

Egységek és etalonok sorozat

Az áramerősség egysége és etalonja. Változik-e a jövőben az amper meghatározása?

Egységek és etalonok sorozatcím alatt a [hosszúság](#), a [tömeg](#) és az [idő](#) egységét és etalonját a Műszeroldal Hírlevél korábbi számaiban ismertettük. A cikkek bemutatták a három mennyiség egységének és etalonjának létrehozását, továbbfejlesztését, és az etalonok megvalósításához jelenleg használt technikai eszközöket. Most folytatjuk ezt a sorozatot a Nemzetközi Mértékegység-rendszer negyedik alapegysége és annak etalonja ismertetésével.

Történeti áttekintés

Az áramerősség egységének és etalonjának ismertetését a Méterrendszer előtörténetébe ágyazva kezdjük. Tekintettel az elektromos mennyiségek között fennálló fizikai egyenletek gazdag választékára, az ampert célszerű a feszültség, az ellenállás és egyéb elektromos mennyiségek egységeivel való kapcsolatának ismertetésével együtt tárgyalni.

A Nemzetközi Mértékegység-rendszer kialakításához vezető első lépések egyike volt a méter és a kilogramm egységek etalonjainak megvalósítása. 1832-ben Gauss erősen szorgalmazta, hogy a métert és a kilogrammot, valamint a csillagászatban definiált másodpercet együtt, a fizikai tudományok koherens egységrendszereként, alkalmazzák. Később Gauss és Weber továbbfejlesztették az egységrendszert úgy, hogy az más elektromos mennyiségekre is alkalmazható legyen.

1874-ben alakították ki a *CGS-rendszert*. A CGS-rendszer három mechanikai egységen, a centiméteren, a grammon és a másodpercen alapuló, koherens egységrendszer, amely az egységek tízes többszöröseit és törtrészeit kifejezésére a mikro-tól a megá-ig terjedő prefixumokat alkalmazza. A rendszer bevezetése és alkalmazása nagymértékben elősegítette a fizika fejlődését.

1880-ban a British Association for the Advancement of Science (BAAS) és az International Electrical Congress (a későbbi Nemzetközi Elektrotechnikai Bizottság, az IEC elődje) a *gyakorlati egységek* koherens rendszerét fogadta el. A gyakorlati egységek közé tartozott: az elektromos ellenállás egysége, az *ohm*, és az elektromotoros erő egysége, a *volt*.

1901-ben Giorgi kimutatta, hogy a méter-kilogramm-másodperc rendszer mechanikai egységeit össze lehet kapcsolni a gyakorlati elektromos egységekkel. Koherens négydimenziós rendszer jön létre, ha a három alapegységhez negyedikként egy elektromos egységet adnak hozzá, például az ampert. Giorgi javaslata új utat nyitott a mértékegység-rendszer továbbfejlesztése előtt.

A 7. Általános Súly-és Mértékügyi Értekezlet (CGPM) 1925-ben létrehozta az Elektromos Mérések Tanácsadó Bizottságát (francia elnevezésének rövidítésével: a CCE-t). A CCE 1939-ben az IEC és más nemzetközi szervezetek bevonásával javaslatot tett a méteren, a kilogrammon, a másodpercen és az amperen alapuló MKSA rendszer elfogadására. A javaslatot a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Bizottság (CIPM) 1946-ban hagyta jóvá. A

következő mérföldkő a fejlődés útján, 1960-ban, a Nemzetközi Mértékegység-rendszer (az SI) létrehozása volt.

Az amper meghatározása a Nemzetközi Mértékegység-rendszerben

Az SI-ben az áramerősség egysége az amper. Meghatározása idealizált viszonyokat tételez fel:

„Az amper olyan állandó villamos áram erőssége, amely két egyenes, párhuzamos, végtelen hosszúságú, elhanyagolhatóan kicsiny kör-keresztmetszetű és egymástól 1 méter távolságban, vákuumban elhelyezkedő vezetőkben fenntartva, e két vezető között méterenként 2×10^{-7} newton erőt hozna létre.”

