



---

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ**  
**Katedra biomedicínské techniky**

# **Metody určování nejistot v bioměření**

Určení nejistot měření v nukleární medicíně

Autor práce:

Ing. Barbora Klíčová

# Obsah

Úvod .....	8
<b>1 Teoretický základ.....</b>	<b>8</b>
1.1 Princip plynových detektorů .....	8
1.2 Ionizační komora.....	9
1.3 Měřicí přístroj CURIEMENTOR <sup>3</sup> / <sub>4</sub> .....	10
1.3.1 Ionizační komora T 233652.....	10
1.4 Systém kontrol ionizační komory .....	11
<b>2 Metody .....</b>	<b>12</b>
2.1 Nejistota měření .....	12
2.1.1 Zdroje nejistot.....	12
2.1.2 Nejistota měření typu A.....	13
2.1.3 Nejistota typu B .....	13
2.1.4 Standardní kombinovaná nejistota C.....	15
2.1.5 Rozšířená nejistota U.....	15
<b>3 Výsledky.....</b>	<b>16</b>
<b>Závěr .....</b>	<b>18</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>19</b>

# Úvod

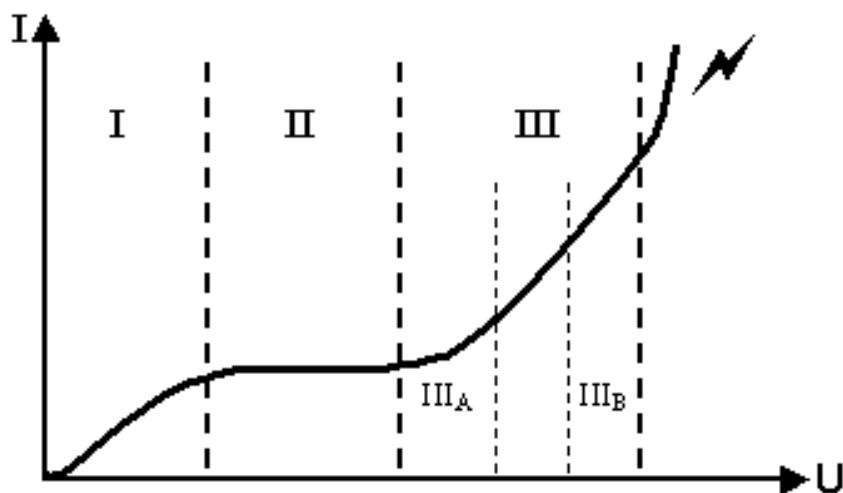
Správná hodnota měřené aktivity, je podstatným faktorem pro zajištění radiační ochrany při vyšetření v nukleární medicíně, proto by měly být ionizační komory rozhodně preferovány. Měřidla pro měření aktivity patří mezi tzv. stanovená měřidla, tudíž podléhají povinnosti úředního ověření. Vzhledem k tomu, že ověření nezaručuje maximální správnost, tak je nutné měřidla nakalibrovat.

Tato práce se zabývá výpočtem nejistot měření v nukleární medicíně.

## 1 Teoretický základ

### 1.1 Princip plynových detektorů

Některé atomy nebo molekuly se při působení ionizujícího záření přeměňují na kladně nabitě ionty a elektrony. Ionizaci způsobují sekundární nabitě částice při interakci nepřímého ionizujícího záření a tím vzroste vodivost plynu. Takového jevu využívají plynové detektory, které lze rozdělit na ionizační komory, proporcionální detektory a Geiger-Müllerovi počítače (GM počítače). Jednotlivé detektory se od sebe liší několika parametry a to tlakem, druhem pracovního plynu, geometrií detektoru, napájecím tlakem a intenzitou elektrického pole [1].



