



Bányi Közlemények
Banki Reports

2025, V. évfolyam 1. szám

ISSN 2560-2810

Az Óbudai Egyetem lektorált folyóirata
Peer-reviewed journal of the Óbuda University





Bányai Közlemények–Bányai Reports Az Óbudai Egyetem lektorált folyóirata

ISSN 2560-2810

<http://bk.bgk.uni-obuda.hu>

A folyóirat célja, hogy tudományos igényességgel közölje a legfrissebb kutatási eredményeket az anyagtudomány, gyártástechnológia, gépészet, mechatronika, informatika, biztonságstudomány, közlekedéstudomány, munkavédelem, ipari automatizálás, robotika, energetika, fenntartható technológiák, illetve a mérnöki tudományok egyéb kapcsolódó területeiről.

Megjelenés félévente, jellemzően magyar és angol, esetenként egyéb idegen nyelven. Konferenciákhoz és témákhoz kapcsolódóan különszámok, tematikus számok alkalmi jelleggel magyar, vagy idegen nyelven.

Szerkeszti a szerkesztőbizottság.

A szerkesztőbizottság elnöke	Rajnai Zoltán
Főszerkesztő	Drégelyi-Kiss Ágota
Vezető szerkesztő	Laufer Edit
Tudományos szerkesztő	Lóránd Áron

Tartalomjegyzék

Drégelyi-Kiss Ágota: Szerkesztői előszó - 150 éves a Méteregyezmény	1-2
Mónus Ferenc: A törvényes metrológia története	3-8
Pálinkás Tibor: A méter sztori.....	9-24
Szűcs László és Nagyné Szilágyi Zsófia: Az új SI megvalósítása	25-33
Stelczér Attila: A metrológiai visszavezethetőség modern eszközei és ezek akkreditálása	34-39
Kőhalmi Erika: Etalonok és hitelesség jelölése mérőeszközökön.....	40-42
Turzó-András Emese, Németh Tibor és Szögi Antal: Hőelemek inhomogenitásának meghatározása Curie-pontos módszerrel.....	43-47
Győri Dorottya Beatrix és Czifra Árpád: Változások az érdességmérési szabványban	48-54
Pálinkás Tibor: OT-3 optoelektronikai TTP.....	55-68
Zombory Péter: Fecskendőpumpás infúzióadagolók térfogatáram kalibrálása infúzióadagoló mérőkészülékkel.....	69-75
Pálhalmi János: A metrológia szerepe az AI által támogatott digitális biomarker-kutatásban és -fejlesztésben	76-79
Czifra Árpád: Az Óbudai Egyetem ötven éve az érdességmérésben.....	80-85

Szerkesztői előszó - 150 éves a Méteregegyezmény

Editor's Foreword - 150th Anniversary of the Signing of the Metre Convention

Drégelyi-Kiss Ágota

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország

dregelyi.agota@bkgk.uni-obuda.hu

A metrológia, a mérések tudománya napjainkra meghatározó jelentőségre tett szert a tudásalapú társadalmak működésében. A globálisan integrálódó gazdasági, ipari és kutatási rendszerek egyre fokozódó mértékben támaszkodnak megbízható, reprodukálható és nemzetközileg összevethető mérési eredményekre.

A metrológia nem csupán a műszeres mérés technikai feltételrendszerét biztosítja, hanem multidiszciplináris tudományként működik közre a minőségbiztosítás, a szabványosítás és a jogi szabályozás megalapozásában is. A nemzetközi mértékegységrendszer (SI) új definícióinak bevezetésétől a laboratóriumok minőségirányítási rendszereinek működtetéséig a metrológusok felelőssége, hogy a mérések minden szintjén biztosított legyen azok metrológiai visszavezethetősége, mérési bizonytalanságuk értékelése, valamint jogszabályi és tudományos megalapozottságuk. A megbízható és egységes mérési gyakorlat fenntartása – amelynek alapjait 150 évvel ezelőtt a Méteregegyezmény fektette le – ma már nemcsak a gazdasági fejlődés és a technológiai újítások alapfeltétele, hanem a társadalmi bizalom és felelősségvállalás egyik kulcseleme is.

A Méteregegyezmény aláírásának 150. évfordulója alkalmából jelen különszám célja az, hogy átfogó képet nyújtson a metrológia hazai helyzetéről, fejlődési irányairól és gyakorlati alkalmazásairól, kiemelve a tudományág egyre növekvő jelentőségét a modern társadalomban. E különszám szerzői a magyar metrológiai közösség rendkívül sokszínű spektrumát képviselik. A tanulmányokat jegyző szerzők között találunk kormányzati szervnél dolgozó szakembereket – például a Budapest Főváros Kormányhivatala Metrológiai és Műszaki Felügyeleti Főosztályától (BFKH MMFF), valamint a Nemzeti Akkreditáló Hatóságtól (NAH) – akik nap mint nap gondoskodnak arról, hogy a mérések jogszabályi megfelelése, metrológiai visszavezethetősége biztosított legyen hazánkban.

A kötetben helyet kaptak olyan ipari és egészségügyi szereplők is, akik a metrológiát napi gyakorlatukban alkalmazzák a technológiai folyamatok minőségbiztosításában, műszerek kalibrálásában, vagy épp új mérési módszerek fejlesztésében. Az egészségügy területén például különösen érzékeny terület a mérési bizonytalanság, amelyet sokáig alig vettek figyelembe az orvostechnikai eszközök alkalmazása során – a mostani közlés épp e gyakorlat változását segíti elő.

A különszám harmadik meghatározó pillérét az egyetemi és kutatóintézeti háttérrel rendelkező szerzők képviselik, akik közül kiemelkedő szerepet játszanak az

Óbudai Egyetem munkatársai. Az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Karán immár hatodik éve folyik az országban egyedülálló, célzott metrológus mérnök-/szakemberképzés, amely példaértékű módon kapcsolja össze az elméleti alapot a gyakorlati tapasztalatszerzéssel. A hallgatók a képzés során nemcsak átfogó ismereteket szereznek a mérési terminológia (VIM), a bizonytalanság értékelés (GUM), valamint a minőségirányítási rendszerek (ISO/IEC 17025, ISO/IEC 17043) terén, hanem ipari projekteken keresztül valós környezetben is alkalmazhatják tudásukat. A program sikerét jelzi, hogy 2018 óta több mint száz hallgató vett részt benne, akik közül sokan mára meghatározó szerepet töltenek be a hazai ipar, hatósági területek, akkreditált laboratóriumok, valamint a kutatás területén. A képzés magas színvonalát széles körű, egyetemi, ipari és intézményi tapasztalattal rendelkező oktatói közösség biztosítja, akik elkötelezetten dolgoznak a metrológiai szaktudás hazai megerősítésén – ezúton is köszönet illeti őket hozzájárulásukért.

A Méteregegyezmény aláírásának 150. évfordulója alkalmából készült különszám tanulmányait olyan tematikus rendben állítottuk össze, amely lehetőséget ad az olvasónak, hogy lépésről lépésre haladva ismerje meg a metrológia alapfogalmait, történeti és elméleti kereteit, majd ezt követően elmélyüljön a gyakorlati, ipari, egészségügyi és digitális alkalmazásokban.

A kötetet Mónus Ferenc történeti tanulmánya nyitja, amely a törvényes metrológia fejlődését követi nyomon az ókortól napjainkig. Kiemelkedő erőnye, hogy a társadalmi és jogi szabályozás kontextusában mutatja be a metrológia szerepét. Ezt követi Pálincás Tibor írása, amely „A métersztori” címmel mutatja be, miként alakult ki a méter fogalma és hogyan járultak hozzá magyar tudósok a mértékegység fejlődéséhez.

A történeti áttekintést követően Szűcs László és Nagyné Szilágyi Zsófia tanulmánya vezeti be az olvasót a 2019-ben bevezetett új SI-definíciók világába, amelyek alapjaiban formálták át a nemzetközi mértékegységrendszert. A szerzők világosan és közérthetően mutatják be, miként váltották fel a fizikai etalonokat invariáns természeti állandók, és hogyan teszi ez lehetővé az egységek pontosabb, időtől és helytől független megvalósítását. Különösen fontos kiemelni, hogy magyar nyelven ez az egyik első olyan tanulmány, amely részletesen és rendszerezetten tárgyalja az új SI bevezetésének elméleti és gyakorlati aspektusait. A cikk nemcsak tudományos ismeretterjesztésként, hanem oktatási segédanyagként vagy szakmai háttérként is értékes, hiánypótló forrás. A szerzők

a nemzetközi SI-rendszer új alapjainak ismertetésén kívül a magyarországi implementációval kapcsolatos gyakorlati tapasztalatokat és kihívásokat is bemutatják, kiemelve a vonatkozó hazai rendeleteket és intézményi felelősségi köröket. Ez a tanulmány egyfajta híd a nemzetközi metrológiai diskurzus és a magyar szakmai közösség között: olvasmányos, mégis mély szakmai tartalmat közvetít, amely jól használható az oktatásban, a laboratóriumok munkájában, vagy akár a szabványalkalmazás gyakorlati kérdéseinek megértésében is.

Ezután Stelczer Attila írása következik, amely a metrológiai visszavezethetőség modern eszközeit tárgyalja, kiemelten foglalkozva a tanúsított referenciaanyagok (CRM-ek) szerepével és a referenciaanyag-gyártók akkreditációjának hazai eredményeivel. A részletes szabványismertetés és gyakorlati példák különösen értékesek teszik a kötetet a laboratóriumi mérések minőségének biztosítása szempontjából.

Kőhalmi Erika cikke az etalonok és a hitelesség jelölésének témáját dolgozza fel, történeti áttekintéssel és gyakorlati szemszögből egyaránt. Az eszközökön alkalmazott hitelesítési jelek evolúciója szimbolikusan is kifejezi a mérésbe vetett bizalom folyamatos erősödését.

A kötet középső részében a hangsúly az ipari alkalmazásokra helyeződik. Turzó-András Emese és munkatársai egy új diagnosztikai módszert mutatnak be, amely a Curie-ponton alapuló ferromágneses jellemzők révén képes feltárni a hőelemek inhomogenitását – ezáltal javítva a hőmérsékletmérés megbízhatóságát. Győri Dorottya Beatrix és Dr. habil. Czifra Árpád tanulmánya az érdességmérésre vonatkozó ISO szabványok változásait elemzi, továbbá bemutatja, milyen új mérési kihívásokra reagál az ipar az egyre finomodó gyártási folyamatok mentén.

Pálinkás Tibor második cikke egy hazai fejlesztésű optoelektronikai tapintófejet ismertet, amely egyszerre precíziós mérőeszköz és a gyakorlati alkalmazásra szánt mérnöki megoldás példája. A műszerfejlesztés ipari integrációja remek példa az akadémiai tudás transzferálására a termelési környezetbe.

Az egészségügyi mérések fontosságára hívja fel a figyelmet Zombory Péter, aki a fecskendőpumpás infúzióadagolók kalibrálásán keresztül mutatja be, miként lehet a mérési bizonytalanságot szakszerűen számszerűsíteni. Ez különösen fontos olyan területeken, ahol a páciens biztonsága múlik a pontos adagoláson.

A különszám egyik leginnovatívabb írása Dr. Pálhalmi János tanulmánya, amely a digitális biomarkerek metrológiai megközelítését tárgyalja az AI és a nagy nyelvi modellek világában. A tanulmány világossá teszi: ha ezek a technológiák valóban a klinikai gyakorlat részévé kívánnak válni, elengedhetetlen az adatok metrológiai validálása.

Végezetül az Óbudai Egyetem jubileumi írása, Dr. habil. Czifra Árpád mutatja be a felületi érdességmérés elmúlt ötven évét az intézmény falai között. A cikk nemcsak tudománytörténeti értékkel bír, hanem tanúsítja azt is, hogy a metrológiai oktatás és kutatás hazánkban is szilárd alapokon nyugszik, illetve képes hosszú távon alkalmazkodni az ipar és a társadalom igényeihez.

Ezúton is köszönet illeti a szerzőket elkötelezett és magas színvonalú munkájukért, mellyel jelentős mértékben hozzájárultak a Méteregegyezmény 150. évfordulójának

méltó szakmai megünnepléséhez. Bízom benne, hogy a jövőben is lehetőség nyílik hasonló, magyar nyelven megjelenő, hazai szakértők által készített, metrológiai tárgyú kiadványok publikálására. Remélhető, hogy e különszám tanulmányai nemcsak az érdeklődő olvasók kíváncsiságát elégítik ki, hanem ösztönzést adnak újabb magyar nyelvű szakkönyvek és tudományos közlemények megjelenéséhez is, erősítve ezzel a metrológia hazai jelenlétét és láthatóságát.

Dr. habil. Drégelyi-Kiss Ágota
Főszerkesztő

A törvényes metrológia története

The history of legal metrology

Mónus Ferenc
fmonus@gmail.com

Összefoglalás — A Méteregyezmény 150 éves évfordulója alkalmat ad arra is, hogy a metrológia három részterülete közül a törvényes metrológia történetét a kezdetektől áttekintsük és ezáltal jobban érthetővé tegyük annak jelenlegi céljait és eszközszerét. Ahol indokolt, röviden rámutatunk a metrológia többi ágával, valamint a Méteregyezmény és intézményeivel való kapcsolatokra.

Kulcsszavak: törvényes metrológia

Abstract — The 150th anniversary of the Metre Convention also provides an opportunity to review the history of legal metrology, one of the three subfields of metrology, from its beginning, and thereby to better understand its current goals and tools. Where appropriate, the connections with other branches of metrology are briefly pointed out, as well as with the Metre Convention and its regarding institutions.

Keywords: legal metrology

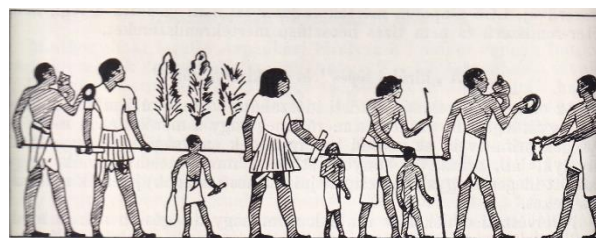
1 ÓKOR

A metrológia története akkor kezdődik, amikor a civilizáció fejlődése szükségessé és elengedhetlenné tette a helyes mértékek és megfelelő mérőeszközök felhasználását. A jogilag szabályozott ún. törvényes metrológia első nyomait pedig ott kell keresnünk, ahol a helyes mérésekre, a helyes mérőeszközök használatára vonatkozó szabályozás/utasítás/intelem először megjelenik.

Napjainkban a korszerű technikák megjelenésével rohamosan nő a most megtalált, de eddig rejtett/eltemetett ókori városok és építmények száma, amelyek jövőbeli feltárása alaposan megváltoztathatja az erről az időről alkotott ismereteinket, de most még csak a már feltárt és közzétett leletekre támaszkodhatunk.

