A cikk a SOMOS Alapítvány támogatásával készült

Sugárvédelmi célú mérőeszközök osztályozása, a röntgen sugárzás környezeti dózisegyenértékének meghatározása, és a sugárvédelmi dózismérések mérési bizonytalanságának becslése

Csete István
Magyar Kereskedelmi Engedélyezési Hivatal, Metrológiai Főosztály
1124 Budapest, Németvölgyi út.37-39

Abstract

Classification of radiation protection instruments are given according to the different measurements task and relevant IEC standard. Realization and traceability of the conventional true value of operational protection quantities (H(10)) and (Hp(10)) at the National Measurement Institute are presented. Uncertainty requirement and detailed uncertainty budget examples of a survey meter used at workplace conditions are delivered.*

Keywords: ISO,IEC, ICRP,ICRU, ambient dose equivalent H(10) , personal dose equivalent Hp(10), air kerma (K), traceability of measurement, degree of equivalence, equation of measurement, influence quantities.*

Kivonat

Bemutatásra kerül a sugárvédelmi célú mérőeszközök osztályozása, a felhasználásuk és az IEC szabványok követelményei szerint, valamint a dózismérők röntgensugárzás tartományában történő kalibrálásához szükséges operatív dózisegyenérték mennyiségek illetve a levegőben közölt dózis meghatározásának módszere és visszavezetettsége. A terület ellenőrzésre használt dózismérők mérési bizonytalanságának becslése két példán keresztül van illusztrálva.

Kulcsszavak: ISO, IEC, ICRP, ICRU, környezeti dózisegyenérték $H^*(10)$, személyi dózisegyenérték $H_p(10)$, levegőben közölt dózis (K), mérések visszavezetettsége, etalon mérőeszköz egyenértékűsége, a mérés egyenlete, befolyásoló mennyiségek.

I. BEVEZETÉS

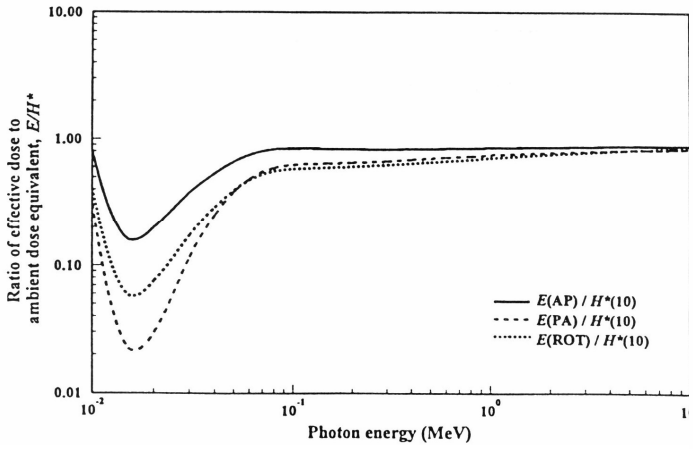
A sugárvédelemben használatos különféle dózismérők és radioaktivitást mérő mérőeszközök osztályozása, méréstechnikai követelményeinek ismerete alapvető az adott mérési feladathoz való helyes mérőeszköz kiválasztásánál. A sugárvédelmi dózismérések mérési bizonytalanságának ismerete elengedhetetlen az effektív dózis optimális becsléséhez. A különféle dózismennyiségeket mérő dózismérők hitelesítésekor elvégzett kalibrálásnak visszavezetettnek kell lennie az SI alap és származtatott mennyiségekig a mérések világméretű egységessége és elfogadhatósága érdekében.

