



Příklady stanovení nejistoty měření absorbované dávky a kermové vydatnosti



Příloha č. 2 MP-L022-01-2

Stanovení nejistoty pro měření kermové vydatnosti ve vzduchu studnovou komorou

$$K_R = \bar{M} \cdot N_{RAKR} \cdot \frac{k_{T,p}}{t}$$

1. Studnovou komorou bylo naměřeno 5 hodnot odezvy elektrometru: 1,474μC; 1,476μC; 1,472μC; 1,475μC; 1,475μC – průměrná hodnota odezvy: 1,4744μC
2. Průměrná odezva stanovena z několika opakovaných měření – nejistota typu A

3. Standardní nejistota průměrné odezvy se stanoví jako výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru opakovaných měření:

$$\sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum (M_i - \bar{M})^2} = 0,0007\mu C$$

4. Provedeno pouze 5 měření – je potřeba použít opravný faktor pro 5 měření $K_a=1,4$
5. Standardní nejistota aritmetického průměru je potom: $u_a(\bar{M})=1,4 \cdot 0,0007\mu C=0,0009\mu C$
6. Relativní standardní nejistota aritmetického průměru:

$$w_a(\bar{M}) = \frac{u_a}{\bar{M}} = \frac{0,0009\mu C}{1,4744\mu C} = 0,0006 \dots 0,06\%$$

7. Rozšířená relativní nejistota kalibračního koeficientu N_{RAKR} – uvedena v kalibračním listu, nejistota typu B: 2,8% (součin relativní standardní nejistoty a koeficientu rozšíření $k=2$). Velikost relativní standardní nejistoty kalibračního koeficientu je 1,4%.
8. Oprava na teplotu a tlak vzduchu – můžeme použít nejistoty uvedené v kalibračních listech teploměru a barometru. Pro teploměr je v kal. listu vedena hodnota 0,5% pro $k=2$ a pro barometr 1% pro $k=2$. Velikost relativní standardní nejistoty je tedy pro teploměr a barometr 0,25%, resp. 0,5%.

9. Výpočet kermové vydatnosti ve vzduchu v referenční hloubce:

$$\begin{aligned} K_R &= \bar{M} \cdot N_{RAKR} \cdot \frac{k_{T,p}}{t} = \\ &= 1,4744 \cdot 10^{-6} C \cdot 9,426 \cdot 10^5 Gy \cdot m^2 \cdot h^{-1} \cdot A^{-1} \cdot \frac{1,0575}{120s} \\ &= 12,247 mGy \cdot m^2 \cdot h^{-1} \end{aligned}$$

10. Stanovení kombinované standardní nejistoty naměřené hodnoty:

$$w(K_R) = \sqrt{0,0006^2 + 0,014^2 + 0,0025^2 + 0,005^2} = 0,0151 \dots 1,51\%$$

11. Předpokládáme, že naměřená veličina má normální rozdělení, můžeme použít hodnotu koeficientu rozšíření $k=2$. Rozšířená relativní nejistota měření bude 3,02%.

**Příloha č. 2 MP-L022-01-2**

12. Výsledek měření: $K_R = (12,247 \pm 0,370) \text{mGy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$. Uvedená nejistota je nejistotou rozšířenou ($k=2$) a odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95%.

Veličina	Relativní standardní nejistota [%]
Odezva elektrometru	0,06
Kalibrační koeficient	1,4
Oprava na teplotu vzduchu	0,25
Oprava na tlak vzduchu	0,5
Kombinovaná relativní standardní nejistota	1,51
Rozšířená relativní nejistota měření	3,02