A földművelés megjelenésével új helyzet állt elő, a termelésben közvetlen résztvevők a saját szükségleteiknél több élelmet tudtak termelni, azaz termékfelesleg jött létre. A földművelés igényli a napi túlélésen felüli előre tervezést, továbbá a felesleg tárolását és későbbi elosztását, aminek következtében a mérés és nyilvántartás is megjelenik. A helyi sajátosságok függvényében a földművelés olyan nagy beruházásokat is igényelhet, mint csatornák építését, hegyoldalokon a teraszok kialakítását, és kialakulnak a nagy városok is sokszor vízellátással. Mindezek építése önmagában is fejlett hosszmerést igényel, de az építkezések hatalmas ellátási, logisztikai feladatot jelentenek, amik egyrészt fejlett kereskedelmet tételeznek fel, továbbá azok részletes tervezés, mérés és nyilvántartás nélkül nem megvalósíthatóak. A köz által jobban ismert írnokokon és munkafelügyelőkön túl a korai

folyóvölgyi kultúrákban a későbbi speciális foglalkozások első változatai jelennek meg, mint az adószedő, raktárnok, és a nyilvántartást pecsétjével hitelesítő számvevő-könyvvizsgáló.



1. ábra: Földmérés, Egyiptom [5]

Egyiptomban a termőföld kimérését mutatja az 1. ábra az i.e. IV. évezredben Menes fáraó korában, a kép közepén áll a papirusztekercset kezében tartó tisztviselő.

A hosszmerés első leletei továbbá maguk a hatalmas időtálló ókori építmények pl. városok, templomok, piramisok, amelyek önmagukban bizonyítékai a fejlett hosszúság mérésnek. Ne feledkezzünk meg a vízvezetésekről, így pl. a sokféle megtalálható római kori vízvezetésekről, amelyek nem csak látványos építmények, hanem a változó domborzat mellett is a szigorúan előírt és megvalósított állandó lejtés mellett tudtak csak működni.

A tömegmérés szükségességét a raktározás, a kereskedelem és az adóbeszedés létrejötte vetette fel. Az első ábrázolások nemesfém adó vagy hadisarc mérlegelését mutatják a világi hatalom jelenlétében. Az első mérleglelet egy kis mérlegkar Egyiptomból az időszámítás előtt 3000-ból származik (2. ábra). A törvényes metrológia első lelete ezen a mérési területen a Babilonból származó súly (3. ábra), ami már nem a mérleg használatához szükséges súly, hanem annak hitelesítéséhez használt súly és aminek feliratozása a „hitelesítési előírás” első nyomanak tekinthető.



2. ábra: Mérleg i.e.3000 [3]



3. ábra: Mérleg hitelesítő súly [4]

A törvényes metrológia a metrológia jogszabállyal szabályozott része. A jogi szabályozás első szép példája az indus kultúrából i.e. 2150-ből származó „jogszabályközlöny” időtálló és látványos szobor formájában. (4)

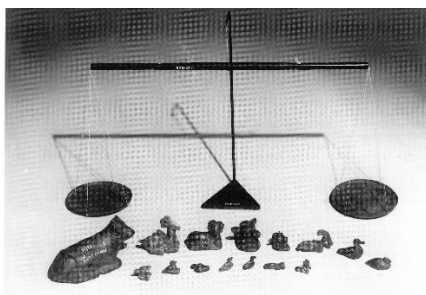


4. ábra: „Jogszabályközlöny” i.e. 2150 [1]

Ne feledkezzünk meg az ún. intelem kategóriáról sem, mind a Biblia, mind a Korán intelmet tartalmaz a helyes mértékek használatára.

A mértékrendszereket tekintve a mértékek meghatározása legfelső uralkodókhoz kötődik, akik eleinte inkább vallási vezetők-főpapok (Babilon, korai Egyiptom) később a világi birodalmakban már kizárólag világi uralkodók. Ebből következően egységes mértékrendszerrel ebben az időben (és még sokáig) nem beszélhetünk, bár a nagy birodalmak, mint Róma, mértékrendszerének hatása nem kizárólag a meghódított területekre terjedt ki.

Fontos felmérni, hogy a mérések, így a metrológia a társadalom mely részét érinti és hogyan terjed el - természetesen fokozatosan- a mindennapokban. Az 5. ábrán található egyiptomi mérleg jó példája a mindennapi használat igényeinek figyelembevételére (ergonómia), mivel a mérlegrészek a tömegük szerint különféle állapotformájúak, így kevésbé téveszthetők, mert nem kell feliratokat olvasni. Ne feledjük, az írástudás kevesek kiváltsága volt és a vélhetően a részben vagy teljesen írástudatlan vevő is jól tudta ez esetben követni a mérést.



5. ábra: egyiptomi mérleg [3]

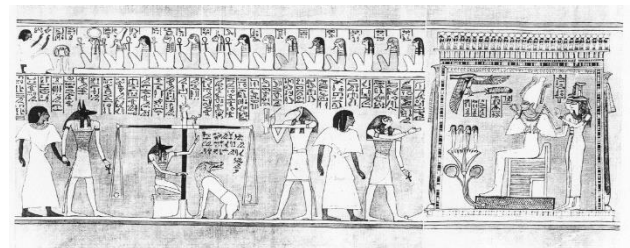
A célszerűsége törekvő római birodalom megalkotta és elterjesztette az ún. római mérleget, amely egyszerűen kezelhető és gyors mérést tett lehetővé, és aminek módosított formája még a múlt században is hordozható piaci gyorsmérleg elnevezéssel a hazai piacokon is általánosan használatban volt.



6. ábra: Ún. római mérleg [2]

Már az ókorban fellelhetők a mérések fontosságának első kultúrtörténeti vonatkozásai, amelyek a mai napig általánosan ismertek és elfogadottak maradtak.

Az egyiptomi kultúra egyik fő része a túlvilág és a túlvilági életre való felkészülés. A 7. ábrán a mérőeszközzel (mérleg) végzett „mérés” a túlvilágba való bejutás engedélyének feltétele, mai szóhasználattal a funkciója szerint egyfajta hazugságvizsgálónak tekinthető.



7. ábra: A mérés és a túlvilág kapcsolata Egyiptomban [2]

A római kultúrában a közismertebb nevén Justicia (8. ábra) az igazság és az igazságszolgáltatás istennője,



8. ábra: Justicia

aki bekötött szemmel egyik kezében mérleget, másikban kardot tart, és mai napig meghatározó, általánosan ismert és alkalmazott szimbólum maradt, így a magyar rendőrség logójában (9. ábra) is ez a szimbólum jelenik meg.



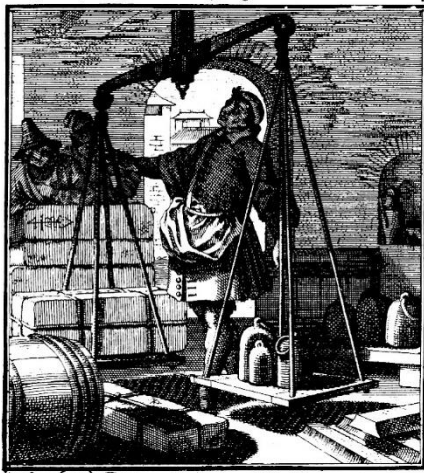
9. ábra: A mai rendőrségünk logója

2 KÖZÉPKOR

A népvándorlás és Római Birodalom bukása a törvényes metrológia területén is visszaesést jelentett. Az adóbeszedés és a kereskedelem azonban továbbra is megkövetelte az egységes mérésekre való törekvést.

A középkor vége felé jelentősen nő a tengeri kereskedelem, a városok megerősödnek, Európa nagy részére volt hatással Hanza-szövetség. Mindezek hatására a kereskedelem mennyiségében és minőségében is bővül. A szabad városok árumegállító joggal rendelkeznek, a bevitt árú mennyisége alapján után adót szednek. Új díj is megjelenik, a kötelező mérés után fizetendő mérési díj. Egyes városokban az adó és a mérési díj aránya jelentősen megváltozik, az adót csökkentik, mert ezt követelik a kereskedők, de ennek arányában növelik a mérési díjat. A kötelező hatósági mérés után fizetendő díj így sok helyen igen fontos bevételi forrássá vált. A törvényes metrológia feladata nő, de a mérésekhez használt mértékek területi és időbeli egységessége nem volt biztosítva. A mértékek országoként eleve különböztek, de egy országon belül is sok esetben vidékenként is eltérőek voltak, azonkívül még időnként is változtatták azokat.

A magyar mérésügy kialakulására alapvetően a német mérésügyi modell volt hatással, de ez határozta meg az osztrák és svájci mérésügyet is. A hitelesítés szó német megfelelője (*Eichung*) is a középkor végén és az újkor elején alakult ki. Az első lépcső volt az *Eichmeister* megjelenése, aki a város hatósági alkalmazottja, akinek jelenlétében folyt a mérés.



10. ábra: „Eichmeister” [2]

Mint a 10. ábrán is látható, a mérlegelés elvégzése komoly fizikai feladat volt, a terheket fel kellett rakni a teherserpenyőre, a súlyokat a másikra, de nem volt egyszerűbb feladat a gabona térfogatmérése sem. Az *Eichmeister* erre az „alantas” fizikai munkára természetesen segédekkel alkalmaz, a mester lassan teljesen hivatalnokká válik, aki már csak felügyel. Később a mérési volumen növekedése miatt a hatósági személy, az *Eichmeister* már nincs teljes időben az összes helyen jelen, csak naponta körbejár. A harmadik lépcsőben a „hatóság” feladja – a mai elnevezéssel kiszervezi – a mérés közvetlen felügyeletét és a feladata már csak a mérőeszköz ellenőrzésére (*Eichung*-hitelesítés), a mérlegkezelők

vizsgáztatására és a mérések szűrőpróbaszerű ellenőrzésére terjed ki.

A mérésügy hazai első ismert szabályozása I. Károly 1342. évi dekrétuma volt, amely szerint pl. minden városban és közhelyen súlymértékeivel ellátott mérlegnek kell készenlétben állnia.

Zsigmond király 1405. évi törvényei elrendelték a királyság egész területén a Buda város mértékeinek használatát, amely a hosszúság (rőf), tömeg (font) és térfogatmérésre (gabona és bor) terjedt ki. Mezőgazdasági ország lévén a mérések száma szerint elsősorban a gabona valamint a bor térfogatmérése az uralkodó. Azonban sajnálatosan a rendelkezés alól kivétel volt a dézsma szedése, de ezt a kivételt a gyakorlatban még a tized megállapítása esetén is alkalmazták. A rendelet valószínűleg alig érvényesült, mert abban az évben a második törvénytörvényben is megismétlik.

A budai mértékek az Árpád-házra nyúlnak vissza, de minden fő területnek saját mértékei voltak a melyekhez foggal-körömmel ragaszkodtak. Nagyobb területre voltak hatással Buda, Pozsony, Kassa, Eszék, Nagyszombat és a Hegyvidék mértékei. A török megszállás is hátráltatta az egységesítést, így Buda helyett Pozsony került előtérbe.

A régi pozsonyi városháza XIV. századból származó kapubejárátán a köz számára elérhető a láb és rőf mértéke 11. ábra, míg a másik kapufélfán az öl hossz mértéke található.



11. ábra: Pozsony-városháza [5]

A későbbi időkből, 1551-ből származó „pozsonyi mérő” (gabona térfogatmérték) látható a 12. ábrán, melynek térfogatára már valószínűleg ausztriai Stockerau—Stengel-mérték volt hatással.



12. ábra: Ún. pozsonyi mérő [5]

1590-ben az ellenőrző királyi bizottság azt jelenti, hogy alig van olyan vármegye, amelynek egy-egy járásában ugyanazt a mértéket használnák. Ugyanerre a helyzetre utal, hogy 1647-ben a végvári katonaság számára megszavazott gabonasegélyt nagyszombati és nem pozsonyi vagy bécsi mérőben kifejezve állapították meg.

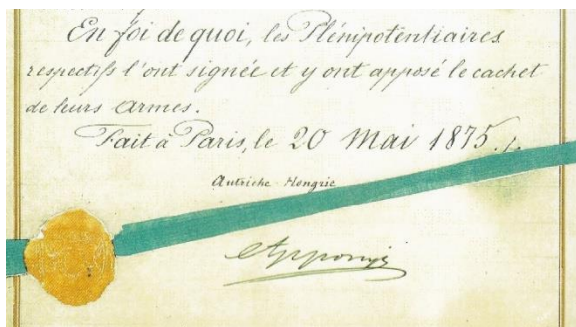
3 ÚJKOR (KORAI)

Az újkorban kiteljesedik az előző fejezet végén leírt folyamat. A tudomány és technika először eléri, majd jelentősen meghaladja az ókori csúcsteljesítményeket. A felfedezések korával, a gyarmati rendszerek kialakulásával a kereskedelem globálissá válik. Mind a tudományos, mind a technikai fejlődés új mennyiségek mérését igényli és a hagyományos mérési területeken is jelentősen nő a mérések pontossága és megbízhatósága iránti igény. Az ipari forradalom pedig ipari termelés ugrásszerű mennyiségi és minőségi növekedéséhez vezet.

1670-ben G. Mouton francia csillagász javasolja a Föld délkörének fokpercén és a tízes számrendszeren alapuló mértékrendszer bevezetését. A francia forradalommal a feudális rendszer összeomlott, és a harmadik rend követelte az egyenlőség elve alapján az uralkodói mérték meghatározási gyakorlat megszüntetését, ezáltal a korábbi nem is egységes és nem is állandó mértékrendszer eltörlését. 1791 március 26-án a francia nemzetgyűlés elrendelte a méter meghatározásához szükséges mérések elvégzését és a métert 1799 decembert 10-én véglegesítették. Olaszország egyes részeiben 1803-ban, Belgiumban 1816-ban, Hollandiában 1821-ben míg Görögországban 1836-ban vezették be a méterrendszert.

Magyarországon is igény volt a tízes alapú méterrendszer bevezetésére, azonban 1853-ban a Habsburg Monarchia mégis az alsó-ausztriai rendszert vezette be. A méterrendszer bevezetésének előkészületei a kiegyezés után már a magyar minisztérium kezdte meg és az 1874. évi VII. törvénycikk valósította meg. A hosszúság és a tömeg magyar nemzeti etalonjának a Nagy Károly-féle etalont választották. Nagy Károly (csillagász) még 1844-ben vásárolta az eredetileg a párizsi Observatoire-nak gyártott és át nem vett hossz- és tömegetalont, aminek összehasonlítása a párizsi méterrel 1870-ben meg is történt.

Hosszú előkészítés után 1875 május 25-én 19 állam részvételével létrejött a Méteregezmény, amelyet az Osztrák-Magyar Monarchia részéről gróf Apponyi Rudolf párizsi nagykövet írt alá (13. ábra).



13. ábra: Méteregezmény (aláírás)

Az egyezményvel megalapították a Párizsban működő Nemzetközi Súly és Mértékügyi Hivatalt (BIPM) és az

általában négyévente ülésező Általános Súly és Mértékügyi Konferenciát (CGPM). A Méteregezményt az 1876. évi II. t. illesztette be a magyar jogrendbe.

A Méteregezmény és intézményeinek, valamint a SI rendszer ismertetése –mivel az a tudományos metrológia területébe tartozik – nem ezen cikk feladata.

Miután a hossz és tömegetalont elkészültek az 1899. szeptember 24-én tartott sorsoláson Magyarország megkapta a 14-es számú méter- és 16-os számú kilogrammetalont, amelyek jogilag az 1891. VI. tc. alapján váltották fel a Nagy Károly-féle mértékeket.

