Mérési sorozatok tanulságai

Kovács Tibor - Rényi Tibor

A cikkben olyan valós eszközökkel ténylegesen végrehajtott mérési sorozatokat mutatunk be, amelyek arra szolgálhatnak, hogy helyesen vegyük fel a használati etalonok kalibráláskor figyelembe veendő hibáit és helyesen számítsuk ki az etalonokhoz társított mérési bizonytalanságot. A végrehajtott mérési sorozatok tapasztalati adatokat szolgáltatnak a kalibrálás bizonytalanságának számításához, és igazolják a nem eleve elhatározott ("apriori") és nem szubjektív megközelítéssel végzett hagyományos hibaértelmezés és eredő bizonytalanság-becslés helyességét.

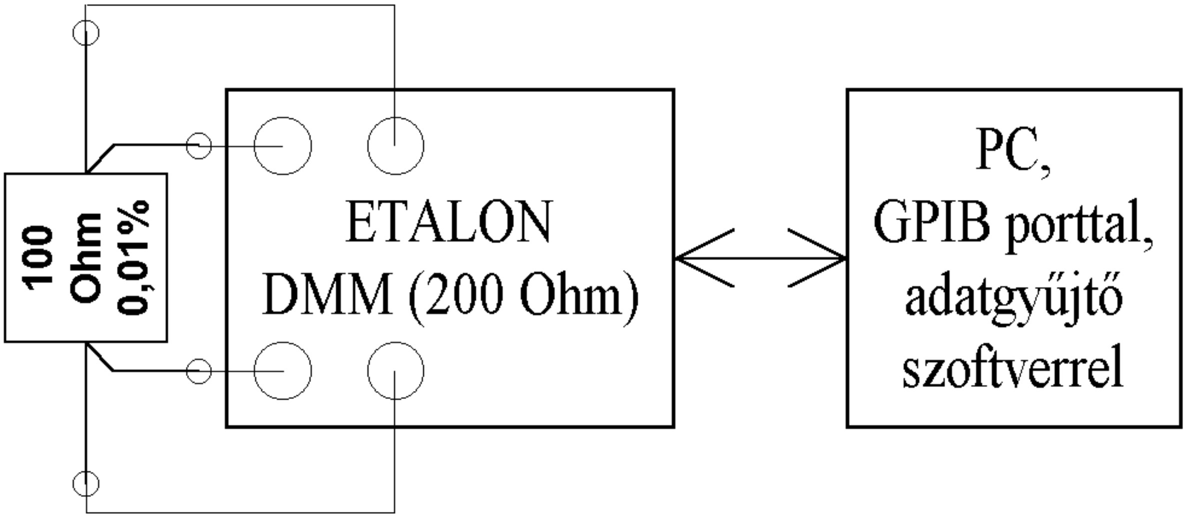
A mérési sorozatok (felvételének) célja

A mérési képesség rendszeres önellenőrzését mindig is fontosnak tartottuk a kalibrálási szolgáltatásaink minőségi színvonalának fenntartása érdekében. Az etalonok 2-4 évenkénti külső kalibráltatása közötti időszakban saját összehasonlító méréseket is végzünk.[1] A kalibrálási eljárások folyamatos tökéletesítésének feladattervébe illeszkedik a szigorúan ellenőrzött körülmények között lefolytatott hosszabb idejű mérési sorozatok végzése. Statisztikailag értékelhető sorozatméréseket számítógépes mérésvezérléssel és adatgyűjtéssel tudunk megvalósítani. A kiválasztott etalonok IEEE 488 (GPIB) vagy soros (RS 232) kimenetéről kapott mérési adatokat file-ba gyűjti a gép, ahonnan azután az adathalmaz lekérdezhető és elvégezhető az eredmények értékelése. A most bemutatott mérési sorozat felvételének több célja volt:

- a mérésben résztvevő etalonok "pillanatnyi pontosságának" ellenőrzése
- a kalibráláskor figyelembe venni szokott hibahatár "érvényességének" és a standard bizonytalalanság-becslés helyességének ellenőrzése
- a mérési eredmények tényleges valószínűségi eloszlására vonatkozó lehetőleg minél több információ beszerzése, - jó esetben a jellemző eloszlástípus meghatározása
- a mérésben résztvevő etalonok saját statisztikai viselkedésére jellemző következtetések levonása (ha ilyen egyáltalán lehetséges)
- hasonló mennyiségek hasonló mérésekor tett feltételezések helyességének megalapozása (→logikai indukció) [2]

A mérési elrendezés

A mérendő mennyiség egyenáramú villamos ellenállás volt, amelyet 100 Ω-os normálellenállás testesített meg, és amelynek értékeit digitális multiméter ellenállás-mérés üzemmódjában mértünk, 4 vezetékes mérőkapcsolásban. Az elrendezést az 1. ábra mutatja.