Příloha č. 2 MP-L022-01-2

Stanovení nejistoty pro měření absorbované dávky – rtg svazky nízkých energií

$$D_{w,Q} = \bar{M} \cdot N_{D,W,Q0} \cdot k_{Q,Q0} \cdot k_{T,p} =$$

- Pro napětí 40 kV bylo naměřeno 5 hodnot odezvy elektrometru: 1,369nC; 1,368nC; 1,369nC; 1,372nC; 1,372nC – průměrná hodnota odezvy: 1,37nC
- Průměrná odezva stanovena z několika opakovaných měření – nejistota typu A
- Standardní nejistota průměrné odezvy se stanoví jako výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru opakovaných měření:

$$\sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum (M_i - \bar{M})^2} = 0,0008\text{nC}$$
- Provedeno pouze 5 měření – je potřeba použít opravný faktor pro 5 měření $K_a=1,4$
- Standardní nejistota aritmetického průměru je potom: $u_a(\bar{M})=1,4 \cdot 0,0008\text{nC}=0,0012\text{nC}$
- Relativní standardní nejistota aritmetického průměru:

$$w_a(\bar{M}) = \frac{u_a(\bar{M})}{\bar{M}} = \frac{0,0012\text{nC}}{1,37\text{nC}} = 0,0009 \dots 0,09\%$$
- Rozšířená relativní nejistota kalibračního koeficientu $N_{D,W,Q0}$ – uvedena v kalibračním listu, nejistota typu B: 3,3% (součin relativní standardní nejistoty a koeficientu rozšíření $k=2$). Velikost relativní standardní nejistoty kalibračního koeficientu je 1,65%.
- Opravný faktor na kvalitu svazku $k_{Q,Q0}$ - v aktualizovaném originálním vydání TRS398 (tab. 26) je doporučená hodnota relativní standardní nejistoty opravy na kvalitu uživatelského svazku 1,5%.
- Oprava na teplotu a tlak vzduchu a součin ostatních opravných faktorů – pracujeme s pravidelně ověřovanými měřidly tlaku a teploty - můžeme použít doporučenou typickou hodnotu uvedenou TRS398 (tab. 26) – 0,8%.
- Doporučené relativní standardní nejistoty dlouhodobé stability uživatelského referenčního dozimetru, realizace referenčních podmínek a monitoru svazku uvedené v TRS398 (tab. 26): 0,3%, 1% a 0,1%.
- Výpočet dávky v referenční hloubce:

$$\begin{aligned}
 D_{w,Q} &= \bar{M} \cdot N_{D,W,Q0} \cdot k_{Q,Q0} \cdot k_{T,p} = \\
 &= 1,370 \cdot 10^{-9}\text{C} \cdot 1,386 \cdot 10^9 \frac{\text{Gy}}{\text{C}} \cdot 1,001 \cdot 1,03884 = 1,975\text{Gy}
 \end{aligned}$$

- Stanovení kombinované standardní nejistoty naměřené hodnoty:

$$\begin{aligned}
 w(D_w) &= \sqrt{0,0009^2 + 0,0165^2 + 0,015^2 + 0,008^2 + 0,003^2 + 0,01^2 + 0,001^2} = \\
 &= 0,0259 \dots 2,59\%
 \end{aligned}$$



Příloha č. 2 MP-L022-01-2

13. Předpokládáme, že naměřená veličina má normální rozdělení, můžeme použít hodnotu koeficientu rozšíření $k=2$. Rozšířená relativní nejistota měření bude 5,18%.
14. Výsledek měření: $D_{w,Q} = (1,975 \pm 0,102)Gy$. Uvedená nejistota je nejistotou rozšířenou ($k=2$) a odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95%.

Veličina	Relativní standardní nejistota [%]
Odezva elektrometru	0,09
Kalibrační koeficient	1,65
Oprava na kvalitu svazku	1,5
Oprava na teplotu a tlak vzduchu + další opravné faktory	0,8
Dlouhodobá stabilita referenčního dozimetru	0,3
Realizace referenčních podmínek	1
Nejistota monitoru svazku	0,1
Kombinovaná relativní standardní nejistota	2,59
Rozšířená relativní nejistota měření	5,18