Az áramerősség egysége tárgyában a hivatalos döntés a 9. CGPM-en született meg, 1948-ban. A döntés, hogy az amper legyen az SI elektromos alapegysége, bizonyos mértékig önkényes volt. Választható lett volna a volt vagy az ohm is. A választás lehetséges oka az volt, hogy a döntés meghozatalakor úgy tűnt; az amper kisebb bizonytalansággal valósítható meg, mint a volt vagy az ohm.

Míg a másodperc (s), a méter (m) és a kilogramm (kg) mechanikai egységek egymástól függetlenül vannak definiálva, addig az amper, definíciója szerint, kapcsolódik a mechanikai mennyiségekhez. Az F elektrodinamikus erő „ I ” vezeték hosszúságon, két vákuumban elhelyezkedő, egymástól r távolságra levő, párhuzamos és egyenes vezető között, amelyeken I áram folyik keresztül

$$F/l = \mu_0 (I^2/2\pi r),$$

ahol μ_0 a vákuum mágneses permeabilitása.

Ha az amper definíciójában szereplő mennyiségek értékét behelyettesítjük ebbe az egyenletbe, és figyelembe vesszük, hogy az SI-ben a mechanikai és az elektromos teljesítmény egységeinek egyenlősége miatt $1 \text{ Nm/s} = 1 \text{ VA}$, akkor azt kapjuk, hogy $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$. Az amper definíciója alapján tehát meg lehet határozni a vákuum mágneses permeabilitásának a számértékét.

Az amper közvetlen megvalósítása

Az amper meghatározásának szövegében olvasható „végtelen hosszúságú”, „elhanyagolhatóan kicsi kör-keresztmetszetű” kitételekből következik, hogy az amper definíció-szerű megvalósítása nem lehetséges. Lehetséges azonban a megvalósítás egy olyan készülékkel, amelynél mechanikai adatokból meg lehet határozni az összefüggést az elektrodinamikus erő és az áramerősség között. A készüléket, amelyben az elektrodinamikai erőt súlyerővel egyenlítik ki, *árammérlegnek* hívják. A nagy pontosságú mérést megnehezíti, hogy a tekercstestek és a tekercs súlya körülbelül tízszer akkora, mint a készülékkel elérhető, mintegy $0,1 \text{ N}$ nagyságú elektrodinamikus erő. Az elérhető legkisebb relatív bizonytalanság 6×10^{-6} . A kereskedelemben kapható digitális voltmérők felbontása ennél egy-két nagyságrenddel jobb. Az a kedvezőtlen helyzet állt elő, hogy az iparnak az elektromos mennyiségek reprodukálására és fenntartására vonatkozó pontossági igényei nagyobbak voltak, mint az elektromos alapegység megvalósításának elérhető pontossága.

A hagyományos árammérlegekkel több okból sem lehetett milliomodrésnyi pontosságot elérni. A rögzített és a felfüggesztett tekercs között fellépő erő túl kicsi volt. A tekercsek melegedése folytán konvektív erők léptek fel, és ez a két hatás, önmagában véve, néhány milliomodrészt elérő véletlen bizonytalanság összetevőt okozott, ami eleve megakadályozta a rendszeres összetevő meghatározását. Az árammérleg tekercseinek pozicionálásához több száz mechanikai mérést kellett elvégezni a mikrométer alatti tartományban. Ilyen és más hasonló okokra vezethető vissza, hogy árammérlegeket ma már nem használnak a nemzeti metrológiai laboratóriumokban.

Az amper közvetett megvalósítása a volt és az ohm útján

A volt megvalósítása

Az áram keltette elektrodinamikus erőnek és a súlyerőnek az „árammérleg” alkalmazásával történő összehasonlításához hasonlóan, feszültség alatt álló kondenzátor-elektrodok közötti elektrosztatikus erőt is lehet a súlyerővel összehasonlítani, az úgynevezett „feszültségmérleg” segítségével. A feszültségmérleggel körülbelül 1 N nagyságú erőket lehet előállítani, ehhez azonban (10÷20) kV feszültségre van szükség. Ezt a feszültséget speciális osztókkal 1 V-ra kell leosztani. Az elérhető mérési bizonytalanság 1×10^{-6} -nál kisebb.

