přijat k doktorandskému studiu na FEI VUT v Brně, obor silnoproudá elektrotechnika. Státní doktorskou zkoušku vykonal v roce 1998
- V roce 1997 nastoupil jako odborný asistent na Ústav speciální elektrotechniky a jakosti FEI VUT v Brně, později byl v rámci delimitace převeden na Odbor řízení a kontroly jakosti při Ústavu výkonové elektrotechniky a elektroniky FEI VUT v Brně, kde pracuje dodnes.
- V roce 1997 získal certifikát o absolvování kurzu „Řízení kvality podle norem ISO 9000“
- V roce 1999 absolvoval 14-denní letní školu „Podpora jakosti ve strojírenském podniku“, kterou organizovala v česko rakouském programu ACTION Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně ve spolupráci s TU Wien.

### *Publikace vztahující se k řešené problematice*

- Bradík, J.: „Způsob zpracování naměřených hodnot v souladu s požadavky norem ISO 9000“. Sborník celostátní konference „Quality’96“, EMT Brno, 1996, str. 96 – 107.
- Bradík, J. - Brázda, H.: „Novinky v normách ISO 900X“. Sborník celostátní konference „Quality’96“, EMT Brno, 1996, str. 76-86.
- Hruška, K. - Bradík, J.: Zkušenosti českých podniků s aplikací směrnic EU v praxi“. Sborník celostátní konference „Quality’96“, EMT Brno, 1996, str. 194 – 199.
- Bradík, J.: „Způsoby vyhodnocování výsledků při posuzování jakosti“. Elektrotechnický magazín, 1996, ročník 6, č. 4, str. 30 - 34.
- Bradík, J.-Hruška, K.: Způsoby vyhodnocování výsledků při posuzování jakosti. Elektrotechnický magazín, 1996, ročník 6, č. 7/8, str. 55 – 57.

- Hruška, K. - Bradík, J.: Vliv nejistoty měření na vyjádření jakosti. Monografie. 80 stran. VUT v Brně, 1997, ISBN 80-214-0891-X.
- Hruška, K. - Bradík, J.: Vyjadřování nejistot výsledků měření. Studie. (51 stran) ČIA, Praha 1997.
- Bradík, J.- Hruška, K.: Jak zpracovat naměřené hodnoty. Elektrotechnický magazín, 1997, ročník 7, č. 2, strana 49-50.
- Bradík, J. - Hruška, K.: Nejistoty stanovení jakosti a jejich vliv na ztráty. Učební texty vysokých škol, 64 stran, FEI VUT v Brně, Brno, 1998. ISBN 80-214-1276-3.
- Hruška, K. - Bradík, J.: Nejistota měření jako součást hodnocení jakosti. Sborník celostátního semináře o nejistotách pořádaný Českým institutem pro akreditaci, 19 stran, ČIA, Praha, 1999.
- Hruška, K. - Bradík, J.: Problematika nejistot měření u metod NDT. Sborník celostátního semináře o nejistotách pořádaný Českým institutem pro akreditaci, 16 stran, ČIA, Praha, 1999.
- Hruška, K. - Bradík, J. - Hovadík, J. - Kabeláč, V. - Ondrůšek, Č.: Multiparametričeskij nerozrušajučij kontrol stalnych izdelij. Oponovaná výzkumná zpráva. VUT Brno, 2000.
- Hruška, K. - Bradík, J.: Stanovení nejistot při měření parametrů jakosti. Monografie. Nakladatelství VUTIUM, Brno, 2001, ISBN 80-214-1656-4.



# **ENGLISH PART OF PhD THESIS**

## **1 CURRENT CONDITIONS**

Current condition of production and competition involve the implementing of quality control. Development of technical equipment and new physical discoveries provide new possibilities of measurement and new possibilities in quality control. The requirements to quantity and quality of information grow up in all spheres of technical practice.