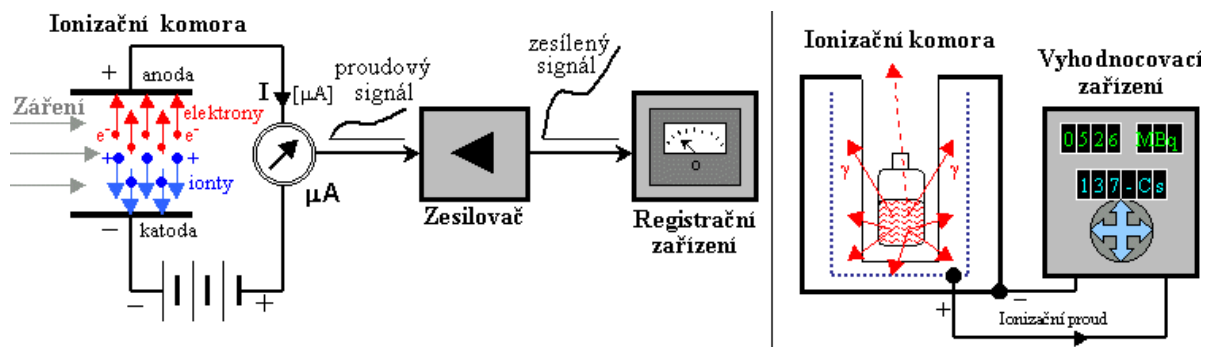
Obrázek 1 Závislost ionizačního proudu ( $I$ ) komorou na přiloženém napětí ( $U$ ) [2]

V první oblasti (I) není intenzita elektrického pole dostatečná, zde dochází k rekombinaci, tzn. produkty ionizace nejsou dostatečně rychle od sebe odděleny. Tato oblast není využívána pro práci plynových detektorů a nazývá se jako oblast Ohmova zákona. Další oblast (II) je nazývána jako oblast nasyceného proudu a zde pracují

ionizační komory. Za touto oblastí je oblast proporcionality (IIIA), kde pracují proporcionalní detektory a dále následuje oblast omezené proporcionality (IIIB), která se pro plynové detektory nevyužívá. Se zvyšující se intenzitou elektrického pole se dostáváme do oblasti, kde pracují GM počítače [2].

## 1.2 Ionizační komora

Ionizační komora je nejjednodušším elektronickým detektorem ionizujícího záření. Je tvořena elektrodami – anodou a katodou, které jsou umístěny v plynném prostředí (např: argon, krypton, xenon) a jsou připojeny v elektrickém obvodu na napětí v řádu stovek voltů.



Obrázek 2 Schéma principu ionizační komory [6]

Bez přítomnosti záření systémem neprochází žádný proud a plyn mezi elektrodami je nevodivý. Pokud do prostoru mezi elektrodami vnikne ionizující záření, vyráží z původně neutrálních atomů plynu elektrony a mění je na kladné ionty. V elektrickém poli záporné elektrony putují je kladné anodě, a naopak kladné ionty jdou k záporné katodě. Elektrickým obvodem začne protékat elektrický proud způsobený iontovou vodivostí ionizovaného plynu mezi katodou a anodou. Elektrický proud je přímo úměrný intenzitě IZ. Následně je realizována detekce ionizujícího záření (IZ) převedením na měřitelnou velikost elektrického proudu obvodem ionizační komory.

Elektrický proud protékající ionizační komorou se pohybuje v rozmezí  $10^{-1}$ – $10^{-19}$  A. Ionizační komora má nízkou detekční účinnost, ale její výhodou je lineární závislost proudu i v oblasti vysokých intenzit IZ [2].

### 1.3 Měřicí přístroj CURIEMENTOR $\frac{3}{4}$

Jedná se o měřicí zařízení stanovující aktivitu radioaktivních izotopů, které jsou používány v nukleární medicíně (NM) pro diagnostiku a terapii. Měřicí zařízení se skládá ze zobrazovací jednotky a studnové ionizační komory.