Az ohm megvalósítása.

Az elektromos ellenállás egysége, az ohm, lényegesen pontosabban valósítható meg, mint az amper. Ezt egy elektrosztatikai tétel felfedezése tette lehetővé 1956-ban, amely Thompson és Lampard nevéhez fűződik. E tétel alapján olyan kondenzátorokat lehetett építeni, amelyeknek a kapacitása egyetlen hosszúságméréssel meghatározható.

Mivel f frekvenciájú váltakozó áram esetében a C kapacitás $C/2\pi f = C/\omega$ reaktanciát hoz létre, ami váltakozó áramú ellenállásmérő hídban összehasonlítható egy ohmos ellenállással, megnyílt az út az ellenállás egységének a leszámaztatásához. Ezzel a módszerrel az ellenállás egységét, az ohmot 10^{-7} nagyságrendű bizonytalansággal lehetett megvalósítani.

Az amper összekapcsolása az e és a h fizikai állandókkal

A korszerű metrológia arra törekszik, hogy az egységek az időtől és a helytől függetlenül megvalósíthatók legyenek. Mai ismereteink szerint a fizikai állandókról állítható, hogy változatlanok, és atomról-atomra azonos jellegűek. A cél olyan etalonok készítése, amelyek értéke fizikai állandókon alapul. Az elektromos mennyiségek tekintetében szóba jövő fizikai állandók: az e elemi töltés, vagy más néven az elektron töltése (értéke: $1,602\ 176\ 53 \times 10^{-19}$ coulomb), és a h Planck-állandó (értéke: $6,626\ 069\ 3 \times 10^{-34}$ joule·másodperc).

A feszültség egységének összekapcsolása az e elemi töltéssel és a h hatáskvantummal. A Josephson-effektus.

1962-ben, az akkor 22 éves angol egyetemi hallgató, Josephson, „megjósolta” egy, a gyengén csatolt szupravezetők között fellépő jelenség létezését. Gyengén csatolt például a csúcs-lap elrendezés, vagy két szupravezetőnek egy nagyon vékony szigetelőrétegen keresztül való kapcsolódása. Ha egy ilyen szendvicsszerű elrendezésen I egyenáramot bocsátanak keresztül és utána f frekvenciájú mikrohullámmal besugározzák, akkor az egyenfeszültség-egyenáram karakterisztikában feszültséglépcsők keletkeznek, amelyek „távolsága” pontosan

$$U = f(h/2e).$$

A (10÷70) GHz tartományban levő frekvenciák esetén, az úgynevezett nanotechnológia alkalmazásával, a néhány mV-os *Josephson-átmenetek* sorba kapcsolásával ma már magasabb feszültségeket (1 V; 10 V) is elő lehet állítani.

Az ellenállás egységének összekapcsolása az e elemi töltéssel és a h hatáskvantummal. A kvantumos Hall-effektus.

1980-ban von Klitzing új módszert dolgozott ki az ellenállásértékek megvalósítására. Kétdimenziós, azaz igen vékony vezetőrétegen, nagyon alacsony hőmérsékleten (a folyékony hélium 4,2 K hőmérsékletén) *I* egyenáramot bocsátanak keresztül, és egyidejűleg, a vezetőrétegre merőlegesen, nagyon erős mágneses teret hoznak létre. A kialakuló mágneses indukció 10 tesla felett van, ami a Föld mágneses tere több mint félmilliószorosának felel meg. Ekkor az indukció értékétől függően, a „keresztoldalakon” az áramirányra merőlegesen fellépő U_H Hall-feszültségre állandó feszültségű platókat kapnak, amelyekre pontosan érvényes a következő összefüggés:

$$U_H = (h/i \cdot e^2) \times I, \text{ ahol } i = 1, 2, 3, 4, \dots$$

A $h/i \cdot e^2$ egy ellenállás értéknek felel meg ($i = 4$ esetében ez az ellenállás kerekén 6 kiloohm), amit egy másik ellenállás etalonnal viszonylag könnyen össze lehet hasonlítani. Ilyen módon az ellenállás egysége 10^{-7} nagyságrendű, vagy akár még kisebb bizonytalansággal reprodukálható.