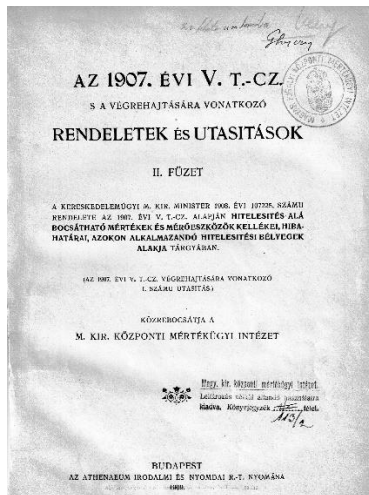
A 1876. évi II. t. az időszakos mérőeszköz-hitelesítést nem vezette be, nem egységesítette a díjakat, valamint a hitelesítés szervezetrendszere sajnos csak korlátozottan jött létre, mert a területi hivatalok létrehozására a helyhatóságoknak nem volt anyagi forrásuk. A hivatalok nagyobb részét vállalkozók működtették, melyek működésével kapcsolatosan idővel sok panasz merült fel, így új mértéktörvény előkészítése vált szükségessé.

Tulajdonképpen történetileg a Méteregezmény előtti, de később jelentkező hatás volt az amerikai polgárháború haditermelési újítása. Az északi államok mind létszámban, mint felszereltségben hátrányban voltak, rövid idő alatt hagyományos módon nem lehetett a felszerelést, pl. puskát előállítani. Bevezették a csereszabatos részegységeken alapuló termékgyártást, amikor az egyes részegységeket különböző gyártók nagy sorozatban állították elő és az összeszerelést akár a hadszíntér közelében is el lehetett végezni. A csereszabatosság biztosítása az ipari metrológia ugrásszerű fejlődését indította és kialakultak a minőségbiztosítás korai elemei is.

4 MAI KOR (NAPJAINK)

Az 1907. évi V. tc. rendelkezései orvosolták az előző törvény hiányosságait, és az olyan jól megalkotott törvénynek bizonyult, hogy a jelenlegi 1991. évi XLV. mérésügyi törvény megalkotásakor is mintául szolgált. A törvény rendelkezett a mértékegységekről, a közforgalomban kötelező hitelesítést rendelt el, bevezette az időszakos hitelesítést, szabályozta a hitelesítés most már állami szervezetrendszerét, egységes díjakat állapított meg és felhatalmazta a kereskedelmi minisztert a végrehajtási rendeletek kiadására, amik (7db) az 1908. évben kiadásra is kerültek.

A mérésügy központi szerve a Magyar Királyi Mértékügyi Intézet lett. Az Intézet a jogkövető magatartás segítése okán a törvényt és a végrehajtására vonatkozó rendeleteket és utasításokat füzet sorozat formájában nyomdai úton is kiadta (14. ábra).



14. ábra: Az 1907. évi V. t. végrehajtási rendeletei

A Hivatal továbbá 1910-ben jelentette meg a rendszeres kiadásra kerülő Mértékügyi Közlemény első számát.

A területi szervek száma gyorsan nőtt: 1909-ben 50 db volt, azonban később a világháború miatti területvesztés és gazdasági recesszió miatt 1931-re számuk már 30-ra csökkent. A második világháború során a Mértékügyi Intézet épületben és műszerállományban jelentős károkat szenvedett.

A II. világháború után a hidegháború következtében a keleti blokknak olyan termékeket is magának kellett gyártania, amit korábban a most már ellenséggé vált országokból importált, a korábbi agrár országban iparosítás indult. Ezen hatások mind a tudományos metrológia (etalonfejlesztés és -fenntartás), mind a törvényes metrológia területeinek bővülését igényelték. A mérésügyi szerv neve és jogállása 1952-ben megváltozik, az 1952/73 MT rendelet szabályozta az Országos Mérésügyi Hivatal (OMH) feladatait, és az központi közigazgatási szervvé válik. Az 1950-es évek közepétől nagyarányú hazai műszerfejlesztés és gyártás indul meg, egyes speciális egyedi fejlesztések feladatát a mérésügyi szerv kapja meg.

A Méteregegyezmény egységes mértérendszer hozott létre, de sajnos a világ nem elhanyagolható földrajzi területén az angolszász mértékegységeket nem tudta kiszorítani. Továbbá több szakmai területen az angol mértékegységek maradtak egyeduralmukodók, mint a hajózás, repülés vagy az elektronika.

A mértékegységeken felül a törvényes metrológia egyre bővülő területének tárgyát képező mérőeszköz-fajtákra vonatkozó követelményeket is egységesíteni kell, ha a kereskedelem útjában álló akadályokat fel akarjuk számolni. Erre a feladatra a Méteregegyezmény és intézményeinek a felhatalmazása nem terjed ki, a bővítés helyett új szervezet megalakítása vált szükségessé.

A törvényes metrológia nemzetközi szervezete 1955. október 12-én alakult, és hazánk tagságát az 1958. évi 24. tvr. hirdette ki. A szervezet a mai napig 150 féle mérőeszközt adott ki ajánlást, melyek tartalmazzák a metrológiai követelményeket és azok ellenőrzési módját. Az OIML ezenkívül dokumentumokat adott a törvényes metrológia felépítésére és intézményrendszerére is.

Az OIML-ajánlások alapján az exportra dolgozó mérőeszközigyártóknak elvileg csak egyféle mérőeszköztípust kell kifejleszteniük, azonban egyes országokban az

OIML-ajánlások értelmezésében is vannak különbségek. Mivel ezek csupán normatív dokumentumok egyes országokban ezen felül további követelmények is lehetnek. Az OIML-ajánlások szélesebb körű elterjedését növelte, hogy később a század végén már ingyenes elérést biztosítottak a honlapjukon (oiml.org). Az OIML-ajánlások megjelenése azonban nem jelentette a nemzeti hatáskörben elvégzett típusvizsgálatok megszűnését, amelyeknek meg kell előzniük a hitelesítést.

A rendszerváltás után a minisztertanácsi rendelettel való hazai szabályozás felváltását az 1991. évi XLV. törvény oldotta meg, amely mintájául sok tekintetben a 1907. évi törvény szolgált. A törvény általános rendelkezéseit egészíti ki a részletszabályokat tartalmazó 127/1991. (X.9.) kormányrendelet. A kötelező hitelesítésű mérőeszközök felsorolása eredetileg a törvény mellékletét képezte, de egy módosítási szükséglet során a parlament kérte annak a kormányrendeletbe való áthelyezését. A törvény és kormányrendelet jól szabályozta a mérésügyet az elmúlt több mint harminc évben és csak apróbb módosításokra volt szükség, elsősorban az EU csatlakozáskor.

Az OIML területén továbblépés a megalakulás után több évtizeddel az önkéntes OIML Certificate System létrejötte volt [6]. A rendszerbe tartozó országok vállalják, hogy más ország OIML-tanúsítványát elfogadják. A tanúsítvány elfogadása nem jelenti a nemzeti típusjóváhagyás megszűnését, de magát a méréseket és tesztek nem kell országonként megismételni. Természetesen, ha vannak az OIML-ajánlásban nem szereplő nemzeti előírások azokra ez nem vonatkozik. Az OIML-tanúsítvány kiadásához a kibocsátó szervezetet mérőeszköz fajtánként regisztrálni kell és bizonyos követelményeknek meg kell felelni. Maga a tanúsítvány is egy regisztrációs adatbázisba kerül. Magyarország része a rendszernek és néhány eszközfajta tanúsítvány kiadásra is jelentkezett. Tanúsítvány elfogadása természetesen történt, azonban kiadásra nem került sor az EU-csatlakozás miatt, mert egyrészt a hazai gyártók a következőkben ismertetésre kerülő EU-tanúsítási rendszerrel zöld utat kapnak az EU piacára, másodrészt a nem EU-tagállamokban itt a kontinensen az EU-tanúsítvány ugyanazt a szerepet a gyakorlatban jól betölti. Más kontinensre – ahol az egyébként a drága OIML-tanúsítvány hasznos lenne – a hazai gyártók nemigen szállítanak.

A mérőeszközök szabad kereskedelmét akadályozó tényezők megszüntetésében magasabb szintet az EU típusjóváhagyás/ tanúsítás valósított meg.

Első lépcsőként az ún. régi megközelítésű irányelvekben szabályozott típusjóváhagyás és „e” jeles hitelesítés bevezetése történt meg az EU-ban jóval a mi csatlakozásunk előtt. Ez a rendszer opcionális volt, tagállam belső piacára e nélkül, a nemzeti eljárás szerint is forgalomba lehetett helyezni a mérőeszközt.

Második lépcsőként ún. új közelítésű két irányelv 11 mérőeszköz-fajta már megszüntette a nemzeti első hitelesítés lehetőségét is. A gyártó több tanúsítási modul közül választhat, a mérőeszközt nem az „e” jel, hanem „CE” és „M” jel kerül. Az új megközelítés lényege, hogy magában az irányelvben csak az alapvető követelmények vannak rögzítve, a részletes követelmények harmonizált EU szabványban, azok hiányában kijelölt OIML-ajánlásban találhatók [7]. A két (MID és NAWI) irányelv ismertetése külön cikk feladata lehet.

Az irányelveket az EU elvárásainak megfelelően miniszteri rendeletek ültetik be a hazai jogrendbe, de a nemzeti eljárás és közösségi hitelesítés/tanúsítás viszonyát természetesen a mérésügyi törvényben is szabályozni volt szükséges.

Az időszakos hitelesítés körébe tartozó mérőeszközök számának tekintetében még az EU-n belül is minden harmonizálási törekvés elutasításra talált. Német és a német mintára épült mérésügyi rendszerre a részletes szabályozás és nagyobb mérőeszköz szám volt jellemző. Ugyanez volt mondható a keleti blokk országaira, hiszen az állami tulajdonrendszer és tervgazdaság indukálta a részletes mérésügyi szabályozást. Franciaország és Anglia mindig hangsúlyozta a német rendszertől való különbözőségét, de alapjaiban mégis rokon rendszernek tekinthetők. Az északi államokban nem található meg ez a részletes mérésügyi szabályozás, azt egyes tagállamok, mint pl. Dánia a csatlakozáskor építették ki. Dániában csak az EU-szabályozás alá eső mérőeszközök kötelező hitelesítésűek, Hollandiában ezeken felül csak néhány és egyik országban sincs kötelező időszakos hitelesítés. Az ún. északi országokban a német-francia mintától eltérő intézményrendszer, valamint az előírt, ill. elvárt viselkedésminták mégis biztosítják a mérések egységességét és védik a fogyasztókat.

A csatlakozásra való felkészítéskor/felkészüléskor komoly elvárás volt az EU részéről a kötelező hitelesítésű mérőeszközök számának csökkentése, ami meg is valósult, így a hazai kötelező hitelesítésű mérőeszközök száma ma az EU középmezőnyében foglal helyet.

A jövő várható eseményeit nem érdemes jóslni, legfőljebb a futó eseményeket és hatásokat érdemes számba venni. Az utóbbi harminc évben többször felmerült a tudományos és törvényes intézményeinek a BIPM-nek és az OIML-nek összevonása, elsősorban gazdaságossági okok miatt, de ez még nem valósult meg. Az EU-tanúsítás területén a legutóbbi nagyobb esemény 2015-ben a korábban már említett két EU-irányelv módosítása volt és hamarosan újabb kiegészítés is várható. A globalizáció a harmonizálás irányában hat, a blokkosodás során a helyi piac védelme (pl. vámok) kerülnek előtérbe és a nemzeti típusjövahagyás is részben egy ilyen eszköz.

5 IRODALOMJEGYZÉK

- [1] A. E. Berriman. Historical Metrology (1953). J.M Dent and sons LTD London
- [2] Manfred Kochsiek (1989). Handbuch des Waagens. Fiedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig
- [3] Giulia Luppi (2011). Bilance a braci uguali. Museo della Bilancia/Il Bulino
- [4] OIML Buletin (2012). Historical of scales cikksorozat, www.oiml.org
- [5] Fejezetek a magyar mérésügy történetéből (1959), Közgazdasági és jogi kiadó
- [6] <https://www.oiml.org/en/oiml-cs/oiml-cs-homepage>
- [7] https://ec.europa.eu/growth/single-market/goods/building-blocks/legal-metrology_en

A méter sztori

The Story of the Metre

Pálinskás Tibor, gépészmérnök

Óbudai Egyetem, BGK, Gépészeti és Technológiai Intézet

ptibor723@gmail.com

Összefoglalás — A régi korok országoként, sőt tartományoként eltérő, s többnyire önmagukban is következtetlen mértékrendszereitől hosszú és rögös út vezetett a tizenegyedik CGPM által 1960-ban meghozott forradalmi döntésig: az SI (Système International d'Unités) bevezetéséig. Igaz, a méter az ezt megelőző, többé-kevésbé koherens mértékrendszereknek, az MKS-nek, ill. az MKSA-nak is alapegysége volt. A következőkben az SI hét alapegysége közül a hosszúság mértékegységének a történetét foglaljuk össze; mind közül éppen ez a legkalandosabb. Mi magyarok büszkék lehetünk arra, hogy a modern méter megszületésénél bábáskodtak magyar tudósok, és a ma elfogadott realizációja a méternek is egy híres hazánkfiától, Bay Zoltántól származik. Éppen ezért cikkünkben a méter hazai történetéről is részletesen esik szó. A cikk utolsó fejezeteként bepillantunk a kilogramm történetébe is.

Kulcsszavak: méter, SI, mértékegységrendszerek

Abstract — From the diverse and often inconsistent measurement systems used across countries and even provinces in earlier times, it was a long and bumpy road to the revolutionary decision made by the 11th CGPM in 1960 to introduce the SI (Système International d'Unités). Notably, the metre already served as the base unit in several of the earlier, more or less coherent systems. In the following a summary of the history of the unit of length can be read, which is the most adventurous out of the seven basic units of the SI. We Hungarians can be proud of the fact that Hungarian scientists helped to create the modern realization of metre, and that the definition of the metre adopted today comes from a famous Hungarian scientist, Zoltán Bay. That is why our article also devotes special attention to the Hungarian contribution to the history of the metre. In the last chapter of the article we also take a closer look at the history of the kilogram.

Keywords: metre, SI, system of units of measurements

1 ELŐZMÉNYEK

A kézműipar fejlődése, a kialakulófélben levő egységes nemzetközi piac, majd az ipari forradalom kényszerítő erővel hatott egy egységes mértékrendszer kidolgozására. Sok tudós fáradozott azon, hogy a hosszúság egysége ne például az uralkodó valamely testrészének a mérete (láb, arasz, hüvelyk), hanem végül egy laboratóriumi körülmények között bárhol leszármaztatható természeti állandó legyen.

Talán az első erre vonatkozó indítványt Christiaan Huygens, a használható ingaóra megalkotója tette: 1664-ben a másodpercinga hosszát javasolta a hossz mérés egységéül. Bár javaslatát később többször módosította, ötletét nem hasznosították. Ezzel a javaslattal aztán többen

is előálltak, pl. Jean Picard és Ole Rømer később a Francia Nemzetgyűlés előtt Charles-Maurice de Talleyrand is. Jean Richer francia csillagász mutatta ki, hogy az inga északi és déli országokban másképpen leng, mint az Egyenlítőn. Ma úgy mondjuk, hogy a Föld különböző pontjain a nehézségi gyorsulás állandója más és más. Érdekes, hogy ezen javaslatokban megtalálható a jelenleg érvényben levő meghatározás csirája: a hosszúságegységet az időmérésre próbálták visszavezetni!