II. SUGÁRVÉDELMI MÉRŐESZKÖZÖK OSZTÁLYOZÁSA

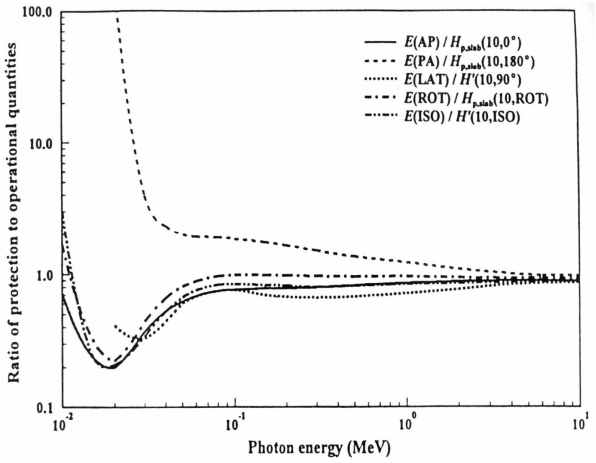
A külső ionizáló sugárzások sugárvédelmi méréseinek célja a radioaktivitás illetve kilépő részecskeszám vagy valamely operatív dózisegyenérték-mennyiség segítségével az effektív dózis meghatározása. Ennek megfelelően a mérőeszközök két fő csoportját a felületi radioaktívszennyezettség-mérők és a különféle dózismérők alkotják. A dózismérők jellemzően az effektív dózist közelítő, az ICRU és az ICRP által sugárvédelmi célra definiált, mérhető, környezeti ($H^*(10)$), illetve személyi ($H_p(10)$) dózisegyenérték-mennyiségeket mérik. Ezen operatív mennyiségek és az effektív dózis, számításokkal meghatározott hányadosa látható az 1-3 ábrákon, a foton és neutronsugárzás tipikus besugárzási irányaira vonatkozóan. A neutron sugárzás bizonyos energiáitól és irányaitól eltekintve, ezen mennyiségek megfelelő felülbecslését adják az effektív dózisnak. További részletek az ICRU 57-ben találhatók.[1].

A cikk a SOMOS Alapítvány támogatásával készült

1. ábra. Az effektív dózis (E) és a környezeti dózisegyenérték ($H^*(10)$) hányadosa a foton energia függvényében

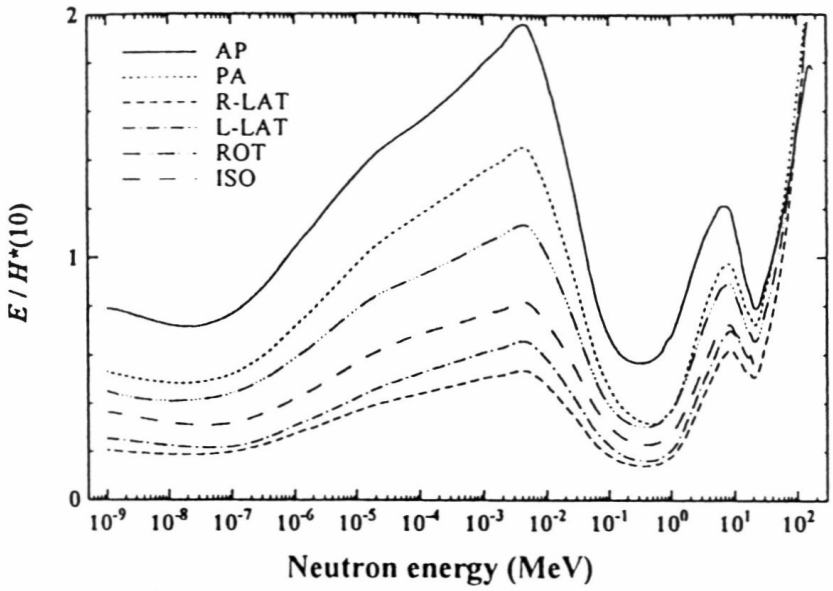


2. ábra Az effektív dózis (E) és a személyi dózisegyenérték ($H_p(10)$ hányadosa a foton energia függvényében



A hazai gyakorlatban előforduló dózismérők csoportosítása az 1. táblázatban található. Az 1. táblázatban megadott mérőeszközöket - amennyiben a mérés eredménye joghatással jár- 2 évente kötelező hitelesíttetni Magyarországon. A hitelesítési bizonyítvány minden esetben tartalmazza a kalibrációs értékeket. A hitelesség feltétele a típusvizsgálat során megállapított specifikáció teljesülése, melynek legfontosabb eleme a referencia körülmények között mért pontosság (megengedett hiba) ellenőrzése. Ennek az újrahitelesítési időtartam alatti stabilitása garantálja azt, hogy a mérőeszköz alkalmas a mérési feladatra és helyes használat esetén az elvárható pontosságú mérési eredményt szolgáltatja. Az egyes mérőeszköz-típusokra vonatkozó műszaki követelményeket, beleértve a megengedett eltéréseket is, a 4. oszlopban feltüntetett angol nyelvű szabványok tartalmazzák. Ezen nemzetközi szabványokon, mint ajánlásokon alapul a Mérésügyi Hatóságnál (MKEH) alkalmazott Típusvizsgálati és Hitelesítési Előírás. További információk az MKEH honlapján http://www.mkeh.hu találhatók. Az IEC honlapján http://webstore.iec.ch további, a sugárvédelemben használt mérőeszközökre vonatkozó szabványok találhatók, amelyeket elsősorban nukleáris létesítményekben, baleseti szituációkban illetve sugárzó anyagok felderítéséhez használnak.