Az amper egység a watt, a volt és az ohm egységek közül bármelyik kettőnek a segítségével megvalósítható. Az így kapott amper értékének becsült relatív bizonytalansága néhányszor 10^{-7} . Az amper, az ohm és a volt a fizikai állandók méréseinek különféle kombinációiból is meghatározhatók. A volt és az ohm laboratóriumi referenciaetalonjai a Josephson-effektuson és a kvantumos Hall-effektuson alapulnak, és ezeknek jóval nagyobb a stabilitása és a reprodukálhatósága, mint néhányszor 10^{-7} . Annak érdekében, hogy az elektromos mennyiségek laboratóriumi referenciaetalonjai fenntartásának előnyei hasznosíthatók legyenek, a 18. CGPM 1987-ben elfogadta a 6. Határozatot, amely szerint a volt és az ohm reprezentációinak a K_J Josephson-állandó egyezményes értékén és az R_K von Klitzing állandó egyezményes értékén kell alapulniuk.

A CGPM a határozat indoklásában egyebek között kifejtette, hogy az elektromos egységek nemzeti reprezentációinak világméretű egységessége és hosszú idejű stabilitása a tudomány, a kereskedelem és az ipar számára mind műszaki, mind gazdasági szempontból rendkívül fontos. Számos nemzeti metrológiai laboratórium használja a Josephson-effektust, és kezdi használni a kvantumos Hall-effektust a volt és az ohm reprezentációinak a fenntartásához, mivel ezek hosszú idejű stabilitást biztosítanak. A folyamatban levő kísérletek eredményei lehetővé teszik egy olyan elfogadható érték megállapítását, amely kellőképpen összhangban van az SI-vel.

A CGPM felhívta azokat a laboratóriumokat, amelyek munkája hozzájárulhat a Josephson-effektus tekintetében a feszültség/frekvencia hányados megállapításához, és a kvantumos Hall-effektus tekintetében a feszültség/áramerősség hányados megállapításához, hogy

folytassák ez irányú erőfeszítéseiket, és késedelem nélkül közölik eredményeiket a CIPM-mel. Felkérte a CIPM-et, hogy tegyen javaslatot az állandók értékére.

1988-ben a CIPM elfogadta az 1. Ajánlást (CI-1988) és a 2. Ajánlást (CI-1988), amelyekben egzakt értéket állapított meg a $K_{J-90} = \frac{2e}{h}$ Josephson-állandóra és az $R_{K-90} = \frac{h}{e^2}$ von Klitzing-állandóra, és felhívta a laboratóriumokat, hogy etalonjaik értékét 1990. január 1-jétől ezekre alapozzák.

A legújabb meghatározások eredményeinek részletes tanulmányozása alapján a K_J Josephson-állandó értéke 483 597,9 GHz/V, vagyis a Josephson-effektusban ez az érték a frekvencia és az $n = 1$ lépcsőnek megfelelő potenciálkülönbség hányadosa. A Josephson-effektus a K_J -nek ezzel az értékével együtt felhasználható arra, hogy az elektromotoros erő referenciaetalonja legyen, amely a nemzetközileg elfogadott volttal az egyszeres szórásnak megfelelő 4×10^{-7} bizonytalansággal egyenlő, és a reprodukálhatósága lényegesen jobb.

A CIPM 1988-ban ajánlást fogadott el az ohm kvantumos Hall-effektussal történő reprezentálásáról. Az ajánlás indoklásában kifejtette, hogy a meglévő laboratóriumi ellenállás referenciaetalonok időben jelentősen megváltoznak, és ugyanakkor az ellenállás kvantumos Hall-effektusra alapozott referenciaetalonja stabil és jól reprodukálható lehet. A legfrissebb meghatározások eredményeinek részletes tanulmányozása alapján az R_K von Klitzing-állandó értéke 25 812,807 Ω . Ez a Hall-potenciálkülönbség értéke, osztva az $i = 1$ lépcsőnek megfelelő áramerősséggel a kvantumos Hall-effektusban. A kvantumos Hall-effektus ezzel az R_K értékkel együtt felhasználható arra, hogy az elektromos ellenállás referenciaetalonja legyen.