#### Technické parametry

*Typ:* Měřicí systém CURIEMENTOR  $\frac{3}{4}$  se skládá z mikroprocesorem řízeného kalibrátoru izotopů s přímým odečtem aktivity podle EN 61303 a studnové ionizační komory

*Výrobce:* PTW Freiburg

*Uplatnění:* Měřicí zařízení pro určení aktivity radioaktivních izotopů pro diagnostiku nebo terapii v NM

*Měřené veličiny a jednotky:* Aktivita [Bq], proud [A]

*Rozsah měření:* Závisí na izotopu; 0,100 MBq – 13,5 GBq (pro saturaci 98 %); 46,5 GBq (pro saturaci 95 %)

*Linearita:*  $\leq \pm 2\%$

*Reprodukovatelnost:*  $\leq \pm 2\%$

*Přesnost:*  $\leq 5,5\%$

*Napětí komory:*  $(400 \pm 9)$  V

*Dlouhodobá stabilita:*  $\leq \pm 0,5\%$  za rok [3]

#### 1.3.1 Ionizační komora T 233652

Argonem naplněná ionizační komora má válcovitý tvar. Přetlak v ionizační komoře je 10 bar a je nezávislý na externím tlaku. Reakce ionizační komory závisí na energii IZ jednotlivých izotopů. [3]

#### Technické parametry

*Typ:* Studnová komora, typ 233652

*Výrobce:* PTW-Freiburg

*Napětí komory:* 1000 V max

*Rozměry:* 210 mm  $\varnothing$  x 240 mm

*Váha:* 7 kg

*Naplňeno:* Argonem

*Tlak:* 10 bar  $\pm$  1 bar [3]

## 1.4 Systém kontrol ionizační komory

Měřidla aplikované aktivity jsou považována za stanovená měřidla tudíž podléhají povinnosti úředního ověření. Ověření měřidla nezaručuje metrologickou správnost tudíž je potřebné měřidlo nakalibrovat. Kalibrace je prováděna buď úpravou příslušných kalibračních koeficientů nebo aplikací korekčního faktoru na základě porovnání s etalonem [4].

### Pozadí

Kontrolou pozadí je zjištění možné radioaktivní kontaminace studny detektoru, nebo okolí měřiče aktivity. Měření pozadí se provádí denně, tudíž před každým měřením. Naměřené hodnoty by neměly překročit referenční hodnotu o více než 50 %, kdy referenční hodnotu získáme při instalaci přístroje vypočítáním průměru z měření, která jsou prováděna po dobu několika dní.

### Krátkodobá stabilita

Tento pojem představuje reprodukovatelnost výsledků při opakovaných měření a úzce souvisí s náhodnou chybou měření. Krátkodobou stabilitu měříme periodicky, tedy ročně, nebo při podezření na nestabilitu měřicí soustavy. K měření krátkodobé stability je potřeba vzorek radionuklidu ( $^{99m}\text{Tc}$ ) o aktivitě 100-200 MBq. Aktivita vzorku je měřena opakovaně 10x. Z naměřených hodnot je vypočítán tzv. variační koeficient který nesmí překročit 1 % u studnových ionizačních komor.

### Dlouhodobá stabilita

Měření dlouhodobé stability představuje kontinuální kontrolu přístroje, která je prováděna za účelem odhalení možné poruchy. Dlouhodobá stabilita velice úzce souvisí se systematickou chybou měření a je měřena denně. Pro měření je třeba radionuklidový etalon, který má dostatečně dlouhý poločas přeměny (např.  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ). Naměřené hodnoty získáme změřením odezvy přístroje s daným etalonem, a to jako aritmetický průměr minimálně tří naměřených hodnot. Následně se dle zákona radioaktivní přeměny vytvoří křivka očekávané odezvy pro další období. Před zahájením klinického provozu se každý den změří odezva přístroje se stejným etalonem a porovnává se s očekávanou hodnotou. Odezva se nesmí lišit od očekávané hodnoty více než 5 %.