Az mindenesetre megállapítható, hogy bár az alaptermékeket önkényesen választhatjuk meg, egy mértékegység kialakulásakor mindig két, egymásnak ellentmondó feltétel ütközik:

- a mértékegység akkor jó, ha mindig könnyen hozzáférhető és kezelhető (pl. láb),

- a mértékegység természeti állandó legyen (már Huygens javaslata is erre irányult). Az ilyen alapuló etalon viszont csak különleges körülmények között, speciális felszereléssel és speciális szakértelem birtokában kezelhető.

Az SI 2017-es revíziójáról a Természet világa folyóirat 2019/9. számában megjelent egyik cikk [1] alatt idézett, kissé maliciózus részlete éppen ez utóbbit látszik igazolni: „Ugyanakkor még e rejtélyes változtatások hívei is elismerik, hogy ezek megvadáthatják azokat, akik kevésbé jártasak a fizikai állandók világában. 'Hogyan fogjuk megantánítani az embereket az új egységek használatára?' kérdi Jon Pratt, az NIST egy másik fizikusa. 'Az új bonyolult definíciók kétségbe kergetnek mindenkit, akinek nincs erős fizikai ismerete', mondja Gary Price, egy metrológus Sydneyből, aki az Ausztrál Nemzeti Sztemderdek Hivatalának tanácsadója. 'Az új SI nem teljesíti a mértékegységrendszer alapvető kritériumát: meghatározni a tömeget, amivel más tömeg mérhető, definiálni a hosszúságot, amivel a hossz mérhető és így tovább. Az új SI sem a súlyoknak, sem a mértékeknek nem rendszere' Price szerint.”

Az 1860-as években Bécs vissza akart térni a gondolathoz, és az új, egységes tizedes hossz mérték alapjául a másodpercinga Bécsben mért hosszát kívánták megállapítani. Természetesen csak valódi fizikai inga jöhetett volna szóba, így a hosszúságegység ilyen definíciójához hozzá kellett volna rendelni egy nagyon pontosan definiált, „szabványosított” mérőingát is.

Eötvös Loránd már 1891-ben elkészítette első torziós ingáját, amivel a helyi nehézségi gyorsulást minden addigi módszernél pontosabban lehetett megmérni. Oltay Károly, később legendás műegyetemi geodézia professzor, még 1908-tól több alkalommal viszont egy speciális, vákuumban szabadon lengő „hagyományos” ingapárral határozta meg az ország néhány pontján, így Budapesten is a g gravitációs gyorsulás értékét. A méréseket Eötvös felkérésére végezte el. A Sterneck-féle kettős (nem torziós, fizikai) ingával végrehajtott mérések pontos körülményeit, eredményeit az „A nehézséggyorsulás budapesti értékének meghatározása” c. művében (Saját kiadás, 1917) ismerteti. Később visszatér a témára („Relatív gravitáció-mérés invariábilis ingákkal”, 1944). Ma a nehézségi gyorsulást többnyire az Eötvös-ingánál érzékletlenebb, de könnyebben kezelhető, lényegesen gyorsabban beálló relatív graviméterekkel – különböző kinematikájú, újabb elektronikus kompenzálórendszerrel felszerelt, de lényegében rendkívül finom rugós dinamométerekkel – mérik. A helyi nehézségi gyorsulás abszolút értékét vákuumban szabadon eső test lézerezinterferométerrel követett pozícióból

és az ezek között eltelt, atomórával megállapított időközökből számítják ki (abszolút graviméterek).

A Föld méretén alapuló hosszsmérték gondolatát már a XVIII. században felvetette Nicolas Louis de Lacaille és Jacques Cassini francia csillagász, és neki is kezdtek a méréseknek.

Ezen az ötleten alapult Gabriel Mouton, szintén francia csillagász javaslata is. Ő a délkör egy fokpercének hosszán alapuló tizedes mértékrendszert vezetett volna be. A Francia Tudományos Akadémia 1736-ban kiküldött egy kutatócsoportot a Föld délkörének megmérésére, a „Cassini és Newton közt a Föld alakja fölött kitört véleménykülönbség eldöntése végett” (idézet Kruspér Istvántól). A mérés Peruban és a Lappföldön történt. A kutatócsoportok ideiglenes hosszsmértéke egy-egy acélból készült, speciális kialakítású véglapos etalonpár volt, amelyek egy korábbi francia alaphosszmérték, a Toise du Châtelet alapján készültek. A keresztmetszetük kb. 10×40 mm, az általuk megtestesített hossz 864 párizsi vonal (2 francia öl, kb. 1,949 m) volt. A normáliákat elkészítőjükről Langlois-féle ideiglenes mérték-normáliának is nevezték. Ezen különleges kivitelű, két, illeszkedő darabból álló hosszsmértékek elődjeinek története önmagában is regényes; a kutatócsoportok mindennapjai sem teltek eseménytelenül – de ezek részletezésére most nem térünk ki. A Lappföldön használt etalon (*toise du Nord*) hajótörés következtében eltűnt, a másik (*toise du Pérou*) azonban visszakerült Franciaországba. Egy, az említettekhez hasonló etalonpár egyik végéről készült felvételt mutatunk be az 1. ábrán. Az eredeti *toise du Pérou* jelenleg a *Observatoire de Paris*-ban található. 1776-ban XV. Lajos jóváhagyásával a *toise du Pérou* alapján 80 db másolatot készítettek, melyek megnevezése: *toise du l'Académie*.



1. ábra: Egy *toise du Pérou*-hoz hasonló, egymásba illeszkedő etalonpár végkialakítása

Az így kapott eredményt sem hasznosították, talán azért, mert az egyes mérések eredményeképpen kapott ívhosszak között jelentős eltérések voltak. Annyi tudományos haszna mindenesetre volt ezeknek a méréseknek, hogy egyértelműen bebizonyították a Föld lapult, geoid voltát. Jóval később, 1816 és 1855 között mások még egy felmérést végeztek, amelyeknek célja már kizárólag a Föld lapultságának meghatározása volt. (Ez volt a Struve földmérő vonal, az észtországi Tartun átmenő délkörön.)

További ötletek is felvetődtek a Föld geometriai méreteiből levezethető hosszsmértékre. Például voltak, akik az Egyenlítő egy kiválasztott szakaszának a hosszából származtatták volna le a métert, de ezt és a hasonló ötleteket mérési nehézségek miatt vetették el.

Az ókorban tökéletes gömbnek tekintett Földünk méreteinek elsőként számon tartott meghatározása időszámításunk kezdete előtti 250-ben történt, és az alexandriai könyvtár vezetőjének, Eratoszthenésznek a nevéhez fűződik. Az általa feltalált módszer igazi lángészre vall. Az Alexandriában és Sziénában végzett megfigyelései alapján, itt nem részletezendő, ám rendkívül egyszerű módszerrel megállapította, hogy a Föld kerülete mai mértékegységgel kifejezve 46 248 km. Döbbenetes eredmény, tekintve, hogy a két település távolságát csak durván lehetett megsaccolni.

Jean Francois Femel 1550-ben közvetlen méréssel (kerékfordulat-számláló mérőkocsival) megmérte a délkör Párizs és Amiens közötti szakaszát, és kiváló eredményt kapott. A mérést 1615-ben Willebrord Snellius már geodéziai háromszögeléssel végezte, de nagy hibával terhelt eredményre jutott. (Bár őt tartják hivatalosan a geodéziai háromszögelés feltalálójának, már az ókorból is ismeretesek hasonló elvű mérésekre utaló adatok.)

Jean Picard az 1660-as években már távcsöves teodolittal végezte a háromszögelést, kiváló végeredménnyel. Tulajdonképpen ezek az eredmények állították helyre Newton megingott önbizalmát, és végre nyilvánosságra hozhatta a tömegvonzás négyzetes törvényét.

Lacaille és Cassini 1718-ban fejezte be franciaországi délkörmérését. Közben Newton kimutatta, hogy a Földnek lapultnak kell lennie. Elméletét a Jupiter távcsöves megfigyelése is igazolta, ui. az is szemmel láthatóan lapult.

Az idő tájt és később is többen, több délkörmérést, szélességkör-mérést végeztek, melyek célja a tudományos kíváncsiságon túl az országok háromszögelési hálózatának összekapcsolása, a térképek pontosítása volt. [2]

2 AZ ELSŐ MÉTERETALONOK, A „PÁRIZSI ÖSMÉTER”

A francia nemzetgyűlés csak 1790-ben, Talleyrand ajánlatára foglalkozott újra a kérdéssel. A március 8-i határozatában az angolokkal együttműködve szeretett volna megoldásra jutni, de azok erre nem mutattak készséget.

Végül az 1791. március 26-ára összehívott Nemzetgyűlés elrendelte a francia Akadémia által javasolt mérés végrehajtását, ami a Föld délkörének negyvenmilliomod részeként meghatározott hosszúságú új alapegység, a méter kimérését célozta meg. (A „méter” a görög „*metron*” szóból ered, és mértéket, távolságot jelent. Az új decimális hosszegység elnevezését később gyakorlatilag a világon mindenhol elfogadták, erről nem folytak viták. Végül is beláthatjuk: a Föld méretéből származtatott hosszsmérték-etalon politikailag teljesen semleges, ugyanígy a „méter” megnevezés is, ezért mindkettő a tudósok nagyon józan világlátását dicséri.)

Hogy miért éppen ekkora méterben állapodtak meg? Nyilván hasonló alaplémértéket szerettek volna kapni, mint meglevő, az európai ember számára megszokott mértékek. A francia öl, a „*toise*” kb. 0,975 m volt. A mai angol yard nagyjából 0,914 m. A többször emlegetett másodperciga – azaz egy fél-lengést 1 s alatt végző matematikai inga – hossza Európában 0,993 m. Az európai ember valamiért szereti az 1 m körüli hosszúságegységet, bár számos ellenpélda is akad más kultúrákból. A másik szempont talán az volt, hogy a délkör hossza/m hányados valamiféle könnyen megjegyezhető, „kerekebb” szám legyen, így adódhatott az 1:40 000 000 arány. („Még kerekesebb” arányként is felfoghatjuk: a délkör Északi-sark és az Egyenlítő között mérhető szakaszának 1:10 000 000 része.)

De honnan e vonzódás a méter körüli hosszegységekhez? A neten kutakodva erre a kérdésre csak meglehetősen misztikus, sőt számmisztikával vegyített magyarázatokra leltem, igaz, ilyenek akadnak bőségesen. Az egyik érdekes teóriával Borbola János áll elő a tanulmányában, amelyek a magyar királyi korona méreteiből, a rajta található egyes szimbólumokról – melyeket a szerző egyiptomi hieroglifiként deklarál –, a szerinte 31,5 vagy 31,6 cm-es láb, mint ősi mértékegység átmérőjének megfelelő kör kerületéből stb. vonja le a következtetéseit, amelyek alapján a méterhez közeli mérték az ókorból eredeztethető. Az egyik cikkében [3] például erre a következtetésre jut: „A Szent Korona alaplémértékét képező abüdoszi kettős láb metrikus egységekben mért és egyiptomi hieroglifikával írt nagysága a pártázat alakos elemein félreérthetetlenül olvasható. A Szent Korona és a méter közötti összefüggés közvetlen bizonyítását ezzel befejezhetnek tekinthetjük.”

Vagy így van, vagy nem, lelke rajta... A pártázaton tényleg láthatók a más „koronairadalomban” hegyként v. dombként definiált díszítőelemek, amelyek akár a 10-es szám hieroglifikus jeleiként is felfoghatók. Ez azért is érdekes, mert Csomor Lajos, aki műveiben többek között rendkívül részletesen leírja a Korona szerkezeti felépítését, elkészítésének technológiáját, szimbólumrendszerét, csak érintőlegesen tárgyalja a pártázat díszítőelemeit. Azt viszont több helyen hangsúlyozza, hogy a műtárgy minden mérete egyértelműen az ősi hüvelyk-rendszert tükrözi...

Az általuk leírtakkal kapcsolatban nem tudok, nem is kívánok állást foglalni, csupán egyetlen aggályomat fejezem ki. Míg az újkori méterdefiniciók között mikrométeres eltérések lehetnek, addig ha a fentiek alapján a 31,6 cm-es lábátmérővel számoljuk is a kör területét, az kb. 99,274 cm-re adódik. Bár közelebb van a mai méterhez, mint pl. a yard és a többi említett egység, de mégsem tekinthető egyenlőnek az újkori méterrel, még mindig több mint 7 mm az eltérés! Igaz, lényegesen jobb eredményt kapunk az egykori „egyiptomi pi”-vel, azaz $\sqrt{10} \approx 3,16$ -tal történő szorzással; e szerint 999,3 mm-re jön ki a kör kerülete. A szerző nem említi, hogy a $\sqrt{10}$ -nél jobban közelíti a π -t a szintén az ókorban kedvelt $22/7 \approx 3,1426$ arányt, amit a szerszámgépiparban maig használnak mint kerékfogszám-arányt. Ezzel viszont valamivel rosszabb érték (993,14 mm) adódott volna.

A mérés elméleti és gyakorlati megtervezésére Jean-Charles de Borda vezetésével bizottság alakult, melynek olyan nagynevű tudósok voltak a tagjai, mint pl. Nicolas de Condorcet, Joseph Louis Lagrange, Pierre-Simone de Laplace és Gaspard Monge. Igazán illusztris társaság!

Az első elképzelések között szerepelt a Dunkerque–Perpignan közötti ívszakasz (az ún. Lacaille–Cassini-ív) újramérése, ám végül az Akadémia úgy határozott, hogy a tényleges mérést a párizsi csillagvizsgálón áthaladó délkörnek (mai mérések alapján $2^\circ 20' 14,025''$ E) egy közel tíz szögfoknyi szakaszán végzik el.

A mai, Greenwich áthaladó kezdő délkört az 1884-ben Washingtonban megtartott Nemzetközi Meridián Konferencián fogadták el. Addig sok délkört tekintettek vonatkoztatási hosszúságnak, köztük a párizsit is.

A nemzetközi kereskedelem és áruszállítás körülményeit a fejlődés akkori állapotában nem csak a mértékegységek különbözősége nehezítette, hanem a térképek vonatkoztatási adatainak jelentős eltérése. Ezért csaknem egyidejűleg kötötték meg a nemzetközi kezdőmeridiánra vonatkozó egyezményt, a Nemzetközi Méteregyezményt és az egyezményes koordinált világidőre vonatkozó egyezményt is (amely alapján a vonatkoztatási időpont a greenwichi idő, a GMT.)

A mérésre a délkörnek a Dunkerque és a barcelonai Montjuic dombon levő erőd (Castillo de Montjuic, ma kedvelt turisztikai célpont) közötti szakaszát jelölték ki (kb. 1075 km; $9^\circ 40' 23,89''$). A kijelölt szakasz előnye az volt, hogy a 45° -os szélességi kör mindkét oldalára kiterjedt, és végpontjai a tengerszinthez közeli magasságban voltak. Két, egymástól független mérőexpedíciót szereltek fel 1793-ban. Az egyiket bízták meg a Dunkerque-től Rodezig terjedő táv megméréseével, Jean Baptiste Joseph Delambre vezetésével. A Montjuictól Rodezig terjedő táv meghatározását végző expedíciót Pierre François André Méchain vezette (mindkettőjük csillagász-matematikusként, Delambre történész is; 2. ábra).