A CIPM javasolta, hogy az R_K von Klitzing-állandó egyezményes értékül a pontosan 25 812,807 Ω értéket fogadják el, jelöljék R_{K-90} -nel, és ezt az új értéket használják minden olyan laboratóriumban, amelyek ellenállásméréseiket a kvantumos Hall-effektusra alapozzák.

1988. évi ülésén a CCE gondosan átvizsgálta azokat a módokat, ahogyan a K_{J-90} és az R_{K-90} ajánlott egyezményes értékek használhatók, és kiegészítő megállapításokat tett annak érdekében, hogy javítsa az ajánlások alkalmazását. Ezek szerint az 1 (CI-1988) és 2 (CI-1988) ajánlások nem jelentik az SI egységek újra-meghatározását. A K_{J-90} és az R_{K-90} egyezményes értékek nem használhatók a volt és az ohm meghatározására (az elektromotoros erő és az elektromos ellenállás jelenlegi SI egységeinek értelmezése érvényben marad.) A mennyiségek és egységek jelölésében alkalmazott indexet illetően a CCE úgy véli, hogy az elektromotoros erő (elektromos potenciál, elektromos potenciálkülönbség) és az elektromos ellenállás jelölése, valamint a volt és az ohm jelölése index hozzáadásával nem módosítható. Korábban ilyen indexeket az etalonfenntartó laboratórium vagy az időpont jelölése céljából alkalmaztak. Ezt a megállapítást a CIPM elfogadta. A 19. CGPM (1991, 2. Határozat) javasolta a Josephson-effektus és a kvantumos Hall-effektus elméleti alapjai kutatásának a folytatását.

Az amper egységének fenntartása a volt és az ohm csoportos etalonjai segítségével

Mint láttuk, az árammérlegek és a feszültségmérlegek ideje lejárt. Az amper fizikai állandókra való visszavezetése a Josephson-effektust illetve a kvantumos Hall-effektust megvalósító berendezésekre jelentős költségekkel jár, amelyeket egy átlagos műszaki infrastruktúrával

rendelkező nemzeti metrológiai laboratórium többnyire nem engedhet meg magának. Ezekben a nemzeti laboratóriumokban a volt és az ohm egységét úgynevezett *csoportos etalonokkal* tartják fenn.

Mindkét elektromos mennyiség csoportos etalonja azonos elv alapján működik, ezért csak a közös elvet említjük meg. A voltot normálemekből, az ohmot pedig azonos névleges értékű normállenállásokból álló csoporttal tartják fenn. A normálemek jellemző elektromotoros ereje 1,018... V, a csoportba foglalt normállenállások névleges értéke 1 ohm. A csoportos etalonba foglalt egyedek száma általában $5 \div 20$. A csoporttagok értéküket hosszú ideig (évekig) változatlanul megtartó egyedi mértékek, évi megváltozásuk tipikusan $(1 \div 10) \times 10^{-7}$. Az egyedek értékének ingadozása adott időtartományon belül véletlenszerűnek tekinthető. Az ingadozások véletlen jellege folytán a csoport átlagértéke két egymást követő nemzetközi összehasonlítás között gyakorlatilag állandó. Az átlagérték állandóságát az egyedek közötti kölcsönös összehasonlító mérésekkel lehet ellenőrizni. A kölcsönös összehasonlítások lehetővé teszik azt is, hogy az átlagérték állandóságára alapozva, bármelyik csoporttag értéke bármikor meghatározható legyen.

A nemzetközi összehasonlításra a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatalban (a BIPM-ben), vagy más nemzeti metrológiai laboratóriumban kerülhet sor, és az összehasonlítás eredménye alapján a csoportos etalon átlagát szükség esetén korrigálják. A nemzetközi összehasonlításban nem a csoporttagok, hanem erre a célra kijelölt, úgynevezett *utazó etalonok* vesznek részt. A volt utazó etalonja hordozható kivitelű, termosztált környezetben elhelyezett normálemekből áll.