### Linearita

Ionizační komory v proudovém režimu vykazují dobrou linearitu v rozsahu stovek kBq – jednotek GBq měřené aktivity. Od určité meze dochází k nasycení odezvy a naměřený údaj je čím dál více podhodnocen. Měření je stanovena meze lineární odezvy, která je měřena ročně. Vzorek radionuklidu o objemu 1 ml o výchozí aktivitě v jednotkách GBq. Měření probíhá po dobu několika pracovních dnů a cca každé dvě hodiny se změří aktivita a vypočítá se aritmetický průměr minimálně ze 3 hodnot. Optimálně je měření prováděno do doby, než aktivita klesne pod 1MBq. Vzhledem

k tomu, že měření v běžné pracovní době způsobuje ve výsledných datech významné rezervy, tak je vhodné měření provádět se dvěma vzorky v poměru aktivity 4:1, kdy druhý vzorek stimuluje aktivitu prvního v čase posunutém o 12 h. Naměřené hodnoty jsou vyneseny do grafu a posledními deseti hodnotami je proložena křivka. Následně se určí maximální hodnota aktivity, pro kterou se naměřené hodnoty od přímky ještě neodchylují.

### **Geometrická účinnost**

Geometrická účinnost neboli objemová závislost. Odezva ionizační komory je závislá na měřeném vzorku, na jeho tvarové a prostorové uspořádání. Tudíž je závislá na objemu vzorku a typu stříkačky či nádoby, kde je vzorek umístěn. Totéž platí i pro ověření a kalibraci měřidla, a proto je potřeba stanovit referenční podmínky. Měření probíhá vždy při uvedení do provozu a po zásahu, který by mohl mít vliv na geometrii měření. Pro měření jsou potřeba stříkačky a referenční stříkačka, vzorek radionuklidu ( $^{99m}\text{Tc}$ ) o aktivitě v rozmezí běžně používaných aplikovaných aktivit. Pro měření je připravena nádoba s roztokem radionuklidu o aktivitě  $100 \text{ MBq.ml}^{-1}$  do referenční stříkačky se nabere referenční objem radionuklidu a je určena referenční aktivita jako aritmetický průměr z min tří naměřených hodnot. Jednotlivé hodnoty měřených aktivit za různých podmínek jsou porovnány s referenční aktivitou a stanoví se opravné faktory pro jednotlivé geometrie měření [4].

## **2 Metody**

### **2.1 Nejistota měření**

Nejistota měření je považována za parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot. Jedná se o odhad charakterizující rozsah hodnot, ve kterém leží pravá hodnota měřené veličiny, nebo míra možné chyby odhadu měřené veličiny. Ke stanovení nejistot měření jsou využívány metody:

Metoda typu A – statistické zpracování naměřených údajů

Metoda typu B – jiné než statistické zpracování

#### **2.1.1 Zdroje nejistot**

Výsledky měření nejistoty mohou být ovlivněny několika faktory, které nám vzdalují naměřenou hodnotu od skutečné hodnoty. Nejčastěji se jedná o následující:

- Nepřesnost etalonů a referenčních materiálů
- Nereprezentativní výběr vzorků měření

- Nedodržení shodných podmínek při opakovaných měřeních
- Nevhodný výběr přístroje
- Subjektivní vliv obsluhy
- Chybné zaokrouhlování
- Vliv prostředí [5]

### 2.1.2 Nejistota měření typu A

Metoda typu A vychází ze statistické analýzy opakované série měření. V případě, že je  $n$  nezávislých stejně přesných pozorování ( $n > 1$ ), tak bude odhad výsledné hodnoty  $y$  reprezentován hodnotou výběrového průměru (aritmetického průměru).

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

Nejistota příslušná k odhadu  $y$  se určí jako směrodatná odchylka výběrového průměru.

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

Nejistota se značí jako  $u_{Ay}$  a určí následovně.

$$u_{Ay} = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Nejistota typu A je fluktuací naměřených údajů, pokud naměříme méně měření ( $n < 10$ ), tak hodnotu dle předchozího vzorce 3 označujeme za málo spolehlivou. Potom je doporučeno nejistotu odhadnout metodou typu B [6] [7].