2. ábra: Jean Baptiste Joseph Delambre (baloldalt) és Pierre François André Méchain

A 3. ábra térképén a délkör szóban forgó szakaszait a széles sáv ábrázolja, kissé „törtvonalas közelítéssel”. A mérések csillagászati helymeghatározásokból, geodéziai

háromszögelésekből és szabatos szintezésekből álltak. A háromszögelések két nagyon gondosan kimért, hat-hat mérföldes alapvonalát Delambre-ék Melunnál (Párizs közelében), Méchain-ék Perpignannál (a francia–spanyol határ közelében) fektették fel, a háromszögelési hálózatot ezekből kiindulva fejlesztették. Alapmértékül ismét a *toise du Pérou*, ill. annak másolata szolgált. Bár Borda kidolgozott egy kis hőfokfüggésű, kettősfém (platina–sárgaréz) mérőrudat, ami a hőtágulást meghajlással kompenzálta volna, végül nem ezt választották. A háromszögeléshez az akkoriban elképzelhető legpontosabb osztású vízszintes körrel felszerelt speciális, kéttávcsöves műszert használták, amit kifejezetten erre a célra készítettek. A különleges szögmérő teodolitnak nem nevezhető, hiszen függőleges köre nincs.



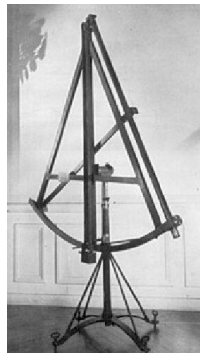
3. ábra: A Párizson áthaladó délkör megmért szakaszának térképvázlata

A mérési elv – némileg leegyszerűsítve – a következő. Az egyik távcsöve a vízszintes körhöz rögzített volt, így az egyik pontra irányzaskor „magával vitte” a skála nullpontját. A másik távcsövel megirányozták azt a pontot, aminek az előző ponthoz képest, a műszer álláspontjához viszonyított szögét meg kellett határozni. Az index segítségével ez a szög közvetlenül leolvasható volt. Ezek a mai szemmel nézve óriási méretű geodéziai műszerek (és a csillagászati helymeghatározásra szolgáló asztronómiai szextánsok is) hatalmas átmérőjű beosztások körökkel voltak felszerelve, mert csak így tudták elérni a kívánt pontosságot és felbontást (4. és 5. ábra).

A szögmérő műszerek tehát ún. ismétlőkörös rendszerűek voltak (az elvet Etienne Lenoir dolgozta ki 1784-ben, majd Borda tökéletesítette). A körök egyébként nem 360 fokok, hanem 400 gonos – inkább újfoknak mondjuk, és a geodéták ma is használják – alaposztással bírtak. Ellentétben a régi *vicc poénjával*, itt bizony a derékszög 100 fok, pontosabban: 100 gon. A gon törtrészeit is természetesen decimális alapon származtatják: centigon [cgon], milligon [mgon].) A modern műszerekben üveggyűrűn helyezkednek el az osztások (sőt, újabban egyenletesen közeli osztások helyett vonalkód) de akkoriban sárgarézbe foglalt, felpolírozott ezüstsávokra ejtették meg a karcokat.

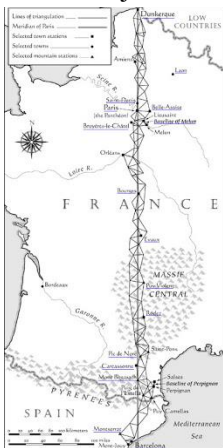


4. ábra: A kéttávcsoves szabatos szögmérő műszer

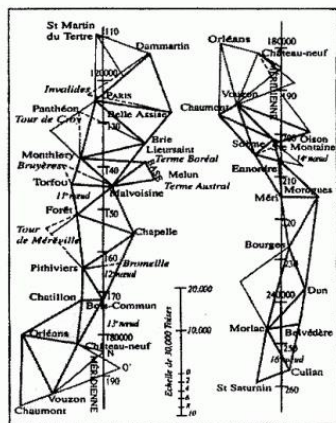


5. ábra: Korabeli szabatos szextáns

A teljes ívszakasz vázlatos hálózatát a 6. ábrán, illusztrációképpen a Dunkerque-től induló háromszögelési hálózat két kapcsolódó részhálózatának tervezetét a 7. ábrán láthatjuk.



6. ábra: A mérendő ívszakasz térkép-vázlata az egyszerűsített háromszögelési hálózattal, amelyen a két alapvonalat (baseline) is feltüntették



7. ábra: A délkeletre övező háromszögelési hálózat Dunkerque-től induló két kapcsolódó szelvényének tervezete

Az expedíciók sok viszontagságot értek meg. A falusi lakosság többször lerombolta Delambre-ék geodéziai jelzőpontjait, mert a fehér jelzőzászlókat királypárti jelképnek vélték – abban az időben ez nem volt éppen életbiztosítás –, följelentették az expedíció tagjait, akiket többször el is fogtak, majd nagy nehezen szabadon engedtek. Végül 1797-ben lettek készen a mérésekkel.

A nehezebb terepet jelentő Pireneusokban Méchain balesetet szenvedett és kórházba került, máskor banditák elől kellett menekülnie, időközben kitört a francia-spanyol háború, Méchain-t bebörtönözték, idegösszeomlást is kapott. Így ők csak 1798 szeptemberében végeztek. Méchain még a börtönben rájött, hogy hibásan mért. Később az 1799-ben hatalomra került Napóleontól kért – és kapott – engedélyt a mérés megismétlésére. Erre azonban nem került sor, mert 1804-ben sárgalázban elhunyt. A mérési jegyzőkönyvei alapján még 1798-ban Delambre korrigálta a számításait. Az 551 584 toise távból Delambre kb. 380 000, Méchain kb. 170 000, toise-nyit mért meg.

Ismét tesztek egy kis kitérőt. Mint látjuk, a métert előkészítő események a francia forradalmat közvetlenül követő alkotmányos monarchia, majd a köztársaság idejére estek. A decimális mértérendszer a Nemzeti Konvent a naptárra és az időmérésre is kiterjesztette, már amennyire az lehetséges volt. Az 1793 és 1805 között bevezetett forradalmi naptárban

a római számokkal jelzett évek az őszi napéjegyenlőség idején kezdődnek, 12 harmincnapos hónapból állnak. 1 hónap 3 tíznapos dekádából, 1 nap 10 decimális órából, 1 óra 100 decimális percből állt. Ehhez persze a másodperc értelmezését is meg kellett változtatni. A fennmaradó 5 nap egy-egy erénynek szentelt ünnepnap. Szökőévenként a 6. nap a forradalom ünnepe volt. 1806. január 1-jei hatállyal Napoleon visszaállította a Gergely-naptár szerinti időszámítást.

A délkeletre övező emlékére 200 évvel később az egyik kezdőpont, a barcelonai erőd négyzet alaprajzú tornyának falán emléktáblát helyeztek el (8. ábra). Odalátogató honfitársaink a Montjuic dombot a Gellért-hegyhez, a rajta levő erődöt a Citadellához szokták hasonlítani. A dunkerque-i kezdőpont a harangtorony (9. ábra), a rodezi végpont az ottani Notre-Dame-katedrális volt.



8. ábra: A Castillo de Montjuic négyzet alakú tornya és a falán elhelyezett emléktábla



9. ábra: A dunkerque-i kezdőpont, a harangtorony

Még a tervezettnél jóval tovább elhúzódo mérések befejezése előtt, 1795-ben elkészült az első ún. „levéltári méter” (*Mètre des Archives*), amelyet a Konvent augusztus elsején fogadott el. Lehet, hogy ebben közrejátszott a forradalmári türelmetlenség? Ez a méterrúd egy sárgaréz-ből való, téglalap keresztmetszetű véglapos mérték volt, mai szóhasználattal akár mérőhasábnak is nevezhetnénk. Ideiglenes alapmértéknek tekintették; a hossza egyébként 443,443 párizsi vonalnak felelt meg. Az etalon hosszának megfelelően 16 db, márványtáblába ágyazott sárgaréz véglapokkal rendelkező métert is készítettek, melyeket 1796-ban, ill. 1797-ben különböző épületek falába építettek be Párizs legforgalmasabb pontjain, hogy bárki által hozzáférhető legyenek. Ezeknél a tábla síkjából, arra merőlegesen kiálló csapok belső, egymás felé néző síkjai közötti távolság testesíti meg az alapmértéket, persze erősen korlátozott pontossággal. A nyilvános méterek segítségével például a korabeli kereskedők, mesteremberek ellenőrizhették a

méterrúdjaikat. A „befalazott méterekből” mára kettő maradt épségben, de csak egy van az eredeti helyén, a Luxembourg palotával szembeni épület árkádjai alatt (10. ábra).



10. ábra: „Befalazott méter” a rue Vaugirard 36. alatti épületen. (Fenn a két végelem, alul a teljes hossz mérték)

Miután mindkét mérőcsapat végrehajtotta a feladatát, a két mérési eredmény összevetése alapján a méter hossza a számítások szerint 443,295936 vonalnak adódott; véglegesen 443,296 vonalnak vették, 13 °R (= 16,25 °C) hőmérsékleten. Ebből következik, hogy egy párizsi vonal 2,256 mm volt. Ez a mérési felbontás akkoriban köznapi életben tökéletesen elegendőnek bizonyult. Még sok műszaki szakember is túlságosnak finomnak találta a milliméteres osztást! Ne feledjük, a 0,1" = 2,54 mm még a hajdani párizsi vonalnál is durvább, de néhány évtizede elterjedt „rasztermérete” volt az elektronikai paneleknek és számos alkatrésznek.

A földfelszín alakja szabálytalan. A leírására ma a világóceán közepes, nyugvó tengerszintjére fektetett geoid szolgál (Johann Benedict Listing, 1878), amely azonban matematikailag nehezen kezelhető. E helyett régóta különböző forgási ellipszoidokkal – ún. földi ellipszoidokkal, sferoidokkal – közelítik ezt a mértani felületet. Az egyes országok olyan ellipszoidot választottak, amely a területükön a legjobban illeszkedett a geoidhoz. Az első használható sferoidot Friedrich Bessel definiálta, és 1841-ben publikálta. Ez szerint a Föld fél nagytengelye (az egyenlítői sugár): $a = 6\,377\,397,155$ m; a fél kistengelye (a forgástengely): $b = 6\,356\,078,963$ m; a lapultság $([a-b]/b)$, $f \approx 1/299,15$.

Bessel sferoidját az 1940-ben közzé tett, és a szovjet fennhatóság alatt álló államokban – így Magyarországon is – a II. világháború után bevezetett Sztjepan Kraszovszkij-féle ellipszoid váltotta fel ($a = 6\,378\,245$ m; $b = 6\,356\,863,019$ m; $f = 1/298,3$).

Ma a Nemzetközi Geodéziai és Geofizikai Unió (IUGG) az 1967-ben publikált GRS 1967 elnevezésű ellipszoidja van érvényben ($a = 6\,378\,160$ m; $b = 6\,356\,774,516$ m; f (vagy α) $\approx 1/298,25$).

A fentiek a földfelszíni geodéziai hálózatok kialakítása során voltak használatosak. A GPS rendszer az ún. WGS84 (World Geodetic System, 1984), geocentrikus forgási ellipszoidot használja ($a = 6\,378\,137$ m; $b = 6\,356\,752,3142$ m; f (vagy α) $\approx 1/298,26$).

A sferoidokat a felmérések során, a számítások egyszerűsítése érdekében, 500 km²-nél kisebb területen belül 6371 km sugarú gömbfelülettel, 50 km²-nél kisebb területen pedig síkfelülettel helyettesíthetjük. Ez azonban kizárólag a szögmérésekre vonatkozik; a magasságmérések (szabatos szintezések) alapfelülete mindig a geoid, hiszen a szintezőműszerek libellája vagy kompenzátora a helyi függővonal normálisát tüzi ki mint vízszintes irányt!

Mindenesetre a Föld lapultsága már a délkörmérési adatok feldolgozása során is problémássá tette az ívhossz értelmezését. Delambre az alábbi másodfokú polinomot javasolta a méter végleges hosszának megállapítására:

$$1\text{ m} = 443,39271 - 27,70019f + 378,694f^2,$$

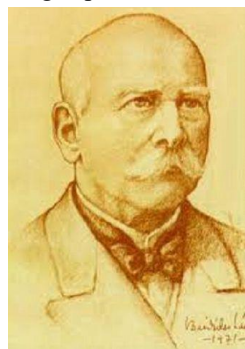
ahol az eredmény párizsi vonalban értendő. A témával foglalkozó matematikusok f -re a legkülönbözőbb értékeket számították ki. Például Legendre $f = 1/148$ értéket állapított meg, amit azonban több tudós helytelennek vélt. A legkülönbözőbb, ennél kisebb f -et javasoltak. Delambre végül a korábbi perui, Bougueren átmenő délkör ívmérési adatainak újrászámolása alapján az $f = 1/308,64$ értéket tartotta helyesnek.

A megállapított alaphosszúságot megtestesítendő újabb, szintén téglalap keresztmetszetű (4×25 mm-es), véglapos méterrúdat rendeltek, immár finomított platinából. Marc Etienne Janety, eredetileg XVI. Lajos ékszerésze, 1795-ben 4 db kilogramm és 4 db méter mértéket gyártott le. Ezek közül egyet-egyet jelöltek 1799-ben arra a célra, hogy etalonként használják. Innentől ezeket illetik általánosságban a levéltári kilogramm, illetve a levéltári méter (*Mètre des Archives*) névvel. A levéltár tulajdonképpen a Köztársasági Archivum. A méterrúdra rávésték a francia forradalom szállóigéjét: *À tous les temps, à tous les peuples* (Minden időkre, minden népek).

Az ezen méterrúddal történt összehasonlító mérések ismétlési pontossága a 10⁻⁵ méter, azaz 0,01 mm nagyságrendjébe esett. Ezzel egyidejűleg több vas (acél) alapanyagú méteretalont is előállítottak. A levéltári etalont, az „ösmétert” máig ott őrzik.

1812-ben Napóleon császár engedélyezte a régi mértékegységek használatát. 1837-től kezdve ismét a méter és a kilogramm lett a hatályos.

Már a mérések megkezdésekor több tudós aggályát fejezte ki a délkörmérés kellő pontosságára, megismételhetőségére vonatkozóan. A mérések az akkori eszközökkel nem hozhatták meg a kívánt eredményt. Évekkel később két neves csillagász-matematikusként, Bessel és Clarke egymástól nagyságrendekkel eltérő hibát határoztak meg, mint a mérések vélhető hibáját. Mások a hibahatárt 10⁻³ m-ben, azaz 1 mm-ben korlátozták. A legújabb mérések szerint az akkor megállapított méter mintegy 0,2 mm-rel rövidebb a délkör negyvenmilliomod részénél, tehát látszólag meglepően jó (lehet, hogy ez csak a véletlen műve), de messze van a kellő pontosságú reprodukálhatóság fogalmától! Ha a mérést a mai legkorszerűbb eszközökkel és módszerekkel ismételné meg valaki, az eredményül kapott hosszúságegység meghatározási bizonytalansága elmaradna az akkori követelményektől is; az aggályok tehát nagyon is megalapozottak voltak...