3. ábra Az effektív dózis (E) és a környezeti dózisegyenérték hányadosa a neutron energia függvényében



A cikk a SOMOS Alapítvány támogatásával készült

1. Táblázat Sugárvédelmi mérőeszközök osztályozása

	Megnevezés	Mért mennyiség	Vonatkozó IEC szabvány	Tipikus méréstartomány
1	Hordozható radioaktív felületi szennyezettség mérők	Alfa és vagy béta sugárzás s^{-1}; kibocsátott részecske szám; Bq ; $Bqcm^{-2}$	60325/2002	$(0,1\text{-}10^5)$ s^{-1} $(0,1\text{-}10^4)$ $Bqcm^{-2}$
2	Telepített személyi sugárkapuk	Alfa, béta és gammasugárzás s^{-1}; kibocsátott részecske szám; Bq ; $Bqcm^{-2}$	61098/2003	$(0,3\text{-}10^4)$ s^{-1} (0,05-100) $Bqcm^{-2}$
3	Terület ellenőrzésre szolgáló hordozható dózismérők	Béta , foton és neutron sugárzás Környezeti dózis egyenérték $H^*(10)$	60846/2002 61005/2000	1 μSvh^{-1} -10 $mSvh^{-1}$
4	Környezet ellenőrzésre szolgáló dózismérők	Gammasugárzás Közölt dózis K_{lev} Környezeti dózis egyenérték $H^*(10)$	61017/1991	30 $nGyh^{-1}$ -10 μGyh^{-1}
5	Elektronikus személyi dózismérők	Foton, béta és neutron sugárzás Személyi dózis egyenérték $H_p(10)$ $H_p(0,07)$	61526/2005	1 μSvh^{-1} -1 Svh^{-1} 1 µSv -10 Sv
6	Passzív dózismérő rendszerek környezeti és személyi monitorozásra (TLD)	Béta és gammasugárzás Környezeti dózis egyenérték $H^*(10)$ Személyi dózis egyenérték $H_p(10)$	62387/2007 61066/2006 ISO 21909/2005	0,01 mSv- 10 Sv
7	Nukleáris létesítményeknél telepített dózisteljesítmény-mérők monitorok	Fotonsugárzás Közölt dózis K_{lev} Környezeti dózis egyenérték $H^*(10)$	60532/1992	10 μGyh^{-1} -10 $mGyh^{-1}$

III. A DÓZISMÉRŐK VIZSGÁLATÁHOZ HASZNÁLT KÖRNYEZETI ÉS SZEMÉLYI DÓZISEGYENÉRTÉK MENNYISÉGEK VISSZAVEZETETTSÉGE A FOTONSUGÁRZÁS (40- 300) KV TARTOMÁNYÁBAN

A környezeti és személyi dózisegyenérték mennyiségeit a levegőben közölt dózis (Kerma) mennyiségéből, mint a legalapvetőbb dozimetriai mennyiségből lehet un. konverziós tényezők segítségével meghatározni a legegyszerűbben. Ezen ($h^*(10;K)$ és $h_{pK}(10;E,\alpha)$ konverziós tényezők a mennyiségek definícióiból kiindulva és az ICRU gömb anyagának hatáskeresztmetszet adatait felhasználva MC számítási módszerrel lettek meghatározva ±2% bizonytalansággal (k=1), és az ISO 4037-3 kiadványban [2] találhatók. (A $H^*(d)$, illetve ($H_p(d)$ mennyiségeket direkt módon is lehetne mérni a definíciójukból kiindulva, ami a gyakorlatban a Q minőségi tényező ismeretében az elnyelt dózis pontszerű meghatározását jelentené az ICRU lágy szövetben, de ilyen elsődleges etalon mérőeszköz még nem terjedtek el.)

