

Ha igényesebb fizikai méréshez kezdünk, először a méréssel kapcsolatos elméleti kérdéseket kell tisztáznunk. Ezután, ha nem jelölik meg külön a mérőeszközt, akkor a rendelkezésünkre álló eszköz–anyag és pontossági igényeink együttes figyelembevételével választjuk ki a megfelelő összeállítást. Jó, ha előre átgondoljuk, hányféle fizikai mennyiséget kell mérni. Először táblázatokat készítünk, hogy ne kelljen munka közben az időt evvel töltenünk, illetve nehogy egy olyan mennyiség mérése kimaradjon, melyet már pótlólag nem tudunk lemérni.

Célszerű próbaméréseket végeznünk. Előnye, hogy alaposabban megismerkedünk műszereinkkel, gyakorlatra teszünk szert azok biztos kezelésében, illetve olyan ötleteink születhetnek, amelyek az eredeti leíráshoz képest egyszerűbbek, és pontosabb vagy gyorsabb mérést tesznek lehetővé.

Szisztematikus hibák

A pontosság fokozása nagy körütekintést igényel. Megvizsgáljuk, mik azok a zavaró tényezők, amelyek minden megismételt mérésnél ugyanolyan mértékben lépnek fel. Az ezekből eredő pontatlanságot szisztematikus hibának nevezzük. Megemlítek néhány ilyen hibaforrást, mely gyakran elkerüli a kevés gyakorlattal rendelkezők figyelmét.

Nagyon fontos az eszközök, skálák pontos, megbízható rögzítése. Sok esetben ugyanis a leolvasott érték egy része nem a tényleges fizikai mennyiség változásából, hanem az eszköz elmozdulásából adódik. Nagy gondot kell fordítani a berendezések és a felhasznált anyagok tisztaságára is. Folyadékoknál törésmutató, viszkozitás vagy felületi feszültség mérések a műszereket először króm–kénsavval zsírtalanítjuk. Ha más anyag vizsgálatára térünk át, minden esetben előbb desztillált vízzel átmoszuk, kiszárítjuk, majd a vizsgálandó folyadékkal is átöblítjük az eszközöket. Gyorsan párolgó folyadékoknál gondoskodni kell a párolgás megakadályozásáról.

Elektromos kísérleteknél az elágazásoknál fellépő átmeneti ellenállások nagymértékben ronthatják a pontosságot. Ahol csak lehet, forrasztással oldjuk meg a csatlakozást, vagy alaposan megtisztított, jól záró érintkezőket használunk. Ügyelni kell arra is, hogy a különböző ellenállások értékét a hőmérséklet is befolyásolja. Más területeken is lényeges lehet, hogy a kísérleteket egy adott, állandó hőmérsékleten végezzük. Ilyenkor célszerű az egész rendszert termosztátba helyezni. Sok hőtani kísérletnél egyszerűen a mérés gyors elvégzésével elérhetjük, hogy a rendszer nem tud hőcserélő kapcsolatba lépni környezetével.

Gondosan kell megválogatnunk a használt etalonokat, hisz ezekhez viszonyítunk, és a skálák, súlysorozatok pontatlansága javíthatatlanul rontja az eredményt. Ezért, ha módunkban van, csak hitelesített eszközöket használunk, illetve hitelesítsük mérőműszereinket.

Egy-egy törvény alkalmazásakor gondolni kell arra is, hogy a lejátszódó jelenségek eleget tesznek-e a törvény által előírt feltételeknek. STOKES törvényét például egy homogén közegben egyenes sebességgel haladó golyóra csak akkor használhatjuk, ha ez a sebesség viszonylag nem nagy, de gázok esetében még arra is ügyelni kell, hogy a golyó sugara ne legyen túlságosan kicsiny.

EÖTVÖS Loránd saját szerkesztésű torziós ingájával 1908-ban végzett világhírű kísérletét említem meg annak alátámasztására, hogy nagy pontosság eléréséhez a hibaforrások gondos elemzése és elhárítása szükséges. Mint ismeretes, Eötvös Lorándnak $5 \cdot 10^{-7}$ százalék pontossággal sikerült igazolnia a tömegvonzás és a tehetetlenség arányosságát. Felsorolok néhány technikai körülményt, amely elősegítette a ma is megcsodált pontosság elérését. (R. H. DICKE princetoni egyetemi tanár ezt írta 1961-ben az Eötvös-kísérlet megismétlése után: „Meglepő módon a modern technika teljes igénybevételével Eötvös eredményeinek pontosságát csak egy 50-es faktorral sikerült megjavítanunk.”) Eötvös gondoskodott arról, hogy a torziós inga különböző részeinek eltérő hőmérséklete miatt a műszer belsejében ne léphessen fel zavaró légáramlás. A torziós mérleget tartalmazó kamrát hármas fémburokkal vette körül, az egész műszert kettős falú hőszigetelő sátorban helyezte el és a méréseket besötétített, télen is fűtetlen helyiségben éjjel végezte. Az épület rázkódásaiból eredő hibát azáltal csökkentette, hogy készülékét az épülettől függetlenül alapozott betontömbre helyezte. Fontos volt a zavaró mágneses hatások leküzdése is: a mágneses szennyeződések igen gondos eltávolításán túl a Föld mágneses terét állandó- és elektromágnesekkel kompenzálta.