An uncertainty of measurement is the basic parameter that characterises quality of result of measurement. General, the basic requirements to expression of uncertainty in measurement are given by normative documents and standards [1-3, N1, N2]. European standard EN 45 001 in paragraph 5.4.3 requires to protocols from measurement encompass “state of uncertainty in measurement (when it is need)” and simultaneously say: “the quantitative results must be given with calculated or estimated uncertainty.

Expression of uncertainty of measurement is directed by requirements of European Accreditation of Laboratories (EAL). The basic documents are EAL-R2 “Methodology of expression of uncertainty in calibration laboratories” (for calibration laboratories) and EAL-G23 “Expression of uncertainty in quantitative testing” (for calibration and testing laboratories).

In practice, test procedures and test condition aren't defined by appropriate document or standard and way of expressing of uncertainty isn't given in many spheres. Non-destructive testing is one of these spheres.

## **2 OBJECTIVES**

The dissertational work deals with expression of uncertainty in measurement in sphere of non-destructive testing of material properties. The gist of dissertational work is determining of practical methodology for evaluating of uncertainty in non-destructive testing. It is necessary to assess the conditions of diagnostic process and the condition of data processing. These conditions must result from analysis of physical nature of testing.

The gist of dissertational work is developed methodical technique, which would give general guidance in expressing of uncertainty in electromagnetic non-destructive testing. This methodical technique should be draw up universally to it could be adapted to particularity of concrete non-destructive testing method. This technique must correspondent to the basic lawful requirement specified by ISO Guide “Guide to the expression of uncertainty in measurement”. In this time, the international and national specialist workplaces strive to sparkplug of developing such standard foundations. This work wants to help them with it.

The gist of this work was chosen by experiences from co-operation with Technical Commission of non-destructive testing of Czech Accreditation Institute and by remarks from national training about expression of uncertainty in measurement, which was executed for Czech Accreditation Institute. The necessity of elaboration such methodical technique for expression of uncertainty in measurement in non-destructive testing unequivocally emerged from these experiences and remarks.

### **3 WAY OF PROCESSING**

The conditions of diagnostic process and the conditions of evaluating of results must be based on analysis of physical nature of testing. So, the dissertational work is based on current methods of non-destructive testing and current methodologies for evaluating of their accuracy. New requirements in international cooperation insist expressing of uncertainty of measurement. Uncertainty of measurement is parameter that characterises a quality of measurement.

It is necessary to mathematical methods for expressing of uncertainty be based on technical principles of measurement for which the uncertainty is evaluated. It is topical technical problem that must be resolved considering international and national competition. This problem is resolve in dissertational work.

#### **3.1 Eddy current testing**

The physical basics of eddy current testing and methodologies of non-destructive testing by eddy currents are describes in the dissertational work.

Eddy current testing is based on inducing electrical currents in the material being inspected and observing the interaction between these currents and the material. The process occurs as follows: When a periodically varying magnetic field intersects an electrical conductor, eddy currents are induced. The induced eddy currents generate their own magnetic field that opposes the excitation field. The equilibrium field is reduced resulting in a change of coil impedance. By monitoring coil impedance, the electrical, magnetic and geometrical properties of the sample can be measured.

Depth of penetration into material depends on its electrical resistance, magnetic permeability and on test frequency. These quantities are the basic parameters of non-destructive testing by eddy currents.

#### **3.2 Uncertainty in measurement**

The formal definition of the term “**uncertainty of measurement**” is as follows:  
[5]

- Parameter, associated with the result of a measurement that characterizes the dispersion of the values that could reasonably attributed to the measurand.

*The basic types of uncertainty:*

**Type A:** Type A evaluation of uncertainty is based on method of evaluation uncertainty by the statistical analysis of series of observation.

**Type B:** Type B evaluation of uncertainty is based on method of evaluation of uncertainty by means other than the statistical analysis of series of observations.

**Combined standard uncertainty** is standard uncertainty of the result of measurement when the result is obtained from the values of a number of other quantities. It is the estimated standard deviation associated with the result and is equal to the positive square root of the combined variance obtained from all variance and covariance components. Combined standard uncertainty is denoted  $u_c(y)$ .