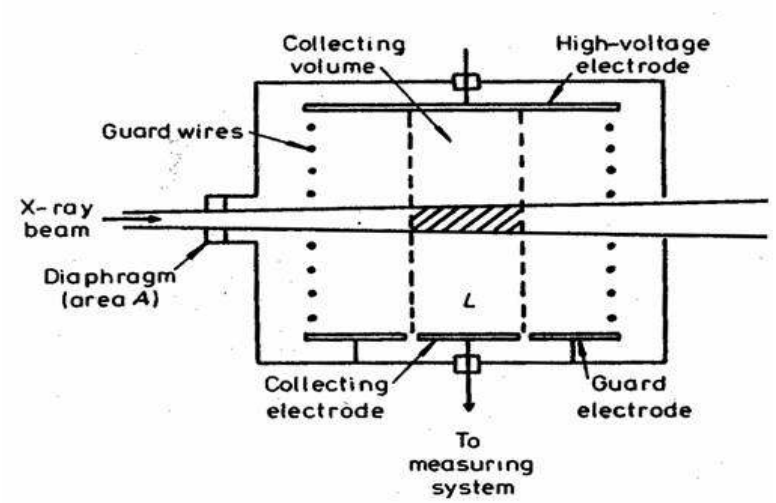
A fotonsugárzás (40- 300) kV un. közepes röntgen tartományában sugárvédelmi célokra 10 db un. keskeny spektrumú sugárminőség van definiálva az ISO 4037 szabványban. Ezen sugárminőségekre a levegőben közölt dózist elsődleges etalonnal tudjuk meghatározni Magyarországon**.** Az etalon egy un. szabadlevegős ionizációs kamra, amely a levegőben közölt dózist (K_{lev}) az alábbi egyenlet szerint méri ±0,34% bizonytalansággal (k=1).

$$K = \frac{Q}{\rho V} \times \frac{W}{e} \times \frac{1}{1-g} \times k_h k_s k_d k_a k_l k_p k_{sc} k_e \qquad (1)$$

A cikk a SOMOS Alapítvány támogatásával készült

Q a mért ionizációs töltés; ρ a levegő sűrűsége; ***V*** a mérőtérfogat (vonalkázott rész a 4. ábrán), k_i az etalon korrekciós tényezői; ***W/e*** = (33,97 ± 0,05) J/C a száraz levegőben egy ionpár keltéséhez szükséges átlagos energia; ***g*** a keletkezett töltések fékezési sugárzása miatt megszökő energiahányad, ami 300 keV-nél kisebb energiájú röntgensugárzás esetén elhanyagolható. Az (1) egyenletben szereplő nyolc fontosabb korrekciós tényező szorzata sugárminőségtől függően (0,2-0,9)% között van, jelentésük az alábbi: A levegő nedvességtartalma miatti korrekció k_h, értékét az ICRU publikálta; k_s a rekombinációs veszteséget, k_d az elektromos tér torzulását, k_a a belépő blende és a mérőtérfogat súlypontja közötti levegő gyengítését, k_l és k_p a blende élén illetve a kamra falán átjutó sugárzást korrigálja. Ezeket a korrekciókat, melyek a konstrukciótól és a fotonenegiától függnek, mérésekkel határoztuk meg.

4. ábra Szabadlevegős ionizációs kamra a röntgensugárzás elsődleges etalonja



A fotonok ionkamrán belüli szóródására és a keletkezett elektronok veszteségére vonatkozó k_{sc} és k_e korrekciókat nem lehet kísérletileg meghatározni. Ezek meghatározása Monte Carlo módszerrel (MC)lehetséges a fotonok és elektronok levegőre, és a kamra anyagára vonatkozó különböző kölcsönhatások (fotoeffektus, koherens v. Rayleigh szórás, compton szóródás, bremsstrahlung, elektron fékezőképesség) figyelembevételével. Az alkalmazott MC program az EGS4/PRESTA kód volt, 10 keV-es lépésekben a 10 keV-250 keV tartományban monoenergetikus 2×10^7 db beeső fotont felhasználva. Mindkét korrekciós tényező számítása a (2) egyenlet alapján történt, ahol az $E_{dep}(E)$ az E energiájú fotonokból származó átadott energia a mérőtérfogatban, ami arányos a keletkezett töltéssel, ha W/e értékét energia függetlenek tekintjük, a $\Delta E_{dep}(E)$ a megfelelő zavaró effektus pozitív vagy negatív energia járuléka, a $(\mu_{tr}(E)/\rho)_{air}$, a levegő fajlagos energia átadási tényezője és a $d\Phi/dE$ az energia fluens.