A két csoportos etalon segítségével az áramerősség egységét, az amper, az Ohm-törvényt felhasználó mérés technikai eszközökkel lehet fenntartani.

Változik-e a jövőben az amper meghatározása?

A [2] irodalomban kifejtett gondolatok szerint a válasz: igen. Egy meglehetősen kézenfekvő, úgynevezett „explicit egység meghatározás”, amely az amper az e elemi töltés pontos értékéhez kapcsolja, a következő lehet:

Az amper az elektromos áramerősség a pontosan $1/(1,602\ 176\ 53 \times 10^{-19})$ elemi töltés per másodperc nagyságú áram irányában.

Az e értékének meghatározása a következő összefüggéssel adódik: $It = Ne$, ahol I az áramerősség, t az időtartam és N az elemi töltések száma. Ha $I = 1$ A, $t = 1$ s és $N = 1/(1,602\ 176\ 53 \times 10^{-19})$ ahogyan az a meghatározásban olvasható, akkor ebből az egyszerű összefüggésből adódik, hogy $e = (1/N)A \cdot s = 1,602\ 176\ 53 \times 10^{-19}$ coulomb, mivel a coulomb az A·s (amper-másodperc) külön elnevezése. Ez a meghatározás előírja, hogy az áram iránya a pozitív töltések áramlásának az iránya, mivel az elemi töltés, mint pozitív mennyiség (azaz az elektron töltésének vagy a proton töltésének az abszolút értéke) van meghatározva.

Az elemi töltés állandóságára és elfogadott értékére alapozott másik lehetséges, úgynevezett „explicit állandó meghatározás” szerint:

Az amper az elektromos áramerősség egysége, amellyel az elemi töltés pontosan $1,602\ 176\ 53 \times 10^{-19}$ coulomb.

Az egység meghatározása ebben a felfogásban úgy történik, hogy a fizikai állandónak nemzetközileg elfogadott, pontos értéket tulajdonítanak. Az explicit-állandó meghatározás, minden alapegységre alkalmazható a következő általános formában: „A [az alapegység neve] a [az alaplennység neve] egysége, olyan, hogy a [a fizikai állandó neve] pontosan [a fizikai állandó értéke]”

Ha például a méter jelenlegi meghatározását, amely ezt az egységet a $c_0 = 299\,792\,458$ méter per másodperc vákuumbeli fénysebesség pontos értékével kapcsolja össze, ennek az általános formának megfelelően íránk át, így hangzana: „A méter, a hosszúság egysége, olyan, hogy a vákuumbeli fénysebesség pontosan 299 792 458 méter per másodperc.”

Az amper újra-meghatározásának hatása. A kvantummetrológiai háromszög

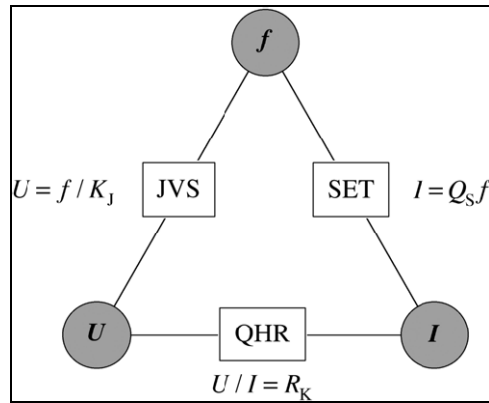
Az ampernek az e elemi töltés pontos értékéhez való kapcsolásával a K_J és az R_K pontosan ismertté válik, továbbá a Josephson-effektus és a kvantumos Hall-effektus felhasználható a legtöbb elektromos egység SI-beli meghatározásának közvetlen megvalósítására. Így az egyezményes elektromos egységek jelenlegi gyakorlati rendszere, amely ezen a két effektuson és a K_{J-90} és az R_{K-90} egyezményes értékén alapul, magukkal az SI egységekkel helyettesíthető, ami kétségkívül az újra-meghatározás legnagyobb előnye.