### 2.1.3 Nejistota typu B

Výpočet nejistoty typu B není založeno na statistických přístupech. Nejčastěji je odhadována následovně: V první řadě je nutné vytipovat možné zdroje nejistot



$Z_1, \dots, Z_j, \dots, Z_m$ ; dále se určí standardní zdroj nejistoty  $u_{zj}$  každého zdroje nejistoty. Po stanovení nejistoty  $u_{zj}$  se od jednotlivých zdrojů nejistoty přepočítá na správné složky nejistoty měřené veličiny  $u_{yzj}$ . Ve finále se posoudí možné korelace mezi jednotlivými zdroji nejistot typu B a následně je vypočítána celková standardní nejistota typu B  $u_B$ .

Při stanovení nejistoty typu B se vychází z jednotlivých nejistot  $u_{Bzj}$ . Pokud známe maximální odchylku  $j$ -tého zdroje nejistoty  $z_{max}$ , tak můžeme určit nejistotu  $u_{Bzj}$  dle vztahu:

$$u_{Bzj} = \frac{z_{max}}{k} \quad (4)$$

Kdy  $k$  je součinitel vycházející ze zákona rozdělení (normální rozdělení  $k = 2$ , rovnoměrné  $k = 1,73$ ). V určitých případech je hodnota známa např. z kalibračního měřidla.

Výslednou nejistotu B vypočítáme dle následujícího vzorce.

$$u_{Bzj} = \sqrt{\sum A_j^2 u_{Bzj}^2} \quad (5)$$

Kdy  $u_{Bzj}$  jsou jednotlivé nejistoty zdrojů.

$A_j$  je jejich součinitel citlivosti.

V případě, že v dokumentaci výrobců či certifikátů je uvedena rozšířená nejistota  $U$  a koeficient rozšíření  $k_r$ , tak se nejistota  $u_{Bzj}$  určuje na základě vztahu:

$$u_{Bzj} = \frac{U}{k_r} \quad (6)$$

V případě, že je známo rozpětí normálového rozdělení, kde se může vyskytovat většina naměřených hodnot, tak lze nejistotu určit na základě vztahu [7]:

$$u_B(Z) = \frac{U}{k_r} \quad (7)$$

### 2.1.4 Standardní kombinovaná nejistota C

V praxi je mnohdy využívána kombinovaná nejistota, kdy se stanovuje výsledek typu A i B. Výsledná nejistota měření  $y$  je označována  $u_{Cy}$  a určuje se následujícím vztahem:

$$u_{Cy} = \sqrt{u_{Ay}^2 + u_{By}^2} \quad (8)$$

### 2.1.5 Rozšířená nejistota U

Pokud si nelze vystačit s běžnou standardní nejistotou, tak je nutné použít rozšíření  $k$  a to pomocí koeficientu. Standardní nejistota (původně stanovená směrodatná odchylka) představuje např. u nejméně používaných rozdělení interval určený s pravděpodobností cca 68 %. Pro docílení lepšího výsledku pokrytí, blížíci se 100 %, je potřeba rozšířit nejistotu. Rozšířenou nejistotu lze vypočítat následovně:

$$U = k_r \times U_c \quad (9)$$

Kde  $U$  je rozšířená nejistota,  $k_r$  = koeficient rozšíření,  $u_c$  = kombinovaná nejistota.

Nejčastěji je používáno *normální rozdělení* neboli *Gaussovo rozdělení*. A to v případě, že se často budou vyskytovat malé odchylky od jmenovité hodnoty, zatímco velikost odchylek s rostoucí pravděpodobností klesá. Pro  $k_r=2$  (95 %), pro  $k_r=3$  (99 %) [6].

### 3 Výsledky

Pro výpočet nejistot měření byla naměřena data na oddělení radioizotopového pracoviště IKEM. Data byla naměřena přístrojem CURIEMENTOR 3/4, kdy bylo provedeno celkem  $n=10$  opakovaných měření dlouhodobé stability ionizační komory pomocí radionuklidového etalonu  $^{137}\text{Cs}$ . Následně byla stanovena průměrná hodnota jednotlivých měření.