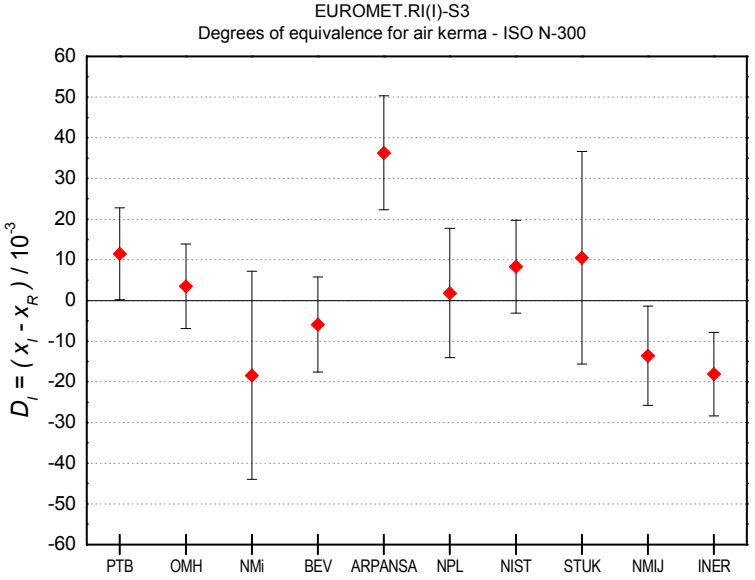
$$k = \left(\int \frac{E_{dep}(E) - \Delta E_{dep}(E)}{E_{dep}(E)} (\mu_{tr}(E)/\rho)_{air} E \frac{d\Phi}{dE} dE\right)\left(\int (\mu_{tr}(E)/\rho)_{air} E \frac{d\Phi}{dE} dE\right)^{-1} \qquad (2)$$

A (2) egyenletből látható, hogy egy adott röntgenspektumra (standard sugárminőség) vonatkozó korrekciós tényező a monoenergetikus fotonsugárzásra számítottból a kerma spektrummal súlyozva kiszámítható. A nemzetközi metrológiai gyakorlatban használt szabványos röntgen sugárminőségek foton fluens és a levegő kerma spektrumait a Német Mérésügyi Intézet (PTB) publikálta 2000-ben [4]. Az EGS4 kód alkalmazásainak részletei a [3] publikációban találhatók. Az EGS4 kóddal végzett számításokat az SI referencia értékeket adó Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatal (BIPM) laboratóriumában is elvégezték további két (EGSnrc és PENELOPE) MC programmal ellenőrizve azt, és az eltérések nem voltak nagyobbak, mint 0,05%. Részletek a BIPM honlapjáról letölthetők. http://www1.bipm.org.

A cikk a SOMOS Alapítvány támogatásával készült

A szabadlevegős ionizációs kamra, mint nemzeti etalon nemzetközi egyenértékűségét 1974 óta a BIPM etalonjához történő un. kulcs-összehasonlítások eredményei biztosítják. Az 5. ábrán az N-300 jelű közepes röntgen sugárminőségre 2008-ban publikált eredmény látható példaként. Az eredmények alapján és a CIPM MRA egyezmény aláírójaként a dozimetriai laboratórium kalibrációs bizonyítványait 53 országban elfogadják etalonunk a világ legjobbjai között van.

5. ábra Az OMH szabadlevegős ionizációs kamrájára alapuló közölt dózis mérés egyenértékűsége 300 kV-os röntgensugárzáson (a vonal a mérési bizonytalanságot jelenti (k=2))



IV. MÉRÉSI BIZONYTALANSÁG MEGHATÁROZÁS A TERÜLETELLENŐRZÉSRE HASZNÁLT DÓZISMÉRŐK ESETÉBEN

Az ICRP 75 (1997) 251. cikkelye szerint az éves dóziskorlát meghatározásának bizonytalansága ±50%, ha a korlát 10 mSv/év effektív dózis alatt van, akkor 200 % lehet 95%-os konfidencia szinten.

A területellenőrzést szolgáló sugárvédelmi mérések teljes mérési bizonytalanságában ami az effektív dózis becslésének bizonytalanságát jelenti- amihez mérőeszköz mérési bizonytalansága akkor nem ad jelentős járulékot, ha a dózismérő teljes mérési bizonytalansága kisebb, mint 30% k=1-nél. Ebből levezethetően a kalibrálás során, referencia körülmények között, a kalibrálás bizonytalansága nem lehet 10%-nál több. (ICRU 47) A sugárvédelmi műszerekre vonatkozó nemzetközi elektronikus szabványok relatív saját hibának általában (15-20) %-ot engedélyeznek.