A [2] irodalomban megfogalmazott javaslat a kilogramm, az amper és más SI-alapegységek újrameghatározására olyan módon, hogy több fizikai állandónak pontos értéket tulajdonítanak, előrevetíti egy olyan jövőbeli rendszer képét, amit megalapozottan lehet „Kvantum SI-nek” nevezni. Az elektromos egységek szempontjából a javaslat lényege az, hogy pontos értéket javasol a h Planck-állandó és az e elemi töltés számára, ami azt jelenti, hogy mind a $K_J = 2e/h$ Josephson-állandót, mind az $R_K = h/e^2$ Klitzing-állandót pontosan meghatározott értékűnek tekinti. A javasolt „Kvantum SI” kulcsfonti eleme az a feltevés, hogy a K_J -re és az R_K -ra vonatkozó összefüggések pontosak. Ennek a feltevésnek az alátámasztására elméleti és gyakorlati érv is szolgál. Elméletileg jelenleg nincs semmiféle indokolt előfeltevés bármiféle korrekciós tag alkalmazására. Kísérletileg már számos kísérlet kimutatta, hogy K_J és R_K függetlenek a készülék kialakításától, az anyagtól és a mérési elrendezéstől, stb.

Az univerzálisságnak ez a bizonyítása összhangban van azzal, hogy az összefüggések pontosak, de nem tekinthető közvetlen bizonyítéknak. A fizikai állandókra vonatkozó kísérleti adatok a $K_J = 2e/h$ és az $R_K = h/e^2$ feltételezésektől függetlenül is tesztelhetők az eltérések kimutatása céljából. Mivel a K_J és az R_K az SI mindenfajta új változatában fontos szerepet játszik (tekintet nélkül a rendszer felépítésének részleteire), további vizsgálatokat kell végezni arra vonatkozóan, hogy ezek az állandók hogyan függnek össze h -val és e -vel.

Különösen értékesek azok a kísérleti vizsgálatok, amelyek nem az egyes effektusok univerzálisságára, hanem közvetlenül a megjósolt összefüggések korrekcióira irányulnak. Egy ilyen tesztet már 1985-ben javasoltak, de a Josephson-effektust és a kvantumos Hall-effektust az egy-elektron alagúteffektussal kombináló, javasolt kvantummetrológiai háromszög (QMT) részletes elemzésére csak mostanában került sor. A QMT az Ohm törvény alkalmazása erre a három kvantumeffektusra. Beható tesztelése négy nemzeti metrológiai intézetben: a NIST-ben (USA), a PTB-ben (Németország), az LNE-ben (Franciaország) és az NPL-ben (UK) folyamatban van. Az ábrán vázlatosan bemutatjuk a QMT 1985-ben javasolt, eredeti

változatát. Ez a változat az OHM-törvény felhasználásával összekapcsolja a Josephson-effektust (JVS), a kvantum Hall-effektust (QHR) és az egy-elektron alagúteffektust (SET).



Az ábra a feszültség, az ellenállás és az áram elektromos etalonjait tartalmazza, amelyeket az Ohm-törvény kapcsol össze, egy háromszöget kialakítva. A három kvantumetalont meghatározó kapcsolatok (összefüggések) a következők:

(i) A Josephson-feszültség etalon (JVS), amely f_j frekvencián, a plató n -edik lépcsőjén működik és

$$U_{JVS} = \frac{nf_j}{K_J} \text{ feszültséget hoz létre, ahol } K_J = \frac{2e}{h} (1 + \varepsilon_J). \quad (1)$$

(ii) A kvantum Hall-ellenállás (QHR) etalon, amely a plató i -edik lépcsőjén van kvantálva, és amelynek az ellenállása

$$R_{QHR} = R_K/i, \text{ ahol } R_K = \frac{h}{e^2} (1 + \varepsilon_K). \quad (2)$$

(iii) Az egy-elektron alagúteffektuson (SET) alapuló árametalon, amely f_s frekvencián működik, és

$$I_{SET} = Q_S f_s \text{ áramot hoz létre, ahol } Q_S = e(1 + \varepsilon_S). \quad (3)$$