1. ábra Mérési elrendezés

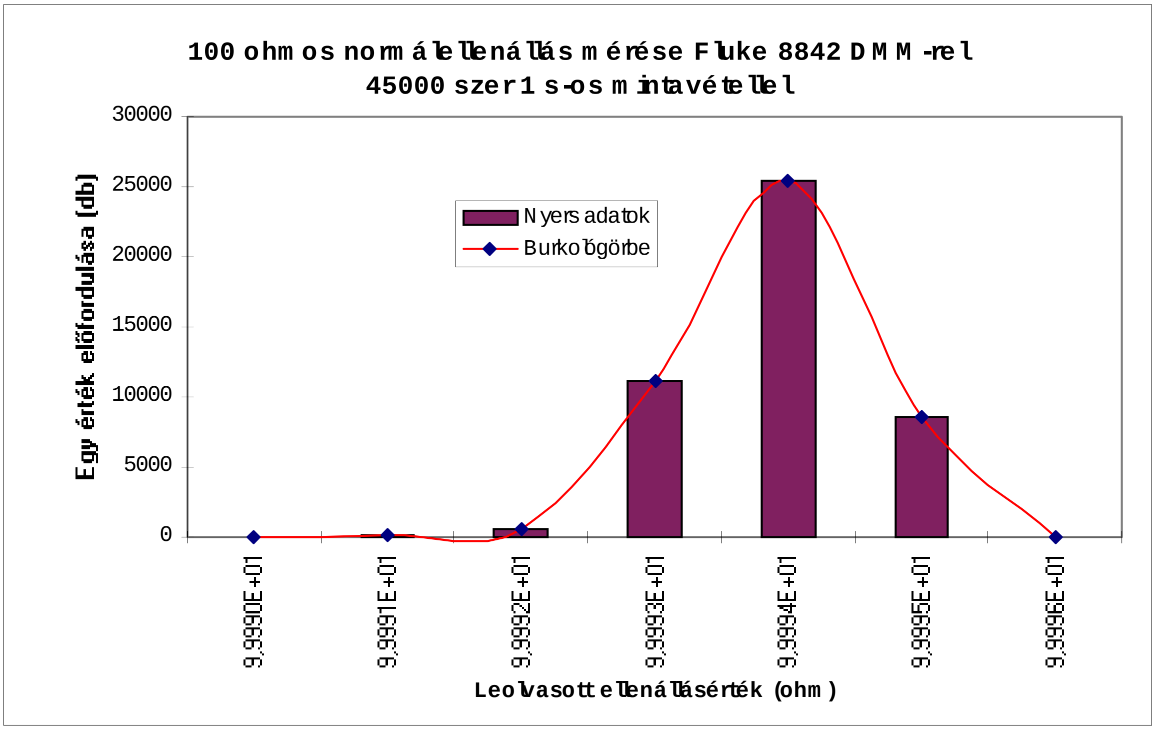
A mérési elrendezés egyszerű, kevés vezetékezést igényel, kellően zajmentesen összeállítható. A normálellenállást rövid, árnyékolt 4-eres, 0,75 mm^2 keresztmetszetű vörösréz mérőkábellel csatlakoztattuk a DMM-hez. A multiméter GPIB digitális kimenetét szabványos kábellel kötöttük össze az 1 m távolságban elhelyezett PC-vel.
A mérési összeállítás közelében egyéb mérést vagy más esetleg zavart okozó műveletet a mérési sorozat ideje alatt nem végeztünk. A mérési idő 50%-a éjszakára esett, amikor minimális volt a laboratórium és a teljes épület villamos zajterhelése, továbbá senki nem tartózkodott az épületben.
A mérések alatt a laboratórium hőmérséklete 23 ± 1 ^{o}C volt.