Příloha č. 2 MP-L022-01-2

Stanovení nejistoty pro měření absorbované dávky – rtg svazky středních energií

$$D_{w,Q} = \bar{M} \cdot N_{D,w,Q0} \cdot k_{Q,Q0} \cdot k_{T,p} =$$

- Pro napětí 150 kV bylo za referenčních podmínek naměřeno 5 hodnot odezvy elektrometru: 19,14nC; 19,16nC; 19,16nC; 19,14nC; 19,15nC – průměrná hodnota odezvy: 19,15nC
- Průměrná odezva stanovena z několika opakovaných měření – nejistota typu A
- Standardní nejistota průměrné odezvy se stanoví jako výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru opakovaných měření:

$$\sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum (M_i - \bar{M})^2} = 0,0045\text{nC}$$
- Provedeno pouze 5 měření – je potřeba použít opravný faktor pro 5 měření $K_a=1,4$
- Standardní nejistota aritmetického průměru je potom: $u_a(\bar{M})=1,4 \cdot 0,0045\text{nC}=0,0063\text{nC}$
- Relativní standardní nejistota aritmetického průměru:

$$w_a(\bar{M}) = \frac{u_a(\bar{M})}{\bar{M}} = \frac{0,0063\text{nC}}{19,15\text{nC}} = 0,0003 \dots 0,03\%$$
- Rozšířená relativní nejistota kalibračního koeficientu $N_{D,w,Q0}$ – uvedena v kalibračním listu (za referenční kvalitu zvolena N100), nejistota typu B: 3,6% (součin relativní standardní nejistoty a koeficientu rozšíření $k=2$). Velikost relativní standardní nejistoty kalibračního koeficientu je 1,8%.
- Opravný faktor na kvalitu svazku $k_{Q,Q0}$ - v aktualizovaném originálním vydání TRS398 (tab. 28) je doporučena hodnota relativní standardní nejistoty opravy na kvalitu uživatelského svazku 1%.
- Oprava na teplotu a tlak vzduchu a součin ostatních opravných faktorů – pracujeme s pravidelně ověřovanými měřidly tlaku a teploty - můžeme použít doporučenou typickou hodnotu uvedenou TRS398 (28) – 0,8%.
- Doporučené relativní standardní nejistoty dlouhodobé stability uživatelského referenčního dozimetru, realizace referenčních podmínek a monitoru svazku uvedené v TRS398 (tab. 28): 0,3%, 1% a 0,1%.
- Výpočet dávky v referenční hloubce:

$$D_{w,Q} = \bar{M} \cdot N_{D,w,Q0} \cdot k_{Q,Q0} \cdot k_{T,p} =$$

$$= 19,15 \cdot 10^{-9}\text{C} \cdot 5,201 \cdot 10^7 \frac{\text{Gy}}{\text{C}} \cdot 0,992 \cdot 1,02422 = 1,012\text{Gy}$$

- Stanovení kombinované standardní nejistoty naměřené hodnoty:

$$w(D_w) = \sqrt{0,0003^2 + 0,018^2 + 0,01^2 + 0,008^2 + 0,003^2 + 0,01^2 + 0,001^2} =$$

$$= 0,0245 \dots 2,45\%$$

**Příloha č. 2 MP-L022-01-2**

13. Předpokládáme, že naměřená veličina má normální rozdělení, můžeme použít hodnotu koeficientu rozšíření $k=2$. Rozšířená relativní nejistota měření bude 4,9%.
14. Výsledek měření: $D_{w,Q} = (1,012 \pm 0,050) Gy$. Uvedená nejistota je nejistotou rozšířenou ($k=2$) a odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95%.

Veličina	Relativní standardní nejistota [%]
Odezva elektrometru	0,03
Kalibrační koeficient	1,8
Oprava na kvalitu svazku	1
Oprava na teplotu a tlak vzduchu + další opravné faktory	0,8
Dlouhodobá stabilita referenčního dozimetru	0,3
Realizace referenčních podmínek	1
Nejistota monitoru svazku	0,1
Kombinovaná relativní standardní nejistota	2,45
Rozšířená relativní nejistota měření	4,9



Příloha č. 2 MP-L022-01-2

Stanovení nejistoty pro měření absorbované dávky – fotonové svazky vysokých energií

$$D_{w,Q} = M \cdot N_{D,W,Q0} \cdot k_{Q,Q0} \cdot k_{T,p} \cdot \prod k_i$$

1. Pro energii 6MV naměřeno 5 hodnot odezvy elektrometru: 36,37nC; 36,35nC; 36,38nC; 36,37nC; 36,37nC – průměrná hodnota odezvy: 36,368nC