Az alábbiakban egy területellenőrzésre használt, a gyártó szerint az IEC 60846:2002 szabványnak megfelelő, típusvizsgált, analóg kijelzésű dózismérővel mért környezeti dózisegyenérték teljesítmény mérési bizonytalanságát határozzuk meg akkor, ha a sugárzási térről nincs további információnk (a), illetve akkor, ha a sugárzási viszonyokat becsülni tudjuk és a típusvizsgálat eredményei is rendelkezésre állnak (b). A számítások összhangban vannak az IEC 62461ajánlásával [7] A mérés legegyszerűbb egyenlete, amely a szabványban specifikált befolyásoló mennyiségeket figyelembe veszi az alábbi:

$$H^*(10)=K_{intr}\,K_{E\Phi}\,K_{pow}\,K_{temp}\,K_{hum}\,K_{press}\,K_{geo}\times(G-D_{zero}-\sum D_{EMC}-D_{vib}-D_{shock}) \qquad (3)$$

ahol K_{intr} a korrekciós tényező a saját hibára (beleértve a kalibrációs faktort és a nem-linearitást), $K_{E\Phi}$ a sugárzás energiájára és irányára , K_{pow} a tápellátásra, K_{temp} a környezeti hőmérsékletre, K_{hum} a relatív nedvesség tartalomra, K_{press} a légnyomásra, K_{geo} a készülék pozíciójára (beleértve az analóg skála felbontását és a leolvasás hibáját) vonatkozó korrekciós szorzó tényező. G a mutatott érték környezeti dózisegyenértékben (beleértve a mért érték szórását) D_{zero} a nullpont csúszása, -

A cikk a SOMOS Alapítvány támogatásával készült

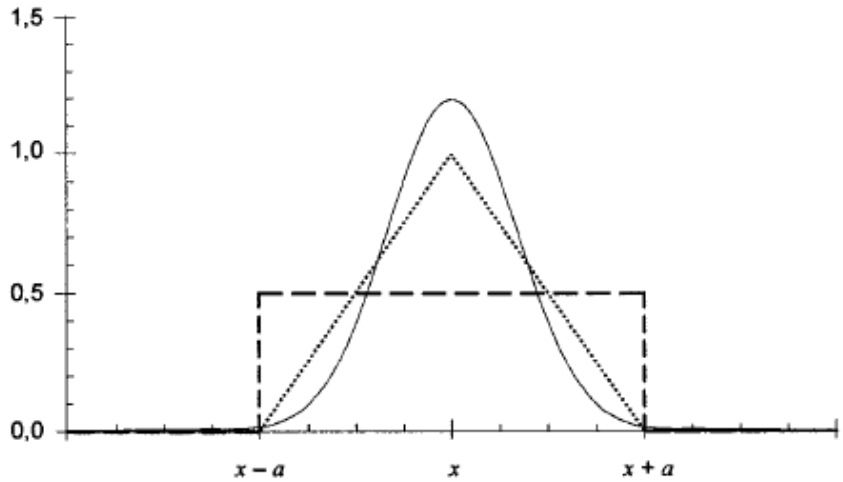
$\sum D_{EMC}$ a szabványban specifikált 7 EMC, D_{vib} és-D_{shock} a vibrációra és az esésre vonatkozó additív környezetállósági érték.

Feltételezhető, hogy a (3) egyenlet valószínűségi változói nem korrelálnak, vagyis az egyes befolyásoló hatások egymástól függetlenek, így a mért érték standard bizonytalanságának négyzete $u^2(H^*(10))$, az egyes komponensek érzékenységi együtthatókkal súlyozott négyzetösszege. Az érzékenységi együtthatók a (3) egyenlet komponensek szerinti parciális deriváltja. (Például a G mutatott érték érzékenységi együtthatója egyenlő a K korrekciós tényezők szorzatával.) Részletes magyar nyelvű elmélet a [8] irodalomban található.

Egy háromdekádos logaritmikus kitérésű mutatós dózismérő esetén, aminek alsó méréstartományában (0,1 μSv/h-100 μSv/h) a leolvasott érték 7,5 μSv/h, az (a) esetre számított bizonytalanság komponenseit a 2. táblázat, a (b) esetre vonatkozót a 3. táblázat tartalmazza.