A mérésben résztvevő mérőeszközök adatai

1. Digitális multiméter
   Tip.: FLUKE 8842A
   No.: S/N 4580004
   Választott mérési tartomány: 0...200,000 Ω
   Kijelzés: 199,999 Ω
   Felbontás a választott mérési tartományban: 1 mΩ
   "Accuracy" a választott mérési tartományban: ± 0,014 Ω
   Beállított mintavételi mód: "Medium/Slow"
   Adatkimenet: IEEE 488 (GPIB)
   Utolsó kalibrálás. 2002. 01.: "Megfelelt!"
2. Normálellenállás
   Tip.: CCCP, P-331
   Névleges érték: 100 Ω
   No.: 076208
   Accuracy: 0,01%
   Utolsó kalibrálás: 2001.10.: "Megfelelt!"
3. Asztali számítógép
   PI., Win98, Flow-Cont Kft által fejlesztett adatgyűjtő program

A kapott mérési eredmények eloszlása

Az elvégzett mérések száma: 45000 (!)
A mérési eredmények gyakoriságának eloszlását a 2. ábra mutatja.



2. ábra Az eredmények eloszlása

Az eloszlás jellege és jellemző pontjai:

- A maximális gyakorisághoz tartozó ellenállás értéke: R_{N0} = 99,994 Ω
- A kapott görbéhez legjobban közelítő ismert eloszlás: a normál (Gauss-Laplace) eloszlás, a továbbiakban **ezt a közelítést fogadjuk el**, és eszerint számolunk
- A mért mennyiség várható értéke: $R_{NV} \approx R_{N0}$
- A kapott normális eloszlás 95% -os lefedettségéhez tartozó "2∗σ" értéke a görbéből, a sűrűségfüggvény integrálásával– azaz az eloszlásfüggvény P = **0,025** és P = **0,975** valószínűségű pontjainak megkeresése után:

$$2*\sigma = \mathbf{0{,}00182}\ \Omega$$

Megjegyezzük, hogy a DMM utolsó digitje által kijelzett és rögzített mennyiségek látszólagosan diszkrét (pl. binomiális) eloszlása nagy számú mintavétel esetén elméletileg is **jól közelíthető a normális** eloszlással. [4]
Nagyobb felbontású DMM-el végzett mérési sorozataink eredményei gyakoriságának burkológörbéje még szembetűnőbben egybeesik a Gauss-görbével.
A matematikai statisztika jól ismeri az úgynevezett "tapasztalati sűrűségfüggvényt", amelyet nagy számú minták diszkrét eloszlása esetén is kellő elméleti megalapozással lehet képezni. Az így kapott lépcsős függvény vagy sűrűség-hisztogram a gyakorlatban elfogadható pontossággal közelíti a folyamatos eloszlások f(x) elméleti sűrűségfüggvényét. [7]
Tehát az alkalmazott közelítő módszerünk elméletileg is kellőképpen megalapozott.

Az eredmények összevetése a műszerkönyvi (gyári) adatokkal és legutolsó kalibrálás adataival

A **DMM** kalibrálási eredményei a 200 Ω-os tartományban Ω-ban:

Helyes érték	Mért érték	Hiba	Mérési bizonytalanság
0,0000	– 0,003	– 0,003	0,0017
100,0012	99,989	– 0,012	0,0014

A gyári specifikációban közölt "Accuracy" aktuális értéke 100 Ω-nál:

h = ± 0,014 Ω

A **normál ellenállás** kalibrálási eredményeiΩ-ban:

Névleges érték	Mért érték	Hiba	Mérési bizonytalanság
100,0000	100,0025	+0,0025	0,0012

A gyári specifikáció adata:

h = ± 0,01 Ω

A "Mérési bizonytalanság" oszlopban a legutolsó kalibrálási bizonyítványban szereplő, az etalont kalibráló akkreditált laboratórium által közölt kiterjesztett mérési bizonytalanság (U_{kal}) adata található.