**Expanded uncertainty** is quantity defining an interval about the result of a measurement that may be expected to encompass a large fraction of the distribution of values that could reasonably be attributed to the measurand. Expanded uncertainty is denoted  $U(y)$ .

In practice, there are many possible sources of uncertainty in a measurement.

### 3.3 Possible sources of uncertainty in eddy current testing

The gist of dissertational work is elaboration of survey of possible sources of uncertainty in eddy current non-destructive testing and finding the methodology for their evaluation. These sources are:

- Power supply
- Type of used sensor
- Relations between used sensor and tested objects
- Tested objects and their material properties
- Value of magnetic saturation
- Indicator

### 3.4 Methodology of expression of uncertainty in eddy current testing

Evaluating of single sources of uncertainty in single partial steps is example of modular access to evaluation of uncertainty components. It is suitable to proceed from this modular access in design of way for their evaluation and expression.

In particular measurement, it is necessary to proceed from actual methodology of measurement for evaluation of uncertainties, because the single sources of uncertainty that participate on overall uncertainty result from this methodology. The elaborated methodology for evaluating and expressing of uncertainty in non-destructive testing is quite universal. It can be conform to actual necessities of particular assignment. This methodology can be generally summarize to eight steps as follows:

1. step: Analysis of input conditions
2. step: Mathematical model of chosen methodology
3. step: Identification and implementation of all important corrections
4. step: Identification of all sources of uncertainty
5. step: Evaluation of input standard uncertainties
6. step: Evaluation of combined standard uncertainty
7. step: Analysis of single conducted uncertainty sources
8. step: Evaluation of expanded uncertainty and stating of result

### **3.5 Experimental part**

Theoretical conclusions are instantiated by implementation of practical non-destructive testing of material properties. Non-destructive testing is realized by measurement of higher harmonics component of voltage induced in coil to that the controlled material is inserted. Uncertainty of this measurement is evaluated by methodology elaborated in dissertational work. Result of experimental part is determination of tolerance zones of uncertainties for particular defined sources of uncertainties when electromagnetic non-destructive testing of material is used. Uncertainties of single influences factors and overall uncertainty was elaborated according to mathematical methodology resulted from international requirements.

## **4 CONCLUSION**

The importance of expressing of uncertainties in measurement was unambiguously supported by experiments namely not only in a relation to results of measurements, but also in a relation to choose of measurement methodology. Quantification of components of entry uncertainty enables to delimit exactly the percent part of particular share in total uncertainty of measurements. On the basis of this knowledge it is possible to option the most acceptable method and to optimise the methodology of testing.

Experimental tests have influenced by three basic shares of uncertainty

- by an uncertainty of random influences,
- by a precision of measuring instrument,
- by a distortion of power supply voltage.

It was found that the uncertainty of distortion of power supply voltage has the decisive share in total uncertainty of results.

Generally, there are very many influences that are the basic sources of uncertainties at method of non-destructive material testing by means of electromagnetic field. It was described their physical nature and evaluated methodology to expressing their uncertainties. This methodology is in the whole harmony with universal rules and procedures, which are required by legislature and

prescriptive documents. The principle of solving is based on the modular model. It enables to combine single sources of uncertainties according to elective method of testing and ensures the more extensive usability of evaluated methodology.

Presented resolving was made for check by eddy-current testing. Therefore conceptions of expressing of uncertainties parameters are making out as a depth of penetration, magnetic field and at last magnetic quantity expressing property tested samples. For the next development of methodology there is serviceable to analyse the uncertainties for material defects of samples and uncertainties for cases when defect of entirety is occurred in tested objects. Also it seems to be serviceable to extend solving on an analysis of uncertainties when different types of sensors and their different geometrical parameters are used.

Dissertational work affords methodical clue for expressing of uncertainty of measurement and it can be example of methodology to expressing of uncertainty that is necessary to calculate at non-destructive testing.