2. Průměrná odezva stanovena z několika opakovaných měření – nejistota typu A

3. Standardní nejistota průměrné odezvy se stanoví jako výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru opakovaných měření:

$$\sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum (M_i - \bar{M})^2} = 0,0049\text{nC}$$

4. Provedeno pouze 5 měření – je potřeba použít opravný faktor pro 5 měření $K_a=1,4$ (převzato z doporučení SÚJB – Vyjádření a používání nejistot v klinické dozimetrii – tab. č.4)

5. Standardní nejistota aritmetického průměru je potom: $u_a(\bar{M})=1,4 \cdot 0,0049\text{nC}=0,0069\text{nC}$

6. Relativní standardní nejistota aritmetického průměru:

$$w_a(\bar{M}) = \frac{u_a(\bar{M})}{\bar{M}} = \frac{0,0069\text{nC}}{36,368\text{nC}} = 0,00019 \dots 0,02\%$$

7. Rozšířená relativní nejistota kalibračního koeficientu $N_{D,W,Q0}$ – uvedena v kalibračním listu (List1.pdf přílohy), nejistota typu B: 1,1% (součin relativní standardní nejistoty a koeficientu rozšíření $k=2$). Velikost relativní standardní nejistoty kalibračního koeficientu je 0,55%.

8. Oprava na kvalitu svazku, $k_{Q,Q0}$ - v aktualizovaném originálním vydání TRS398 (tab. 15) je doporučená hodnota relativní standardní nejistoty opravy na kvalitu uživatelského svazku 1%.

9. Oprava na teplotu a tlak vzduchu a součin ostatních opravných faktorů – pracujeme s pravidelně ověřovanými měřidly tlaku a teploty - můžeme použít doporučenou typickou hodnotu relativní standardní nejistoty uvedenou TRS398 (tab. 15) – 0,4%.

10. Doporučené relativní standardní nejistoty dlouhodobé stability uživatelského referenčního dozimetru, realizace referenčních podmínek a monitoru svazku uvedené v TRS398 (tab. 15): 0,3%, 0,4%, resp. 0,6%

11. Výpočet dávky:

$$\begin{aligned} D_{w,Q} &= \bar{M} \cdot N_{D,W,Q0} \cdot k_{Q,Q0} \cdot k_{T,p} \cdot k_{sat} \cdot k_{pol} = \\ &= 36,368 \cdot 10^{-9}\text{C} \cdot 5,385 \cdot 10^7 \frac{\text{Gy}}{\text{C}} \cdot 0,9897 \cdot 1,0215 \cdot 1,0024 \cdot 1,0001 = 1,985\text{Gy} \end{aligned}$$



Příloha č. 2 MP-L022-01-2

12. Stanovení kombinované standardní nejistoty naměřené hodnoty:

$$w(D_w) = \sqrt{0,00019^2 + 0,0055^2 + 0,01^2 + 0,004^2 + 0,003^2 + 0,004^2 + 0,006^2} =$$

$$= 0,0144 \dots 1,44\%$$

13. Předpokládáme, že naměřená veličina má normální rozdělení, můžeme použít hodnotu koeficientu rozšíření $k=2$. Rozšířená relativní nejistota měření bude 2,88%.

14. Výsledek měření: $D_{w,Q} = (1,985 \pm 0,057)Gy$. Uvedená nejistota je nejistotou rozšířenou ($k=2$) a odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95%.

Veličina	Relativní standardní nejistota [%]
Odezva elektrometru	0,02
Kalibrační koeficient	0,55
Oprava na kvalitu svazku	1
Oprava na teplotu a tlak vzduchu + další opravné faktory	0,4
Dlouhodobá stabilita referenčního dozimetru	0,3
Realizace referenčních podmínek	0,4
Nejistota monitoru svazku	0,6
Kombinovaná relativní standardní nejistota	1,44
Rozšířená relativní nejistota měření	2,88