A kapott eredmények értelmezése és értékelése

Az etalonok **értéktartási** "stabilitásának" egyszerű ellenőrzését úgy végezhetjük el, hogy összehasonlítjuk az utolsó kalibrálás adatait a most felvett adatokkal. Nyilvánvaló, hogy a felvett mérési sorozat azt a helyzetet rögzíti, amikor az etalonok "egymást mérik". A kapott sűrűségfüggvény tulajdonképpen két eloszlás eredő sűrűségfüggvényét mutatja, nevezetesen az R_N normálellenállás megmérését a DMM-el, vagy másképpen - de ugyanolyan helytállóan - a DMM ellenőrzését az R_N-el. Ha nem lenne semmi egyéb ismeretünk a két etalon viselkedéséről és előéletéről, akkor nem tüntethetnénk ki egyiket sem a másikkal szemben, azaz el kellene fogadnunk, hogy nincs alapja semmilyen külön minősítésnek azon kívül, amit a kapott eloszlásgörbe mutat. Ugyanakkor gyakorlott szakemberek számára több okból is belátható, hogy az **R_N normálellenállás a stabilabb**, értékét hosszú ideig jól tartja. Ez adódik a szerkezeti kivitelből is, de a legmeggyőzőbb az, hogy rendelkezésünkre állnak 15 évre visszamenően R_N hitelesítési (kalibrálási) adatai.
Ezek szerint a 100 Ω-os névérték eltérései a ΔR = +0,0025....+0,0029 Ω között voltak (U = 0,0005 Ω bizonytalansággal!), ami 0,003%-os hosszú idejű "tapasztalati hibahatárnak" feleltethető meg! (A gyártó 0,01%-ot garantált)
Ugyanez a stabilitás - ugyancsak érthető okokból - a DMM-re nem mondható el, és nem is várjuk el tőle. A DMM-ről szerzett tapasztalatok azt mutatják, hogy az ellenállásmérés üzemmódban a készülék tartja ugyan 100 Ω-on a garantált 0,014 % -os hibahatárt, de ezt ki is használja, és 3-4 évenként rászorul a műszer a gyártó szakszervizében végezhető "beszabályozásra".
Mindezek után fogadjuk el, hogy az R_N-el "mérjük meg" a DMM-et, és így vizsgáljuk a mérési eredményeket.
Az utolsó kalibráláskor a DMM hibája a vizsgált ponton –0,012 Ω volt, azaz a 100 Ω körüli értékeket rendszeresen kisebbnek mérte.
Az R_N kalibráláskori hibája +0,0025 Ω volt, tehát, ha ezzel az értékkel korrigáljuk a névértéket, akkor úgy közelítjük meg legjobban a valóságot, ha megállapítjuk, hogy a 100,0025 Ω- ot most 99,994 Ω -nak méri a DMM.

Így jelenleg a DMM aktuális értékmutatási hibáját 99,994 –100,0025 = –0,0085 Ω-nak találjuk, ami kisebb, mint a kalibráláskor talált hiba, azaz a mérőeszköz elég jól "tartja magát".

Számítsuk ki most a megszokott módon a mérési sorozattal kapott eredmények eredő bizonytalanságát. A "megszokott mód" azt jelenti, hogy minden olyan kalibrálás során, amikor egyidejűleg több etalont használunk, az etalonok eredő standard bizonytalanságát (is) ki kell számolnunk.
Joggal feltételezhetjük, hogy az eredő normális eloszlás két ugyancsak normális eloszlás konvolúciójaként jött létre.[3], [4] Az egyik a DMM-hez rendelhető, a másik az R_N-hez rendelhető normális eloszlás. Mindkét eset akár létre is hozható, ha pl. a normálellenállást $(2...3)*10^{-6}$ (ppm) bizonytalansággal tudnánk mérni, akkor a kapott eloszlás gyakorlatilag tisztán az R_N értékeinek szórását írná le, illetve fordítva, ha olyan ellenállás normáliánk lenne, ami $(2...3)*10^{-6}$ (ppm) bizonytalansággal megtestesíti a 100 Ω-ot, akkor meg tisztán a DMM eredményeinek "saját eloszlását" kapnánk.