Észlelési hibák

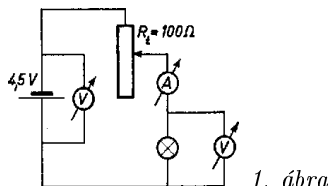
Az állandóan megismétlődő, szisztematikus hibák mellett minden mérésnél véletlen hibák is előfordulnak, melyek főleg a leolvasás pontatlanságából, a mérő reflexidejéből adódnak. Ezeket észlelési hibáknak nevezzük. Ezt a hibát úgy csökkenthetjük, hogy megnöveljük a mérendő mennyiségeket (pl. inga lengésidő mérésénél 30–50 lengés együttes idejét mérjük), azonkívül pedig azonos körülmények között több mérést végzünk (párhuzamos mérések).

Az első néhány mérés alapján megállapítjuk, hogy az egyes mennyiségeket milyen pontossággal tudjuk mérni. Ez két okból fontos: egyrészt felesleges a későbbi számolásnál az adott pontosságon kívül eső számjegyeket figyelembe venni. Másrészt nem érdemes egyes mennyiségeket túl precízen mérni, még ha van is rá lehetőség, ha más mennyiségek mérését csak ennél pontatlanabban tudjuk elvégezni. Ugyanis az a részadat határozza meg az egész mérés pontosságát, amelynél a relatív hiba a legnagyobb.

Nem érdemes halmozni a párhuzamos méréseket, hisz velük már lényegesen nem javíthatjuk a pontosságot, sőt jó arra is gondolni, hogy az ismételt mérések során elfáradunk és figyelmünk elgyengül. Az ismert módon (szabadon eső méterrúd elkapásával) reflexidőt mérettem több tanulóval 20–30 egymás utáni ejtéssel. Az első öt-hat mérés során a reflexidő csökkenését tapasztaltuk, azonban a későbbi méréseknél szeszélyesen váltakoztak a jó és egészen rossz eredmények, a mérő pillanatnyi figyelmének megfelelően.

A mérési eredmények kiértékelése

A paralel mérések eredményeinek kiértékelését a feszültségosztók vizsgálatáról szóló pályázatunkra beküldött egyik dolgozat adatai alapján mutatom meg. A szerzők pályázatuk első részében az alábbi kapcsolási rajzon feltüntetett összeállításban mérték a fogyasztó által felvett áramerősséget, illetve feszültséget (1. ábra). A tollóellenállást cm-skála segítségével állították be a különböző értékekre. Közelítőleg 5,2 ohmként iktatták ki az áramkörből az előtétellenállást. (A helyes beállítást ohmmérővel is ellenőrizték.)



1. ábra

A három paralel mérés eredményeinek egy részét a következő táblázat tartalmazza:

A kiiktatott R ohmban	Áramerősség (mA)				Feszültség (V)			
	1.	2.	3.	I	1.	2.	3.	U
79,2	75	76,8	72,4	74,7	2,78	2,54	2,70	2,67
84,4	79	81,2	77,5	79,2	3,06	2,80	2,92	2,90
89,6	84	86	83	84,3	3,38	3,14	3,25	3,26
94,8	88,7	90	86,8	88,5	3,76	3,48	3,6	3,6
100,0	93,2	94	91	92,7	4,08	3,81	3,8	3,9

A három mérési eredmény számtani közepe adja a legvalószínűbb eredményt (a táblázatban I , U). Ennek meghatározása után képezni kell az egyes eredmények átlagtól való eltérését. (A 100 ohmos állásnál ezek: $I_1 = 0,5$ mA; $I_2 = 1,3$ mA; $I_3 = -1,7$ mA.) Ezekből Gauss szerint a mérésnél elkövetett abszolút hiba a következő képlet alapján számolható:

$$\overline{\Delta I} = \pm \sqrt{\frac{(\Delta I_1)^2 + (\Delta I_2)^2 + (\Delta I_3)^2 + \dots + (\Delta I_n)^2}{n(n-1)}}$$