Az IEC 60846:2002 szabványban a befolyásoló mennyiségek megengedett hatása a kijelzés/mért értékre (response) szimmetrikus relatív tartományokkal van megadva. Például a dózismérő kijelzését a referencia Cs-137 sugárzás referencia irányához képest, a sugárzás energiája és iránya együttesen ±40%-ban befolyásolhatja. Ez azt jelenti, hogy a kijelzéshez alkalmazott $K_{E\Phi}$ korrekciós tényező 1/1,4=0,71 és 1/0,6=1,67 között lehet, aminek az átlagát 1,19±0,48-at kell használni a legvalószínűbb $K_{E\Phi}$ érték körüli szimmetrikus eloszlástartomány megállapítására a mérési bizonytalanság számítás útmutatójával [8] összhangban. A befolyásoló mennyiségek eloszlásfüggvényeinek két független változó esetén és egyéb információ nélkül háromszög eloszlás, 3 változó esetén már Gauss eloszlás lett választva. Eloszlásfüggvényük a 6. ábrán látható.

6. ábra A leggyakoribb egyenletes, háromszög és normál eloszlás sűrűségfüggvényei 1/a egységben. A standard 68%-os értékek a/√3, a/√6 és a/3.



A (b) eset egy árnyékolt Co-60 sugárforrás körüli mérés példája, ahol a típusvizsgálat eredményei alapján a 300 keV-1,3 MeV és ±45° energia és beesési szög tartományra $K_{E\Phi}$ =0,92×1,08=1,0±8% az egységnyi kalibrációs faktorból (4%) és a nem-linearitás 0,96 korrekciós tényezőjéből (1%) K_{intr}=0,96±4,1% adódik, a leolvasott 7,5 μS/h érték szórása 6,5% (extrapolált érték a típusvizsgálati adatokból) és az additív EMC és a rázási komponensek elhanyagolhatók.

Az (a) esetben a mért érték 9,9 μS/h ±5,01μS/h (51%) (k=2) a mérőeszközről leolvasott egyetlen 7,5 μS/h érték helyett, a (b) esetben pedig 7,3 μS/h ±1,2 μS/h (16%) (k=2)

A két eredmény ugyan konzekvens a kiterjesztett mérési bizonytalanságot figyelembe véve, de jól mutatja, hogy ugyanaz a mérőeszköz a mérés körülményeire és a mérőeszközre vonatkozó plusz információk esetén - beleértve a megfelelő mérési tapasztalatot az eloszlásfüggvények helyes megválasztásához- az ICRP követelményeknek megfelelő mérési pontosságot tud adni.

A cikk a SOMOS Alapítvány támogatásával készült

2.Táblázat. Bizonytalansági komponensek az IEC 60846 követelményeiből számolva. (a)

2.Táblázat
Bizonytalansági komponensek az IEC 60846 követelményeiből számolva. (a)

$$H^*(10)=K_{intr}\,K_{E\Phi}\,K_{pow}\,K_{temp}\,K_{hum}\,K_{press}\,K_{geo}\times(G-D_{zero}-\sum D_{EMC}-D_{vib}-D_{shock})$$

Komponens	*Érték	Standard bizonytalanság (u)	Eloszlás	Érzékenységi együttható (c)	Bizonytalansági járulék (u×c) µSv/h	IEC 60846 követelményei
K_{intr}	1,04	0,21/√6= 0,086	háromszög	9,47 µSv/h	0,814	nem lin.+kalibráció±20%
$K_{E\Phi}$	1,19	0,48/√6= 0,196	háromszög	8,27 µSv/h	1,622	energia +irány ±40%
K_{pow}	1,00	0,05/√3= 0,029	négyszög	9,85 µSv/h	0,286	±5%
K_{temp}	1,04	0,21/√3= 0,121	négyszög	9,47 µSv/h	1,146	±20%
K_{hum}	1,00	0,10/√3= 0,058	négyszög	9,85 µSv/h	0,571	±10%
K_{press}	1,00	0,10/√3= 0,058	négyszög	9,85 µSv/h	0,571	±10%
K_{geo}	1,02	0,15/3= 0,05	normál	9,65 µSv/h	0,483	pozíció+skála felbontás+ parallaxis a végkitérés 2%-a ($10^{2/33}$=1,15)
G (µSv/h)	**7,50**	0,085×7,5 µSv/h= 0,638	normál egy leolv.	1,31	0,838	[16-H*(10)/(1µSv/h)] %=8.5%
D_{zero}	0 µSv/h	0,015 µSv/h/√3= 0,009	négyszög	-1,31	0,011	
**$\sum D_{EMC}$	0 µSv/h	0,7×0,2 µSv/h/√3= 0,081	négyszög	-1,31	0,281	0,7×alsó méréshatár
D_{vib}	0 µSv/h	0,7×0,2 µSv/h/√3= 0,081	négyszög	-1,31	0,106	0,7×alsó méréshatár
D_{shock}	0 µSv/h	0,7×0,2 µSv/h/√3= 0,081	négyszög	-1,31	0,106	0,7×alsó méréshatár
				standard bizonytalanság	**2,52**	