Az eredő standard mérési bizonytalanság tehát:

$$u(y) = \sqrt{\left(\frac{h_{DMM}}{2}\right)^2 + \left(\frac{h_{R_N}}{2}\right)^2}$$

és a k=2-vel kiterjesztett eredő mérési bizonytalanság

$$U = 2*u(y)$$

ahol $h_{DMM} = 0{,}014\ \Omega$ és

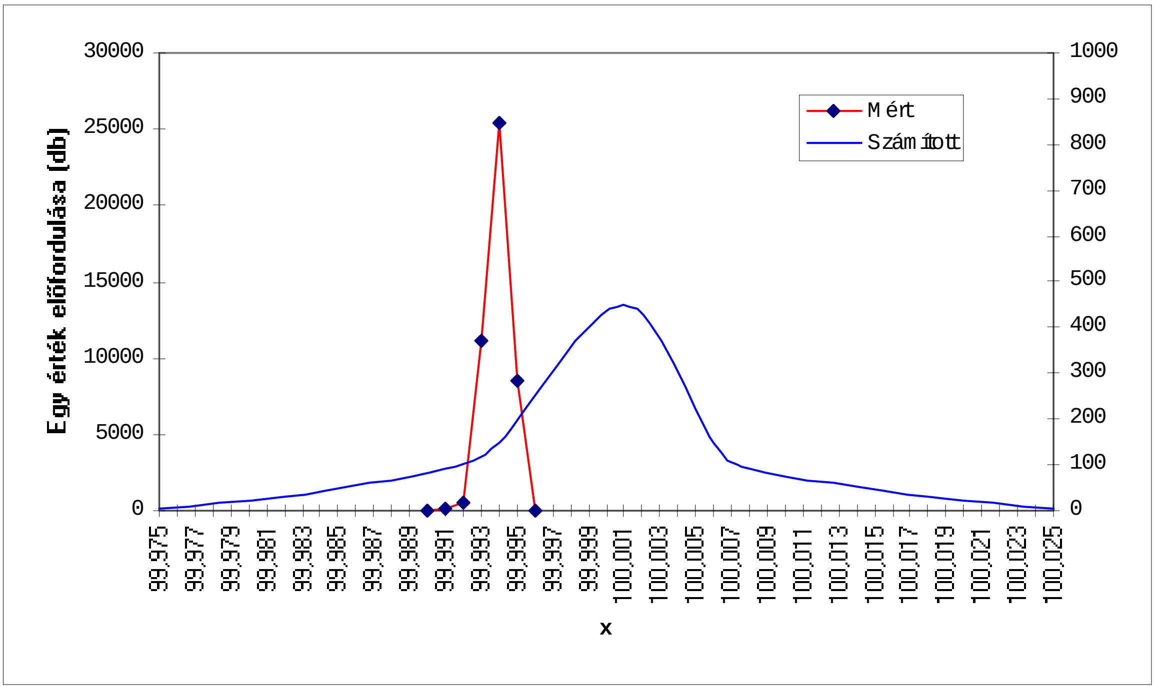
$h_{RN} = 0{,}01\ \Omega$

továbbá:

$$U = 2*\sqrt{0{,}007^2 + 0{,}005^2} = 2*8{,}6023*10^{-3} = 0{,}0172\ \Omega$$

Ez az adat értelemszerűen és definicíószerűen azt a "$2*\sigma$" értéket fejezi ki, amit kalibráláskor a mérési eredményeinkhez rendelünk.

Az U= "$2*\sigma$"-val jellemzett eloszlási sűrűség-görbe egy olyan haranggörbét határoz meg, amely bőven lefedi a mérési sorozathoz tartozó sűrűségfüggvényt.



3.ábra A számított és mért **sűrűség-görbék**

Következtetések

A fentiekből levonható következtetések az alábbiakban foglalhatóak össze:

- A vizsgált etalonokkal kapott mérési eredmények szóródásának eloszlása igen jól közelíti a **normális eloszlást**. Kalibráláskor nem szükséges másféle eloszlással számolni az etalonokból eredő standard bizonytalanságok bemenő adatait.
- Nem helytelen (sőt valószínűleg a legközelebb van a valósághoz) az a becslés, hogy a bizonytalansági leltárban az etalonok gyárilag megadott és rendszeres hitelesítéssel vagy kalibrálással ellenőrzött hibahatárából számított $u_{et} \approx \dfrac{h_{et}}{2}$ értékkel szerepeltetjük az etalonokhoz rendelt standard bizonytalanságot
- A tárgyalt vagy ahhoz hasonló mérési sorozatok felvétele és az eloszlás ábrázolása hasznos eszköz arra, hogy ellenőrizzük etalonjaink mérőképességét, öregedését és romlását.
- Bár itt most csak villamos mennyiségeket mérő illetve megtestesítő etalonokról volt szó, igen nagy a valószínűsége annak, hogy a tömeg, a hőmérséklet, a nyomás és egyéb fizikai mennyiségek mérésére szolgáló mérőeszközök és mérési összeállítások viselkedése is hasonló.