Stanovení nejistoty pro měření absorbované dávky – svazky elektronů vysokých energií

$$D_{w,Q} = M \cdot N_{D,W,Q0} \cdot k_{Q,Q0} \cdot k_{T,p} \cdot \prod k_i$$

- Pro energii 12MeV naměřeno 5 hodnot odezvy elektrometru: 25,79nC; 25,76nC; 25,77nC; 25,76nC; 25,77nC – průměrná hodnota odezvy: 25,77nC
- Průměrná odezva stanovena z několika opakovaných měření – nejistota typu A
- Standardní nejistota průměrné odezvy se stanoví jako výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru opakovaných měření:

$$\sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum (M_i - \bar{M})^2} = 0,0055\text{nC}$$
- Provedeno pouze 5 měření – je potřeba použít opravný faktor pro 5 měření $K_a=1,4$
- Standardní nejistota aritmetického průměru je potom: $u_a(\bar{M})=1,4 \cdot 0,0055\text{nC}=0,0077\text{nC}$
- Relativní standardní nejistota aritmetického průměru:

$$w_a(\bar{M}) = \frac{u_a(\bar{M})}{\bar{M}} = \frac{0,0077\text{nC}}{25,77\text{nC}} = 0,0003 \dots 0,03\%$$
- Rozšířená relativní nejistota kalibračního koeficientu $N_{D,W,Q0}$ – uvedena v kalibračním listu (List2.pdf přílohy), nejistota typu B: 1,1% (součin relativní standardní nejistoty a koeficientu rozšíření $k=2$). Velikost relativní standardní nejistoty kalibračního koeficientu je 0,55%.
- Opravný faktor na kvalitu svazku $k_{Q,Q0}$ - v aktualizovaném originálním vydání TRS398 (tab. 22) je doporučená hodnota relativní standardní nejistoty opravného faktoru na kvalitu uživatelského svazku (pro planparalelní ionizační komoru kalibrovanou v Co60): 1,7%.
- Oprava na teplotu a tlak vzduchu a součin ostatních opravných faktorů – pracujeme s pravidelně ověřovanými měřidly tlaku a teploty - můžeme použít doporučenou typickou hodnotu uvedenou TRS398 (tab. 22) – 0,5%.
- Doporučené relativní standardní nejistoty dlouhodobé stability uživatele referenčního dozimetru, realizace referenčních podmínek a monitoru svazku uvedené v TRS398 (tab. 22): 0,4%, 0,6% a 0,6%.
- Výpočet dávky v referenční hloubce:

$$D_{w,Q} = \bar{M} \cdot N_{D,W,Q0} \cdot k_{Q,Q0} \cdot k_{T,p} \cdot k_{sat} \cdot k_{pol} =$$

$$= 25,77 \cdot 10^{-9}\text{C} \cdot 8,157 \cdot 10^7 \frac{\text{Gy}}{\text{C}} \cdot 0,913 \cdot 1,0215 \cdot 1,0062 \cdot 1,0004 = 1,973\text{Gy}$$



Příloha č. 2 MP-L022-01-2

12. Stanovení kombinované standardní nejistoty naměřené hodnoty:

$$w(D_w) = \sqrt{0,0003^2 + 0,0055^2 + 0,017^2 + 0,005^2 + 0,004^2 + 0,006^2 + 0,006^2} = 0,0208 \dots 2,08\%$$

13. Předpokládáme, že naměřená veličina má normální rozdělení, můžeme použít hodnotu koeficientu rozšíření $k=2$. Rozšířená relativní nejistota měření bude 4,16%.

14. Výsledek měření: $D_{w,Q} = (1,973 \pm 0,082)Gy$. Uvedená nejistota je nejistotou rozšířenou ($k=2$) a odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95%.

Veličina	Relativní standardní nejistota [%]
Odezva elektrometru	0,03
Kalibrační koeficient	0,55
Oprava na kvalitu svazku	1,7
Oprava na teplotu a tlak vzduchu + další opravné faktory	0,5
Dlouhodobá stabilita referenčního dozimetru	0,4
Realizace referenčních podmínek	0,6
Nejistota monitoru svazku	0,6
Kombinovaná relativní standardní nejistota	2,08
Rozšířená relativní nejistota měření	4,16

Tato příloha při změně textu podléhá připomínkovému řízení.