Tabulka 1 Naměřené hodnoty dlouhodobé stability

Počet měření	Naměřené hodnoty [Bq]	Naměřené hodnoty [%]
1	-1700	-0,068
2	-2700	-0,109
3	300	0,012
4	-1700	-0,068
5	1300	0,052
6	2300	0,093
7	2300	0,093
8	1300	0,052
9	300	0,012
10	-1700	-0,068
$\bar{x}$	0,00E+00	-4,00E-05

Dle získaných referenčních údajů nejistoty v uživatelském manuálu byla zdrojem nejistot stanovena kalibrace etalonu, přesnost měření  $\leq 5,5 \%$ .

**Tabulka 2** Výsledky jednotlivých typů nejistot

<b>Typ nejistoty</b>	<b>Typ rozdělení</b>	<i>Dělitel</i>	<i>u</i>
Nejistota typu A	Rovnoměrné		<b>0,074</b>
Nejistota typu B	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	<b>3,175</b>
Nejistota typu C	Rovnoměrné		<b>2,945</b>

## Závěr

Teoretická část se zaměřuje na popis plynových detektorů, které jsou používány v oblasti nukleární medicíny. V následující kapitole metody se zaměřuje na definici nejistot měření a jsou zde popsány matematické vztahy nejistot měření typu A, typu B a kombinované nejistoty C.

Poslední kapitola výsledky se zaměřuje na výpočet nejistot měření dlouhodobé stability ionizační komory v nukleární medicíně, kde výrobcem byla stanovena přesnost měření  $\leq 5,5 \%$  [3]. Na základě naměřených hodnot, byl stanoven aritmetický průměr a následně nejistoty měření. Z naměřených hodnot byla vypočítána směrodatná odchylka, čímž byla stanovena nejistota měření typu A  $u_A = 0,074$ . Dále byla určena nejistota měření typu B  $u_B=3,175$  a kombinovaná nejistota typu C  $u_C=2,945$ .

## Seznam použité literatury

- [1] SÚKUPOVÁ, Lucie. *Použití ionizační komory*. [online]. Praha: Lucie Sůkupová, 2011 [cit. 2020-02-27]. Dostupné z: <http://www.sukupova.cz>
- [2] ULLMAN, Vojtěch. *Detekce a spektrometrie ionizujícího záření*. Astronuklfyzika [online]. Ostrava [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm#3>
- [3] *User manual CURIEMOTOR 3/4: T12002 and T1204*. PTW FREIBURG, 2007.
- [4] *Radiační ochrana v nukleární medicíně: Systém kontrol detekční a zobrazovací techniky*. SÚJB. Praha, 2019. Dostupné také z: [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/lekarske\\_ozareni/Doporuceni\\_NM/pracovni\\_verze\\_pristrojova\\_technika.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/lekarske_ozareni/Doporuceni_NM/pracovni_verze_pristrojova_technika.pdf)
- [5] HORSKÝ, Jiří a Pavel HORSKÝ. *Jak pochopit vyjadřování nejistoty měření spojené s metrologií elektrických veličin*. Elektro. 2011, **2011**(5), 14-17.
- [6] PALENČÁR, RUDOLF, FRANTIŠEK VDOLEČEK a MARTIN HALAJ. *Nejistoty měření I: vyjadřování nejistot*. AUTOMA: Časopis pro automatizační techniku [online]. **2001**(7-8), 2-6 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: [http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/10960.pdf](http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10960.pdf)
- [7] PALENČÁR, RUDOLF, VDOLEČEK FRANTIŠEK a HALAJ MARTIN. *Nejistoty měření III: nejistoty nepřímých měření*. AUTOMA: Časopis pro automatizační techniku [online]. 2001, (12), 1-6 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: [http://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/10962.pdf](http://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10962.pdf)
- [8] 1.6.1 ELEKTRICKÉ DETEKTORY. *Radiobiologie* [online]. [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/16/161.html#ionizacnikomora>