Tervezzük hőmérséklet- és tömegmérési sorozatok felvételét is.

Azok számára, akik a fentieket evidenciának tartották és tartják, megjegyezzük, hogy ennek a dolgozatnak a szerzői is ezt gondolták, és **eszükbe sem jutott volna** a bemutatott méréseket elvégezni, ha nem találkoztak volna az EA kiadványok és a NAT minősítőinek eltérő vélekedésével és állításaival. Túlzottnak, sőt megalapozatlannak tartottuk azt a vélekedést és "előírást", hogy az etalon DMM-ek és egyéb etalon mérőeszközök kalibráláskor figyelembe veendő standard bizonytalanságát az etalon 1 (vagy 2) éves "Accuracy" = h_{et} adatából + az etalon utolsó(?) kalibrálásakor megadott mérési bizonytalanságból (U_{kal}) kell számítani, mégpedig az

$$u_{et} = \sqrt{\left(\frac{h_{et}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{U_{kal}}{2}\right)^2}$$

képlettel.
Ezt a számítást sem a metrológiai tapasztalat, sem a nemzetközi irodalom, sem pedig az ismert eljárási gyakorlat nem támasztja alá. Egyedül az utóbbi években megjelent "EA Guideline"-ok példáiban van utalás ilyen túlbiztosított számítási módra. Mindezt tudtuk, mégis azt éreztük megnyugtatónak, ha saját magunk is elvégzünk olyan normalitás-próbát, amely világosan mutatja a "dolgok viselkedését". Márpedig "a tény szent, a vélemény szabad"!
A bemutatott mérési sorozat (is) azt mutatja, hogy amikor mindenütt mechanikusan követjük a GUM egyes "apriori" feltételezéseit vagy az EA példáit, akkor legtöbbször **indokolatlanul nagynak** becsüljük az ismerethiányos állapotok halmazát.
A GUM és EA alapelvei szerint is megengedett, hogy a kalibráló laboratórium, elégséges adatok birtokában maga határozza meg a kalibráláskor figyelembe vett standard részbizonytalanságokat. [2],[5]
A bemutatott sorozatmérés, együtt a több évre visszamenő hitelesítési adatokkal, igazolja, hogy a vizsgált etalonok (a DMM is!) hibahatára – rendeltetésszerű, gondos használat közben – nem változik számottevően egyik napról a másikra, sőt egyik évről a másikra sem!
A tárgyalt etalonok is igen nagy valószínűséggel a Weibull-féle "kádgörbe" [6] szerint viselkednek, azaz élettartamuk legelején és legvégén nő meg saját mérési bizonytalanságuk (is). Ezeket a szélső szakaszokat kell folyamatosan figyelni, amire több gyakorlati módszer kínálkozik. Ezek egyike lehet a most bemutatott vagy ehhez hasonló mérési sorozat felvétele.

Reméljük, mások számára is hasznosak voltak a közreadott mérési eredmények és azok elemzése.

Irodalom

[1] MSZ EN ISO/IEC 17025:2000 Vizsgáló és kalibráló laboratóriumok felkészültségének általános követelményei

[2] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM): 1993

[3] Monostory I.: Valószínűségelmélet és matematikai statisztika, Műegyetemi Kiadó, Bp., 2001.

[4] Rényi A.: Valószínűségszámítás, Tankönyvkiadó, Bp., 1989.

[5] EA -4/02: Expression of the Uncertainty of Measurements in Calibration, 1999.

[6] E.Schaefer: Megbízhatóság az elektronikában, Műszaki Könyvkiadó, Bp., 1983.

[7] Lukács O.: Matematikai statisztika, Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1999.