Esetünkben $n = 3$, így

$$\overline{\Delta I} = \pm \sqrt{\frac{0,5^2 + 1,3^2 + (-1,7)^2}{6}} \text{ mA} \approx \pm 0,9 \text{ mA} \approx \pm 1 \text{ mA}.$$

A mért feszültségeknél ugyancsak a 100 ohmos állásnál:

$$\overline{\Delta V} = \pm \sqrt{\frac{0,18^2 + (-0,09)^2 + (-0,1)^2}{6}} \text{ V} \approx \pm 0,09 \text{ V} \approx \pm 0,1 \text{ V}.$$

Felesleges volt tehát tized mA-t és század V-ot mérni.

Gyorsabban jutunk eredményhez, ha egyszerűen az eltérések abszolút értékeinek számtani közepét tekintjük abszolút hibának:

$$\overline{\Delta I} = \pm \frac{0,5 + 1,3 + 1,7}{3} \text{ mA} \approx \pm 1,1 \text{ mA};$$

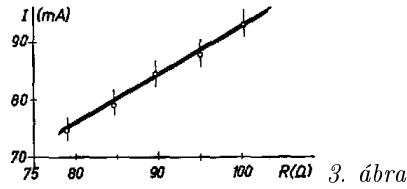
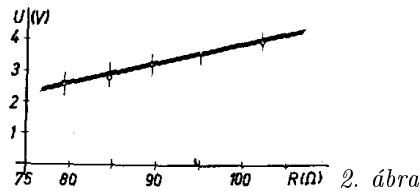
$$\overline{\Delta V} = \pm \frac{0,18 + 0,09 + 0,1}{3} \text{ V} \approx \pm 0,12 \text{ V} \approx 0,1 \text{ V}.$$

Az abszolút hiba ismerete lehetővé teszi, hogy megállapítsuk, hogy mennyire pontos a középérték, de nem ad igazi felvilágosítást a mérés pontosságáról. Erről akkor kapunk reális képet, ha viszonyítjuk az abszolút hibát a középértékhez, így jutunk a relatív hibához:

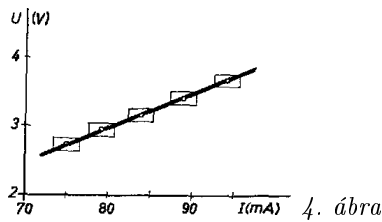
$$\delta_{\text{rel}} = \frac{\overline{\Delta I}}{I} \cdot 100\%.$$

Az árammérésnél elkövetett hiba tehát: $\delta_I = \frac{100}{93}\% \approx 1\%$,

a feszültségmérésnél: $\delta_U = \frac{10}{4}\% \approx 2\%$. (A középértékeket az abszolút hiba ismeretében kerekítettem. A számításoknál logarlécet használtam. Sok, egymástól csak kis mértékben különböző adat esetén ez nagyon gyors munkát eredményez és a legtöbb esetben a pontosság meg is engedi a logarléc használatát.) A feszültségmérés tehát pontatlanabban történt. Ez érthető is, hisz ha a fogyasztó ellenállása nem kisebb több nagyságrenddel a műszer belső ellenállásánál, akkor a műszer hibás értéket mutat. A hiba leküzdése: igen nagy belső ellenállású, ún. csővoltmérő alkalmazása, vagy a belső ellenállás ismeretében számításos korrekció.



A nyert mérési eredményeket grafikonok készítésével tehetjük szemléletessé. Itt ügyelnünk kell arra, hogy ne az egyes pontokat kössük össze, hisz azok pontatlan átlagértékeket jelentenek. Ha az egyik változó érték beállításánál nem tételezünk fel hibát, akkor szokás az egyes értékeket akkora szakaszokkal ábrázolni, mint amekkora az abszolút hiba, és a grafikon vonalának a szakaszokat metszenie kell. Az előtétellenállás beállítást pontosnak feltételezve, a feszültség-előtétellenállás grafikon a 2. ábra mutatja. Az előtétellenállás függvényében az áramerősséget a 3. ábráról olvashatjuk le. Ha mindkét változót pontatlanul mértük, akkor a hiba abszolút értékének megfelelő oldal hosszúságú téglalapokat rajzolunk a középértékeket jelentő pontok köré és ezek után úgy kell a görbét megrajzolni, hogy az áthaladjon ezeken a téglalapokon (4. ábra).



Alapos, gondos előkészítő munka után elvégzett, néhányszor megismételt, majd a fentiekben leírt értékelésekkel kiegészített mérések során érhetünk csak el nagyobb pontosságot.

Kovács László