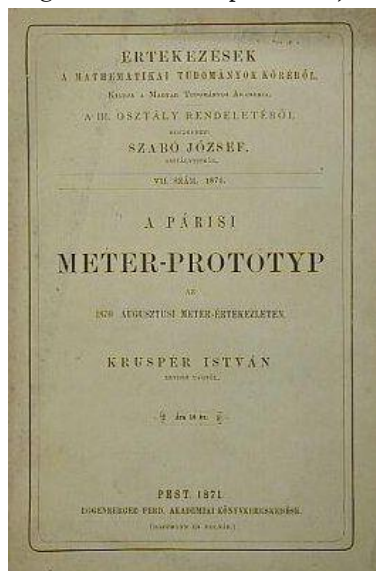
11. ábra: Kruspér István (1818–1905)



12. ábra: Szily Kálmán (1838–1924)

Több évtized elteltével a levéltári méter véglapjain horpadásokat (síktól való eltéréseket) lehetett kimutatni. Kruspér István (11. ábra) – aki akkor már a Királyi József Műegyetem Geodéziai tanszékének vezetője volt, Szily Kálmán fizikussal (12. ábra) együtt, 1870-től részt vett az 1875-ös Nemzetközi Méteregyezmény előkészítő tárgyalásaiban; ld. később –, részletes értekezést írt mind magáról az etalonról (*A párizsi méter-prototyp*, Pest, 1871; 13. ábra), mind a véglapokon tapasztalható, az etalon óvatlan kezeléséből adódó sérülések, mélyedések

megméréséről (*A párisi levéltári méterrúd véglapjain levő mérések megméréséről*, Budapest, 1873).



13. ábra: A párisi meter-prototyp c. füzet borítója

Az előbbiben Kruspér is aggályait fejezi ki a délkörmérés pontosságát, értelmét illetően, véleményét rövid hibaanalízissel alátámasztva. Ugyancsak e műben esik szó a vas – vagyis inkább acél – mérőrudak, így pl. a *toise du Pérou* megbízhatatlanságáról, amit a többszöri hőtágulás/összehúzódási ciklusok után a „molekuláris változásokra” visszavezethető maradó hosszváltozás okoz. Zseniális előre látására vall, hogy a kilogrammetalon tömegének időbeni változatlanlanságát is megkérdőjelezi! Utóbbi kétely mára beigazolódott; a végén erre visszatérünk.

A másodikként említett kiadványban bírálja a sérülések mérésére tett francia kísérleteket, módszereket, és egy speciális, hasított objektívű összehasonlító mikroszkópot javasol azok mélységének megállapítására. (Kruspér értekezéseit, akadémiai felolvasásainak anyagát kisalakú, puha fedelű füzetkékben adták ki, a 13. ábrához hasonló borítótervvel.)

A keletkezése idején a méterrendszer még Franciaországban is megelőzte a korát. Többször is el kellett rendelni a kötelező használatát, utoljára jóval Napóleon száműzetése után, 1837-ben.

1867-ben a párizsi világkiállításon Moritz von Jacobi (aki nem tévesztendő össze testvérével, Carl Gustav Jakob Jacobi matematikussal) Szentpétervári Tudományos Akadémia elnökének kezdeményezésére Méterbizottság alakult, amelyben a Nemzetközi Geodéziai Szövetség is részt vett. A 24 meghívott tagállamot is képviselő bizottság leszögezte, hogy a méterrendszer tökéletesen megfelel a tudomány és a gazdasági élet igényeinek.

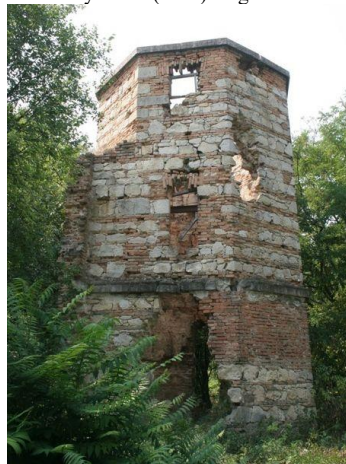
A politikai változások Magyarországot is az új mértékrendszer bevezetésére készítették. 1867 közepén Gorove István kereskedelemügyi miniszter véleményt kért ezzel kapcsolatban a Magyar Tudományos Akadémiától és más szervezetektől, szakértőktől. A véleményezés alapját egy Bécsben kidolgozott javaslat képezte. Ezzel szemben a Kruspér Istvánból, Nendtvich Károlyból, Szily Kálmánból és Schenzl Guidóból álló „négyes bizottmány” saját javaslatot nyújtott be. Ennek pontjaival a Gorove által felkért szakértők szinte mindegyike egyetértett, így a

„tizedes mérték- és súlyrendszer behozataláról” szóló törvényjavaslatot Gorove utódja a miniszteri székben, Szilágyi József, 1870. június 3-án benyújtotta.

A javaslat egyik érdekessége, hogy „szabványos alapmértékül” a Nagy Károly gyűjteményéből származó platina méterrudat ajánlotta. Ezt a 4×25,3 mm keresztmetszetű hosszértéket eredetileg 1844-ben a párizsi Observatoire számára készítette egy párizsi műszerész. Mivel a tudományos intézmény pénz hiányában halogatta az átvételét, az éppen akkor Párizsban járó gyűjtő – aki jó kapcsolatot ápolt francia tudományos körökkel – vásárolta meg, a platina-kilogrammmal és a liter-etallonnal együtt. Nagy világosan látta a decimális mértékegységek előnyét: „[...]a méteri rendszernek kitűnő tulajdonság, hogy előtűnik bármely ellenvetés elenyészik” [4].

A három etalont a szabadságharc során elhurcolták a gyűjtemény több más darabjával együtt, de később a Magyar Tudományos Akadémia birtokába kerültek. Az Akadémia, Nagy Károly eredeti szándékának megfelelően, 1870-ben díjtalanul átengedte az államnak (fent idézett Akadémiai Értesítő). Sajnos, az első világháborúban ezek a relikviák elvesztek.

Nagy Károly (1797–1867) a vegytan és a természettan tudósa, polihisztor, a Kossuth-kormány külügyminiszterének, gróf Batthyány Kázmérnak volt a gazdatisztje. Kellően erős mecénásra talált tehát ahhoz, hogy 1845-ben a Bicske melletti Galagonyáson elkezdje megépíteni magán-csillagvizsgálóját (az eredetileg háromtornyú, háromkupolás épületegyüttes romjai máig láthatók; 14. ábra). A létesítmény 1847-ben lett készen. Akkoriban európai színvonalú felszereltséggel bírt, a műszerek zömmel Bécsben készültek. A csillagvizsgálót vonzó kulturális központtá kívánta tenni. Többször tett ott látogatást két legkedvesebb vendége, Kölcsey és Vörösmarty is. Sajnos, a létesítmény csak 1849-ig működött. '49-ben Nagy Károlyt meghurcolták, és emigrációra kényszerült. A szabadságharc idején leszerelt műszerek, felszerelési tárgyak egy része elkallódott, a szerencsésebbek az ország különböző közgyűjteményeiben kaptak helyet. Néhány eszköz jelenleg a Magyar Műszaki és Közlekedési Múzeumban található meg. Az impozáns, 100 mm körüli átmérőjű refraktorral felszerelt „Nagy meridiánkör” a Kaposvár utcai tanulmánytárban (talán) megtekinthető.



14. ábra: Nagy Károly bicskei obszervatóriumának romja. Az eredetileg háromtornyú, könyvtárral és kiszolgáló helyiségekkel is bíró épületkomplexumból ennyi maradt

A méterrudat és a kilogramm-alapmértéket 1870-ben Párizsba vitték, az „ösmértékekkel” való összehasonlítás céljából. Az összehasonlító mérést (komparálást) Kruspér és Szily végezte. A munkát olyan alaposan, lelkiismeretességgel abszolvárták, hogy a párizsi intézet Kruspért egy értékes, kék mázzal bevont, aranyozott díszítésekkel ellátott porcelán vázával jutalmazta meg. A

visszahozott etalonokat és a hitelesítési okmányokat a Magyar Országos Levéltárban helyezték el.

A kormány értesült arról, hogy az 1867-ben Berlinben ülésezett geodéziai konferencia egy új, európai méter-alapmérték elkészítését javasolta. A végleges mértékek összehasonlítása ui. az akkori eszközökkel a szükséges pontossággal nem volt lehetséges (a mérési bizonytalanság 5...10 μm -re tehető). További gondot jelentett a méterrúd anyagának nagy hőfoktényezője.

Sajnos, a „négyes bizottmány” javaslatának tárgyalására nem került sor, viszont az osztrák törvényjavaslat 1871. július 23-án törvényerőre emelkedett. Az osztrákok akkoriban a bécsi Akadémia ún. Steinheil-féle, üvegből készült méterrúdját – ezt a téglalap keresztmetszetű, mindkét végén lekerekített üveglécet – tekintették alapmértéknek, mert úgy gondolták, hogy szemben a fémekkel, az nem oxidálódik. Hasonló megfontolásból a tömegetalon náluk kvarckristályból volt kimunkálva.

1874. január 26-án ismét benyújtották az eredetihez képest több ponton módosított törvényjavaslatot, hogy az osztrák törvény 1876-os életbelépését megelőzzék. Ebben már kifejezetten a „méter mérték” behozataláról is szó esik. Az 1874. évi VIII. törvénycikk ez év április 20-án emelte jogerőre a méterrendszer bevezetését Magyarországon. Még ebben az évben, Kruspér javaslatára megalakult a Magyar Királyi Állami Központi MértékHITELESÍTŐ Bizottság, amely a szintén ekkor létrehozott mértékHITELESÍTŐ hivatalokat, ill. a korábban komoly önállósággal rendelkező megyei mértékHITELESÍTŐ intézeteket felügyelte. Első igazgatója maga Kruspér lett, aki 16 évig töltötte be a tisztséget.

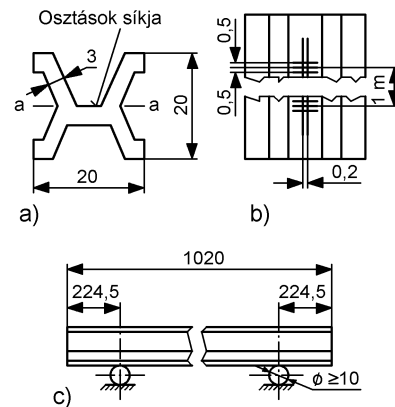
3 A PLATINA-IRÍDIUM MÉTERPROTOTÍPUSOK

A méter általános bevezetésének előkészítésére 1875. május 20-án Párizsban „Nemzetközi Méteregyezmény” készült. A Méteregyezmény az a legrégebben megszületett nemzetközi szerződés, amely ma is érvényes! Ennek ajánlására alakult meg 1889-ben a Nemzetközi Súly- és Mérésügyi Hivatal (Comité International des Poids et Mesures; CIPM). A Méteregyezmény aláírói között ott volt az Osztrák–Magyar Monarchia részéről Apponyi Rudolf párizsi nagykövet. Ezzel jogot szereztünk arra, hogy később birtokoljuk a méter- és a kilogrammetalon egy-egy példányát.

Mint sejthető, ekkoriban a méter fogalmát zavaró kettősség jellemezte: egyrészt a délkör negyvenmilliomod részét, mint vélt természeti állandót jelentette, másrészt a levéltári méterrúd hosszát, mint a fenti geodéziai állandó anyagi megtestesítőjét. Valójában persze a mértékHITELESÍTÉSEKHEZ csak ez utóbbit lehetett felhasználni, ezért a méternek a délkör hosszából történő lezármaztatásától (és a szóba került ismételt délkör-mérésektől is) végleg elálltak, és etalonnak a levéltári méteretalont tekintették, de elhatározták egy újabb, azénál kisebb bizonytalansággal komparálható etalontípus kifejlesztését. Ebben része volt az 1874-es magyar törvényjavaslatnak is. Végül a végleges mérték (*end standard*) helyett végvonalas (*line standard*) konstrukció mellett döntöttek.

Az újabb etalonról – amit számos métertörténeti forrás és mérés-technikai szakirodalom szintén az „ősméter” megnevezéssel illet – érdemes egy kissé részletesebben beszélni. A megtervezését Henri Tresca francia

fizikusnak, a műszaki mechanika elismert tudósának a nevéhez kapcsolják, de a kialakításában szerepe volt Kruspér javaslatainak is. A jellegzetes, „X” keresztmetszetű rúd (15.a ábra) 90% platina és 10% irídium ötvözetéből készült, ami viszonylag kis hőtágulási együtthatóval rendelkezik. A többi, szennyezőnek tekinthető ötvöző aránya egyenként 0,1% vagy az alatti lehetett. A rúd 1020 mm hosszúságú. A métert két, az *a-a* síkra – azaz a semleges síkra – a hossz tengelyre merőlegesen felvitt, 8 μm szélességű fő karcok közötti távolság képviseli. A karcoktól 0,5 mm-re mindkét oldalon egy-egy segédvonalas található. A semleges sík középvonalában – a méterkarcok környezetében igen jó felületminőségűre felfényezett felületdarabokon – egy-egy kettős karc húzódik (a kettős karc vonaltávolsága 0,2 mm). Ezek tűzik ki az etalon tengelyvonalát (15.b ábra).



15. ábra: A platina-irídium méterrúd kialakítása, jellemző méretei, jelkarcai, alátámasztási pontjai

Ez a karcrendszer megkönnyítette a nagy nagyítású mérőmikroszkópokkal felszerelt hosszkomparátor kezelőjének a méretet jelölő karcok egyértelmű azonosítását. Az X-szelvényű méterrúd a legkisebb lehajlást eredményező, szimmetrikusan, egymástól 571 mm-re (tehát a végektől 224,5 mm-re, az ún. Bessel-féle alátámasztási pontokban) elhelyezett 2 db 10 mm (vagy legalább 10 mm) átmérőjű görgővel kellett alátámasztani

A nagy felületű és viszonylag kis keresztmetszetű méterrúd fő előnye a kellő merevségen és az ötvözetre jellemző, viszonylag nagy felületi keménységen kívül az, hogy a környezet hőmérsékletét gyorsan és egyenesen képes átvenni. A hitelesítések során ez a hőmérséklet 0 °C volt. A méteretalonok komparálásának elméleti és gyakorlati kidolgozásában – a komparálás jeges desztillált vízben történt – is nagy szerepe volt Kruspérnak, bár a folyadékban történő mérést Bessel javasolta, és komparátort is konstruált hozzá. (Akkoriban többen foglalkoztak a mérőmikroszkópokon alapuló optikai komparátorok kérdésével.) Kruspérnak a méteretalonok folyadékban történő összehasonlításról írott tanulmánya: *A vonásos hossz-mértékek összehasonlítása folyadékban*, ill. *a A komparátorokról* című (mindkettőt Budapesten adták ki, 1873-ban), amelyben a különböző komparátorok előnyeit, hátrányait is részletezi.

Nem lebecsülendő előnye a bemutatott szelvénynek a téglalap keresztmetszetű mérőrúddal szemben az, hogy a rendkívül drága ötvözetből kevesebbet kellett hozzá felhasználni ahhoz, hogy az inerciája ugyanakkora legyen.

Az etalont Párizs mellett, Sèvres-ben őrizték, egy külön e célra emelt épületben, a Pavillon de Breteuilben, amely ennek következtében nemzetközi státusú intézménnyé vált és területen kívüliséget élvezett. (Ha minden igaz, 1927-ig tárolták itt.) A platina-irídium méterrúd jellegzetes szelvénye a 2006-ban megszűnt Országos Mérésügyi Hivatal jelvényének központi eleme volt (16. ábra).



16. ábra: Az egykori OMH címere

A méter meghatározása akkoriban így hangzott: „Egy méter az a távolság, amely a Párizsi platina-irídium méterrúd két középső osztásának a tengelyvonalak által határolt szakasza között mérhető 0 °C-on, 750 torr nyomáson a fent részletezett alátámasztás mellett”. Ezt a meghatározást 1889-ben az iparilag fejlett államok elfogadták – Anglia és az Egyesült Államok kivételével.