Mindegyik kvantumetalon esetében a h -t és/vagy az e -t magába foglaló várt összefüggéstől való lehetséges eltérést az ε -ok fejezik ki. Kombinálva az (1), (2) és (3) egyenleteket, és felhasználva az $U = RI$ Ohm-törvényt, ha a valóságos QMT kísérletben A_1 fejezi ki az összes ismert skálatényezőt (például a hídágak arányait), akkor azt kapjuk, hogy

$$\frac{n_j f_j}{K_J} = A_1 \frac{R_K}{i} Q_S f_s, \quad (4)$$

$$\frac{n_j^i f_j}{A_1 f_s} = K_J R_K Q_S \quad (5)$$

$$\frac{1}{2} \frac{n_j^i f_j}{A_1 f_s} = 1 + \varepsilon_J + \varepsilon_K + \varepsilon_S. \quad (6)$$

A (6) kifejezés azon a tényen alapul, hogy az ε tagok mindegyike sokkal kisebb, mint 1. A gyakorlatban a (6) egyenlet bal oldalán álló tagok elhanyagolható bizonytalansággal ismertek, és megválaszthatók úgy, hogy a baloldal értéke 1-gyel legyen egyenlő. Így, ha egyik kvantumos elektromos etalonra vonatkozóan sincsenek korrekciók, akkor a QMT az $1=1$ összefüggésnek felel meg. A QMT kísérleti megvalósításának eredménye az

$$1 = 1 + \Delta_{\text{várható}} \pm u_{\text{várható}} \quad (7)$$

összefüggés, ahol $\Delta_{\text{várható}}$ az elvárt $1 = 1$ összefüggéstől való eltérés, és $u_{\text{várható}}$ az eredmény relatív standard bizonytalansága. Ha $\Delta_{\text{várható}}$ kisebb, mint $u_{\text{várható}}$, akkor a kísérlet „bezárja” a QMT-t, és azt bizonyítja, hogy nincs szükség a három kvantumetalon estében az $u_{\text{várható}}$ -nál nagyobb korrekcióra (figyelmetlenül kívül hagyva itt, hogy az ellentétes előjelű ε tagok törölhetők). Ha viszont a kísérlet azt mutatná, hogy a QMT-t nem lehet „bezárni”, vagyis ha $\Delta_{\text{várható}}$ nagyobb lenne, mint $u_{\text{várható}}$, ez azt jelezné, hogy a kvantumos elektromos etalonok egyikénél jelentős korrekciót kell alkalmazni, de nem mutatná meg, hogy a három közül melyiknél. Az [5] irodalomban említett, a National Institute of Standards and Technology-ban (NIST) végzett elemzés alapján megállapítható, hogy a QMT „leggyengébb” szára az, amelyik a SET-et tartalmazza.

Az SI alapegységek újra-meghatározása várhatóan további változtatásokhoz vezet az SI-ben. Az újra-meghatározás fontos eredményeket hoz mind a metrológia, mind a tudomány egésze számára, mert egy lépéssel közelebb visz ahhoz a rég óhajtott, távoli célhoz, hogy minden SI alapegységet egy-egy fizikai állandóra alapozzanak. Ám tekintettel arra, hogy a változtatások hatása széles tartományban kihathat, mielőtt a változtatásokat végrehajtanák, azokat alaposan meg kell vitatni a metrológiai és a tudományos közösségekben.

Köszönetnyilvánítás

*Köszönetemet fejezem ki **Jakab András** kollégámnak a kéziratához fűzött hasznos észrevételeiért és kiegészítő megjegyzéseiért.*

Irodalmak:

- [1] Mills I M, Mohr P J, Quinn T J, Taylor B N and Williams E R 2005 *Metrologia* **42** 71–80
- [2] Ian M Mills, Peter J Mohr, Terry J Quinn, Barry N Taylor és Edwin R Williams: *Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005)* *Metrologia* **43** (2006) 227–246.
- [3] BIPM 2006 *The International System of Units 7th edn and Supplement 2000: Addenda and Corrigenda to the 8th edition (2006)* (Sèvres, France: Bureau International des Poids et Mesures)
- [4] Quinn T J *Metrologia* **37** 87–98
- [5] Mark W Keller: Current status of the quantum metrology triangle. *Metrologia* **45** (2008).

Összeállította: Bánkuti László.