A mérés végeredménye: H*(10)=9,85 µSv/h ±5,01 µSv/h (k=2)

* A legjobb becslés a várható értékre
** IEC 61000-4-2;3;4;5;6;8;11 szakaszok szerinti 7 zavar típus mindegyikére

A cikk a SOMOS Alapítvány támogatásával készült

3.Táblázat Bizonytalansági komponensek a típusvizsgálat és a mérési körülmények figyelembevételével (b)

$$H^*(10)=K_{intr}\,K_{E\Phi}\,K_{pow}\,K_{temp}\,K_{hum}\,K_{press}\,K_{geo}\times(G-D_{zero}-\sum D_{EMC}-D_{vib}-D_{shock})$$

Komponens	*Érték	Standard bizonytalanság (u)	Eloszlás	Érzékenységi együttható (c)	Járulék (u×c) µSv/h	Típusvizsgálati eredmények
K_{intr}	0,96	0,041/√6= 0,017	háromszög	7,65 µSv/h	0,130	nem lin.=0,96±1% kalibr.=1±4%
$K_{E\Phi}$	1,00	0,08/√6= 0,033	háromszög	7,34 µSv/h	0,242	$K_{E\Phi}$ =(0,92-1,08) ±°45-ban
K_{pow}	1,00	0	négyszög	7,34 µSv/h	0,000	új elemek !!
K_{temp}	1,03	0,01/√3= 0,006	négyszög	7,13 µSv/h	0,043	K_{temp}=1,03±1% 10 °C-on
K_{hum}	0,99	0,005/√3= 0,003	négyszög	7,42 µSv/h	0,022	K_{hum}=0,99±0,5% 80% rel. légnedv
K_{press}	1,00	0	négyszög	7,34 µSv/h	0,000	elhanyagolható
K_{geo}	1,00	0,07/3= 0,023	normál	7,34 µSv/h	0,169	skála felbontással és parallaxissal a végkitérés1%-a
G (µSv/h)	7,50	0,065×7,5 µSv/h= 0,488	***normál egy leolv.	0,98	0,478	6,5% interpolált érték
D_{zero}	0 µSv/h	0,015 µSv/h/√3= 0,009	négyszög	-0,98	0,008	
$\sum D_{EMC}$	0 µSv/h	0 µSv/h	négyszög	-0,98	0,000	elhanyagolható (jól árnyékolt)
D_{vib}	0 µSv/h	0 µSv/h	négyszög	-0,98	0,000	kézben tartva
D_{shock}	0 µSv/h	0 µSv/h	négyszög	-0,98	0,000	kézben tartva
				standard bizonytalanság	0,58	

A mérés végeredménye: H*(10)=7,34 µSv/h ±1,2 µSv/h (k=2)

IRODALOM

[1] Conversion coefficients for use in radiation protection against external radiation; International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) Report 57 Bethesda MD, USA (1998)
[2] Calibration of area and personal dosemeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence; ISO 4037 Part 3
[3] T.W. M Grimbergen et al. Phys. Med. Biol. 43 pp. 3207-3224
[4] PTB-Bericht PTB-Dos-34 (2000)
[5] L. Büermann, I. Csete et al. Comparison of National Air Kerma Standards for ISO 4037 narrow spectrum series int he range 30 kV to 300 kV EUROMET Report 545 (2008) Metrologia, Tech. Suppl. in press.
[6] Csete István Új fizikai mennyiségek a sugárvédelemben; Fizikai Szemle 2004/7
[7] Determination of uncertainty in measurement; IEC TR 62461/2006
[8] Útmutató a mérési bizonytalanság kifejezéséhez. (GUM) BIPM, IEC, IFCC,ISO,IUPAC,IUPAP, OIML 1995