Érdekes adalékok a méterrúdak legyártása körüli nehézségekről. Mindaddig csupán 100 kg platina-irídium ötvözetet sikerült készíteni (George Matthey metallográfus által 1862-ben), de szükségessé vált ennek kiegészítése 250 kg-ra. Ezt Henri Sainte-Claire Deville és J. Henri Debra pótolták. Az ötvözet három hatalmas darabból állt, amelyet 2 kg-os részekre vágtak. Az öntési művelet 1874. május 13-án történt a Conservatoire des Arts et Metiers épületében, Henri Tresca, a fia, Gustav Tresca, George Matthey, Deville és Debray felügyelete alatt. Az eredményül kapott ötvözet 236 kg lett. Az X forma létrehozása közben néhány munkadarab eltört, így összesen 27 méterrúd sikerült elkészíteni. Amikor Deville ellenőrizte az ötvözetek sűrűségét, kiderült, hogy az a vártnál kisebb, mert vas- és ruténiumszennyeződés került bele. Matthey megállapítása szerint a vasszennyeződés az X formák hideghúzása miatt került a méterrúdak anyagába. Ezért felkérték, hogy készítsen két négyzetes méterrúd is. Ezek hidegalakítása már sikerrel járt, és ezzel vált véglegessé az X formájú változat. A rudak X formába való sajtólása 448 órányi időt vett igénybe. 1876 és 1878 között további méteretalonokat készítettek, többek között egy négy méter hosszú darabot is a Nemzetközi Geodéziai Társaság megrendelésére.

1882-ben a francia állam további 30 méterrúdot rendelt (a cég neve akkor már Johnson és Matthey volt). Az ötvözet összetétele: 89,75-90,25% platina; 9,75-10,24% irídium; <0,1% ruténium; <0,1% vas; <0,15% ródium és palládium; <0,02% arany, réz, ezüst, vagy egyéb fém. [5]

A nyersgyártmányokat a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatalban (BIPM) vetették alá a végső megmunkálásnak. A sorszámmal ellátott, a méretjelölések környezetében tükrösített felületű méterrúdakra felvitték a karcokat. Mivel a 6. számú rúd karcátávolsága esett a legközelebb a levéltári méter hosszához – csak 6 µm-rel bizonyult rövidebbnek azénál –, ez lett az elsőrendű, a nemzetközi méteretalon (*metre international*). A többi – a másodrendű etalonokat – az egyezményt elfogadó országok között 1889. szeptember 24-én Párizsban kisorsolták és átadták.

A magyar kormány még 1881. február 3-án egy méteretalont és egy kilogrammetalon rendelt. Ezek értékét utólag 13 278 frankban (6500 akkori forintban) állapították meg.

Érdeklődéssel megemlítem, hogy az USA a 27. számú másolat tulajdonosa lett (17. ábra), bár a köznapok életében máig a tradicionális, nem decimális alapú mértékek vannak használatban. Így a hossz mértékek az inch – col, hüvelyk –, a láb, a yard, a szárazföldi, ill. a tengeri mérföld. Ezek átszámítását a metrikus rendszerre precízen definiálták. E szerint pl. 1" = 25,4 mm, 1 ft = 12", 1 yd = 3 ft = 0,9144 m.



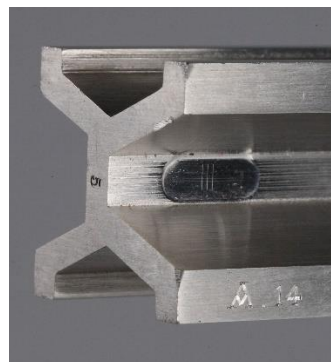
17. ábra: Az USA 27. számú méteretalonjának „B” vége

Az előzőekhez annyit azért hozzáfűzök, hogy a másodperc az USA-ban is másodperc. Azonban az ottani szakírók nem a secundum törvényes SI rövidítést, az s-t használják, hanem a sec-et. Az a baj, hogy ez nálunk is elterjedt: számos népszerű ismeretterjesztő folyóiratban, tudományos folyóiratban, de még néhány PhD dolgozatban is találkoztam ezzel a jelölésmóddal!

Jelen cikk megírása idején az USA-n kívül Libéria és Mianmar (korábban Burma) még nem iktatta törvénybe az SI-t. Mindenesetre az előbbieket tükrében átérzhetjük, hogy micsoda hatalmas vívmánynak számított a decimális mértérendszer! Pedig Simon Stevinus 1584-ben, *De Thiende* című művében már javasolta a mértékegységeknél is a decimális rendszer bevezetését...

4 MAGYARORSZÁG MÉTER-ALAPMÉRTÉKE, A NEMZETI MÉTERETALON

Magyarország a 14. sorszámú méteretalont kapta (18. ábra), amelyet átadás előtt összehasonlítottak a 6. számú párizsi méterrúddal. A nemzeti méteretalon 1,3 µm-rel bizonyult rövidebbnek a nemzetközi etalonnál.



18. ábra: A 14. számú platina-irídium méteretalon „A” jelű vége a karcokkal. (Fotó: Dabasi András, Magyar Nemzeti Múzeum)

A 14. számú méterrúd hivatalosan megállapított hőmérsékletfüggő hossza, azaz a fő karcok közötti távolság m-ben:

$$M_{14} = 1-1,3 \cdot 10^{-6} + 8,646 \cdot 10^{-6} t + 10^{-9} t^2,$$

ahol t a hőmérséklet °C-ban. A függvény jobb oldalának második tagja a nemzetközi etalontól való alapeltérés; ez mindegyik nemzeti etalon esetén más és más. A többi tag azonban az összes példányhoz mellékelt összefüggésben valószínűleg a fentiekkel megegyező. (Bizony, az alapfokú fizikai tananyagokban szereplő, mindannyiunk által ismert fogalom, a lineáris hőtágulási együtthatóval jellemzett hőtágulás nem is annyira lineáris, ráadásul ez a másodfokú függvény is nyilván közelítő pontosságú.) A komparálást először optikai komparátorokkal végezték, amelyekkel pl. a másodrendű etalont az elsőrendűvel lehetett összehasonlítani, 1925-től pedig a Michelson-féle interferométerrel egyedileg mérték meg a karcok távolságát; ld. később.

Egy érdekesség megfigyelhető a képeken: a karcok számára felfényezett felület a 14. számú etalonnál lóversenypálya alakú és a gerinc síkja körülötte alá van munkálva, míg a 27. számú etalon fotóján téglalap alakú felület látszik. Mind a 17., mind a 18. ábrán egy, a véglap

közepébe beütött 5-ös szám is felfedezhető. Ez mindkét végtagon szerepel. Mindegyik etalonrúd végei „A”, ill. „B” betűvel azonosítottak.

1891-től tehát a 14. számú méteretalon került a Nagy Károly által adományozott, 1874 óta alapmértékül szolgáló méterrúd helyére. (Ezt az 1891: VI. tc. rendelte el, mivel a korábbi néven „levéltári” etalon, azaz a „magyar ösméter” már ugyanúgy nem felelt meg a legmagasabb követelményeknek, mint párizsi elődje. Ugyanez vonatkozik természetesen a kilogrammetalonra is.)

A nemzeti méteretalont különleges bánásmódban részesítették. Először a Budapesti Nemzeti Bank pincéjében őrizték egy gyapottal kibélelt, lepecsételt ládában. A gyapotbélés egy hengeres réztokot, az pedig magát a méterrúdat tartalmazó, bársonybélésű tokot rejtette. Az 1907-ben alapított (VIII. tc.) Magyar Királyi Központi Mértékügyi Intézetben két, a nemzeti méteretalonhoz hasonló „használati főmintát” készítettek. Ezekkel ellenőrizték azokat a sárgaréz alapanyagú méterrúdatokat, amelyek alapján a mérőeszközyártók dolgoztak. Az intézet rendelkezett egy ún. Deleuil-féle végtagos sárgaréz minta-méterrel is. Az akkor már Központi Mértékügyi Intézet 1915-ben a berlini Bamberg cégtől 7 db különböző minta-métert, ill. néhány mérőket is rendelt, amelyek segítségével a végtagos hosszértékeket 0,01 mm felbontással lehetett összehasonlítani. Az összehasonlításra a Műegyetemtől vásárolt francia gyártmányú műszert használták. Az egyetemen átalakított műszerrel 1 m-nél kisebb hosszúságot megtestesítő végtagos vagy végvonásos mértékeket is komparálni lehetett.

A Méteregyezményben részt vevő országokban legkülönbözőbb típusú, gyártmányú méteretalonokat használtak például a műszergyártók (harmad-, ill. negyedrendű etalonok).

A II. világháborúban Budapest ostroma során a komparátor a mérőszobával együtt elpusztult, az új, klimatizált labort sokkal később, 1953-ban szerelték fel, már az OMH-ban.

Az ostrom közepette, 1944 december 15-én Adolf Eichmann SS-Sturmbannführer utasítására Budapestről elindítják a rabolt kincseket szállító „aranyvonatot”, amely többek között a magyar méteretalont is magával vitte. Az értékeket az amerikai hadsereg lefoglalta, azokat hadizsákmánynak tekintették. 1946. június 18–25. között Washingtonban a Nagy Ferenc miniszterelnök vezette küldöttség részvételével lefolytatott tárgyaláson döntöttek az MNB aranykészletének, valamint más értékeknek, műkincseknek – és például a méteretalonnak – a visszaadásáról, amit június 21-én ezt az USA külügyminisztériuma hivatalosan is bejelentett. A méterrúd 1946-ban a hadizsákmány egy részével sértetlenül visszaérkezett Budapestre. Megőrzés végett a KMI betétjeként ismét a Nemzeti Bankban helyezték el.

1951-től az intézet Mérésügyi Intézet néven folytatta a munkáját, majd 1952. szeptember 1-jétől az új neve Országos Mérésügyi Hivatal (OMH) lett. Aztán változatlanul a budai Németvölgyi úti telephellyel, de a 260/2006. (XII. 20.) Korm. rendelet alapján 2017. január 1-ig Magyar Kereskedelmi Engedélyezési Hivatal (MKEH) Metrológiai Hatóság volt a megnevezése. Azóta a helyébe jogutódként Budapest Főváros Kormányhivatala (BFKH) Metrológiai és Műszaki Felügyeleti Főosztály

lépett, a jogfolytonosság biztosításával és ugyanazon a telephelyen.

A párizsi elsődleges méteretalonon alapuló meghatározás viszonylag sokáig érvényben maradt, és a többször átkeresztelt mérőlaborban máig elő-előveszik a nemzeti etalon utódját. (1971-ben ez egy Hommel gyártmányú, „H” keresztmetszetű, 428. sorszámmal ellátott méterrúd volt, amit 1982-ben felváltott a szovjet ENyIMSZ márkájú „Invarstabil” méterrúd. Ez esetben a megnevezés egy speciális, 58% nikkelt tartalmazó acélötvözetre utal, amelynél a kristályszerkezet időbeni változásából adódó méretváltozás minimális. A szintén „H” keresztmetszetű rúd semleges síkja végig tükrösített, amelyre 1 m hosszon, 1 mm-es osztással, 6 μ m szélességű karcokat vittek fel. A tengelyvonalat ennél is egy 0,2 mm térközű karc pár tűzi ki, amely végigvonul a teljes hosszban. Ezek a finom vonások szabad szemmel csak megfelelő megvilágítás, „súrlófény” mellett észlelhetők. A 0114-77 számú etalon névleges hibája az 1 m-es hossza vonatkoztatva 0,3 μ m. A „H” egyik felső bordasíkján számozott centiméteres osztás található, megkönnyítendő a főosztások azonosítását (19. ábra).



19. ábra: Az ENyIMSZ milliméterosztásos etalon (Az MKEH-ben fotózta a szerző)

Gyakorlatilag azonos keresztmetszetű és anyagú méteretalonokat több műszergyártó is kínál. Egy szép, angol gyártmányú darab látható a 20. ábrán, amelyen 1 mm-es számozott azonosító osztás figyelhető meg.



20. ábra: Egy H-profilú, milliméter-segédosztásos etalon. (Hilger & Watts, 1948)

A fenti típusú nagy pontosságú hossz mérő skálák paraméterei „szabványosítottak”. A vonatkozó előírásokat az OIML (Organisation Internationale de Métrologie Légale) 1991-ben kiadott R 98 számú, *High-precision line measures of length* című közleménye tartalmazza. (A neten könnyen megtalálható.) Ez a fotókon is látható H keresztmetszetet befoglaló méreteit 25×30 mm-ben szabja meg. Az 58% nikkelt tartalmazó acélötvözet lineáris hőtágulási együtthatóját $11,5 \pm 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ -ben deklarálja, +15...+30 °C környezeti hőmérséklet határok között. A mércéket 5 pontossági osztályba sorolja, az osztások

paraméterei, a maximális eltérések is ettől függenek. A legpontosabb az M osztály.

Az ilyen etalonok mérése szárazon, klimatizált laborban történik, a mércét a készlethez mellékelt görgőkön feltámasztva. A feltámasztás elve kissé hasonló a kéttámaszú híd szerkezetek görgőihöz: az egyik görgőn síklapot alakítottak ki, így az felfekszik a mérőpad vízszintes síkján, elfordulni nem tud. A másik görgő viszont szabadon működhet. Ez a kivitel megelőzi az etalonrúd mérés közbeni elmozdulását. Az etalon oldalán a két alátámasztási helyet megjelölték. A BFKH-ban az összehasonlításokat különböző gyártmányú lézer-interferométerek segítségével végzik.

A platina-irídium nemzeti méteretalon ma is a Főosztály tulajdonában van. Csupán műszaki emlék, múzeumi tárgy, amelyet a Magyar Nemzeti Múzeumban helyeztek letétbe, 1996-ban. Az akkor berendezett állandó kiállításon tekinthető meg, stílszerűen a 14-es teremben (21. ábra; a természetes „Kruspér-váza” is az üvegvitrinben van kiállítva).



21. ábra: Kiállítási vitrin a Nemzeti Múzeum 14. termében. Ebben helyezték el többek között a 14. számú méterrudat (az felső „lépcsőfokon”, külön plexi burkolat alatt) és a „Kruspér-vázát”. (A MNM-ban fotózta a szerző 2016-ban)

A rúdjellegű méteretalonok témájának lezárásaképpen megemlítenek egy valószínűleg egyedi konstrukciójú különlegességet. Amikor a 1930-as években felvetődött a geodéziai távolságmérő eszközök/műszerek több száz méteres etalontávolságokon történő kalibrációjának szükségessége, a szakemberek Budapest közelében kerestek egy alkalmas tereptani, geológiai tulajdonságokkal rendelkező, nem túlságosan feltűnő helyszínt. Végül 1939-ben Máriabesnyőn (ma Gödöllő településrésze), egy felhagyott, „U” nyomvonalú vasúti vágatban találták ezt meg. (Az elkészült vágatba vágányt soha nem fektettek.) E vágat egyik szárába telepítették azt – az összesen névlegesen 864 m-es távolságot megtestesítő – 4 db fő betonpillért, amiken nagyon gondos mérésekkel rögzítették a pontjeleket. Ezeket a méréseket az akkoriban a szabatos távolság-meghatározásokhoz használt invárdótokkal végezték.

Az egyre fokozódó pontossági elvárásoknak megfelelően felvetődött olyan mérőpontok kialakításának szükségessége, amelyek távolságát fényinterferenciás eszközökkel lehet meghatározni, sokkal pontosabban, mint az invárdóttal. Erre a Váisálá (leginkább az élővonalbeli meteorológiai műszereiről, rádiószondáiról ismert) finn cég ilyen célokra

kidolgozott különleges, kevert fényű interferométere és az azzal történő kalibrálás, mint a cég egyik szolgáltatása adta meg az apropót. A lehetőség 1985-ben jutott a magyar szakemberek tudomására, és az újfajta műszerrendszer támasztotta követelmények szerinti új pillérrendszer – amit a vágatban a régivel párhuzamos nyomvonalon telepítettek – 1987-ben elkészült. Az új alapvonal névleges hossza szintén 864 m, de más kiosztásban elhelyezett 6 db pillérrel. A pillérek felső síkján különleges, acél alapú alakzatot képeztek ki a különböző műszerek rögzítésére, ill. a pontjel számára (22., 23. ábra).



22. ábra: A Gödöllői Országos Geodéziai Alapvonal egyik pillére (2021-ben fotózta a szerző)



23. ábra: A pillér felső síkján kiképzett műszerfelfogószerelvények és pontjel (2021-ben fotózta a szerző)

A „0”-s pillér két, egymástól 1 m távolságban levő, az előbbi fotókon látható pontjelet tartalmazó monolit betontömb. Ezen komparálták ui. azokat a speciális méteretalonokat, amiket a Váisálá szakemberei hoztak magukkal. Ezek 23 mm átmérőjű kvarccsövek voltak, amelyek hosszát a cég laboratóriumában 35 nm bizonytalansággal mérték be! Ezekkel a véglapos etalonokkal lehetett a helyszínen úgy kalibrálni a kevert fényű interferométert, hogy teljes távolságot néhány század milliméter bizonytalansággal lehessen megállapítani! A rendkívül gondos előkészítést igénylő, bonyolult méréssorozatot először 1987-ben végezték el, majd 1999-ben megismételték. A két méréssorozat összevetésével bebizonyosodott a mérőpontrendszer rendkívüli stabilitása, úgyhogy az Országos Mérésügyi Hivatal (OMH) a Gödöllői Országos Geodéziai Alapvonalat 2001-ben Országos Geodéziai Hosszetalonná nyilvánította. Sajnos, azóta vandál rongálások prédájává váltak az objektumai annak ellenére, hogy a mérővonal koordinátái, megközelítésének módjai elvileg csak szűk szakmai körökben ismertek. A fenntartó állítása szerint így is használható pl. geodéziai mérőállomások, távmérő műszerek kalibrálására.

5 A BÁRMIKOR „ÚJRATEREMTHETŐ” MÉTER

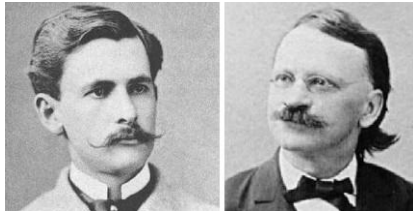
Mind Magyarország, mind az egyezményben szereplő többi ország mérésügyi hivatala meghatározott időközönként Párizsba küldte a nemzeti etalonját ellenőriztetni. Ezen mérések során derültek ki ezekkel a méterrudakkal – és ezzel a méter-meghatározással – kapcsolatos problémák. Egyrészt a karcok leolvasási bizonytalansága 0,2 μm körüli volt, másrészt a platina-irídium ötvözet a lassú kristályszerkezet-változások miatt folyamatosan változtatja a méretét. Például a 14. számú másolat „életében” összesen 3 μm eltérést mértek! (Az összehasonlítási bizonytalanság 10^{-7} nagyságrendben volt.)

Más természetű aggályok is felvetődtek. Mi van, ha az elsőrendű etalon megsérül, eltűnik vagy megsemmisül? (Időközben kitört az I. világháború.) A délkör újramérése az alaposan megnövekedett pontossági igények miatt szóba sem jöhet. Valami olyan természeti állandót kellett találni, amelynek felhasználásával megfelelő laboratóriumi körülmények között bármikor, bárhol előállítható a méter.

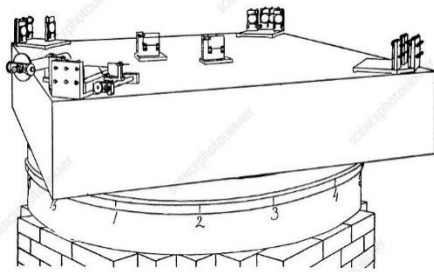
Már viszonylag korán felvetődött az a gondolat, hogy a hosszúságegységet valamilyen módon egy nagyon stabil hullámhosszúságú (fény)sugárzás hullámhosszához kössék. A fény hullámhosszán alapuló definíciót Jacques Babinet javasolta elsőként, 1827-ben. James Clark Maxwell 1859-ben a nátrium sárga színképvonalát

ajánlotta e célra, de a gyakorlati megvalósításhoz nem adott iránymutatást. 1870-ben ezt írta: „Ha a hosszúság, az idő és a tömeg abszolút maradandó etalonjait akarjuk megvalósítani, akkor azokat nem bolygónk mozgásában vagy méreteiben kell keresnünk, hanem az elpusztíthatatlan, megváltoztathatatlan és egymáshoz tökéletesen hasonló molekulák hullámhosszában, rezgési periódusában és abszolút tömegében”.

Az első valóban elfogadott ötlet Albert Abraham Michelson agyából pattant ki. Ő ugyanis – E. Morley-val (24. ábra) – még 1881-ben megalkotta híres interferométerét (a higanyfürdőn úszó négyzetes márványlapra épített műszer vázlatos rajza a 25. ábrán látható), amellyel – Maxwell elvi javaslata alapján – eredetileg az elektromágneses hullámok feltételezett hordozójának, annak a bizonyos rejtélyes „éternek” a létezését (vagy nemlétezését) kívánták igazolni.



24. ábra: A. A. Michelson (baloldalt) és E. Morley



25. ábra: Az első Michelson–Morley-interferométer fekete-fehér fotó alapján készített vázlata

Az éter létét nem sikerült bizonyítaniuk, ám a Michelson-féle interferométerként emlegetett optikai összeállítás máig a hosszsméréstechnikának (és például a gravitációs hullámokkal kapcsolatos fizikai alap kutatásoknak is) nélkülözhetetlen eszköze. Hatalmas tudományos szenzációként, először 2016-ban a Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) -nak hasonló elvű, 4 km karhosszúságú, vákuumban működő interferométerrel sikerült először detektálnia az Albert Einstein megjósolta gravitációs hullámokat! Az éter feltétlen híve volt Hendrik Antoon Lorentz holland fizikus, aki a Michelson-kísérlet negatív eredményét egy általa feltételezett hatással, a Lorentz-kontrakcióval magyarázta (amit tőle függetlenül George FitzGerald írt fizikus is leírt): az interferométer karja az „éterszél” irányában rövidül. Einstein számára az általa nagyra becsült Lorentz elmélete adta az egyik alapot a speciális relativitáselmélet kidolgozásához, ám az már nem egyeztethető össze az éter létezésével. Einstein elmélete szerint külső megfigyelő szemszögéből minden mozgó test az elmozdulás irányában rövidül, minél nagyobb sebességgel mozog, annál nagyobb mértékben. Mindezek dacára az „éter” máig gyakran elhangzik, ill. olvasható a rádióadásokkal kapcsolatban.

A feltalálók interferométere lehetővé tette egy úthossznak – például a platina-irídium etalonok két karca

közötti távolságnak – közvetlen összehasonlítását egy elvben szigorúan egyszínű fénysugárzás hullámhosszával. Ez lehetett az első hosszsméréstechnikai alkalmazása!

Michelson erre a módszerre tett javaslatot 1889-ben. Az 1927-ben megtartott VII. Súly- és Mérésügyi Nemzetközi Konferencia a vörös kadmium hullámhosszát fogadta el erre a célra. Michelson fényforrásként olyan lámpát használt, amely a kadmium vörös hullámhosszán sugároz, azaz bocsát ki fényt. Az alaposan továbbfejlesztett interferométerével és speciális optikai rendszerrel kiegészített kadmium fényforrásával kb. 200 mm-ig tudott interferenciát létrehozni, vagyis ennyi volt a fényforrás koherenciahossza, és ezzel az interferométer mérőkarjának maximális hosszváltozása. Ezzel a műszerrel – több lépésben – hasonlították össze a platina-irídium etalont a vörös Cd hullámhosszával. A mérés eredményeképpen a következő méter-meghatározás született meg: „A méter az a távolság, amely a vörös kadmium hullámhosszának 1 553 165,13-szorosát teszi ki 15 °C-on, 760 torr nyomáson, a levegő 0,03% CO₂ tartalmánál, $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ nehézségi gyorsulás mellett. ($\lambda_{\text{Cd}} = 0,64384696 \mu\text{m}$)”.

A fenti körülmények között végrehajtott mérés bizonytalansága 10^{-8} m nagyságrendben volt. Az alapmértékkel szemben támasztott egyre fokozódó pontossági követelmények miatt ez a meghatározás csak 1960-ig volt érvényben. A kadmiumlámpa magas hőmérsékleten dolgozó fényforrás volt, ráadásul nem adott kellően éles interferenciacsíkokat. Felvetődött többek között egy higany-izotópon alapuló, rádiófrekvenciásan gerjesztett fényforrás is, ám az 1960 októberében, Párizsban megrendezett 11. Súly- és Mérésügyi Nemzetközi Konferencián, az etalonképzési elv megtartása mellett, a Cd helyett a 86-os tömegszámú kripton izotóp sugárzására alapozott meghatározást iktatták törvénybe. A méter ettől kezdve: „a 86-os tömegszámú kripton izotóp $2p_{10}$ és $5d_5$ energiaszintjei közötti hiperfinom átmenetnek megfelelő, narancsszínű sugárzás hullámhosszának ($\lambda_{\text{Kr}} = 0,605\,780\,211 \mu\text{m}$, vákuumban) 1 650 763,73-szorosa”.

Nálunk ezt a meghatározást az 50/1960.XI.18. Korm. rendeletben rögzítették, bár a nemzeti méteretalon – a referenciaetalonokkal való egyszerűbb összehasonlíthatósága miatt – még ez után is használatban maradt. A kriptonsugárzás hullámhosszának állandósága olyan nagymértvűnek bizonyult, hogy még egyes hosszsmérésre szolgáló lézer-interferométerek sugárforrásának hullámhosszát is beépített kripton-interferométer alapján automatikusan helyesbítették.

A métert 10^{-9} pontossággal lehetett a kriptonlámpás interferométerek segítségével reprodukálni. Tulajdonképpen a sugárzás hullámhossza ennél elvben nagyságrendekkel stabilabb, azonban sajnos, egyetlen kriptonatom sugárzását lehetetlen elkülöníteni. Az atomok sokaságának sugárzása viszont nagy spektrumvonal-szélességet okoz, jóval nagyobb, mint a lézereké.

6 A MÉTER MA ÉRVÉNYES DEFINÍCIÓJA

Bay Zoltánt (26. ábra), 1948-ban az Egyesült Államokba menekült világhírű magyar fizikust leginkább az 1946-ban, a Tungsram telephelyéről végzett Föld-Hold-Föld rádióradaros kísérletéről, ill. a fotoelektron-sokszorozójáról ismeri a szakmai közönség, bár több más találmány, szabadalom is fűződik a nevéhez. Éppen a

fotoelektron-sokszorozót felhasználva ő igazolta a legnagyobb pontossággal az energiamegmaradás törvényét. 1965-től a fénysebesség minél pontosabb mérése foglalkoztatta. Az általa kidolgozott újszerű elven, a koherens lézerek hullámok mikrohullámokkal történő elektrooptikai modulációján alapuló mérései (1972) eredményeképpen a fénysebesség értékét az Általános Súly- és Mértékügyi Értekezlet (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM) 15. ülésszaka (1975)

$c = 299\,792\,458$ m/s-ban rögzítette.

A tudós Hold–Föld távolságon végzett mérései 10^{-13} bizonytalansággal igazolták a fénysebességnek Einstein elméleteiből következő állandóságát. Jelenlegi tudásunk szerint a fénysebesség az egyik olyan fizikai állandó, amelynek a bizonytalanságát 0-nak tekintjük.



26. ábra: Bay Zoltán (1900–1992)

Megjegyezzük, hogy a „fénysebesség” túlságosan általános fogalom, érdemes pontosítani. A c közölt értéke elektromágneses síkhullámokra érvényes, vákuumban. Erről a témát érdekes megvilágításba helyező [4]-ben olvashatunk.

A mérhető mennyiségek közül már évtizedek óta az idő az, amit a legnagyobb pontossággal tudunk mérni. A 2013-ban konstruált „optikai rácórak” 300 millió év alatt tévedhetnek 1 s-ot, azaz az ezekkel elérhető bizonytalanság jelenleg már 10^{-20} körüli. Az időmérés akkori pontossága is már 1906-ban Max Planckot, ill. 1961-ben C. H. Townes-t arra vezette, hogy a hosszúság egységét az időből és a fénysebességből mint a természet egyetemes állandójából származtassa. (Míg 1906-ban még a csillagászati mérésekkel helyesbített precíziós obszervatóriumi ingaórák jelentették az időmérés netovábbját, 1961-ben már cézium atomóra is rendelkezésre állt.)

Míg ezek csak elméleti megfontolások voltak, addig Bay a gyakorlati megvalósítást is kipróbálta és leírta. Sajnos, az új mérési módszer részletes leírása csak az USA-beli Nemzeti Szabványügyi Hivatal talán máig kiadatlan, 58 oldalas belső beszámolójában található meg, amit 1965 januárjában készítettek. Később, 1968 és 1972 között a tudós rengeteg közleményben kiállt az egységes, a fény sebességén keresztül összekapcsolt idő- és hosszúságetalon bevezetéséért. Azonban ezt a méltán zseniálisnak nevezhető ötletet a mérésügyi intézetek – Anglia és Japán intézete kivételével – elleneztek. Fizikusok egy csoportja azzal vádolta meg Bayt, hogy a fénysebességet rá akarja erőltetni a méterre. Ellenkezőleg: én a métert akarom ráerőltetni a fénysebességre!” – válaszolta a tudós.

Inkább arról van szó, hogy a fénysebességet és a métert Bay kötötte egymáshoz, a $c = 299\,792\,458$ m/s értéket ő definiálta. Felfoghatjuk úgy is, hogy akkora métert definiált, amelynél a fénysebesség az előbbi értékkel

egyenlő. Korábban a $c = 299\,792\,456,2 \pm 0,0011$ m/s volt érvényes, azaz bizonytalanságot is tartalmazott. A méter és a fénysebesség közötti kapcsolatot a mindennél pontosabban mérhető idő teremti meg.

Az Optical Society 1969 őszén Chicagóban rendezett ülésén is felvetették az új méter-definíció bevezetését. Akkor már csak két ellenjavaslat hangzott el. J. A. Hall egy metánsztabilizált HeNe lézer hullámhosszára, K. M. Baird egy CO₂-lézer hullámhosszára kívánta volna visszavezetni a métert.

A Méter Definíció Tanácsadó Bizottság (CCDM) 1983 októberében Párizsban, a CGPM 17. ülésszakán előterjesztette Bay javaslatát, amit el is fogadtak. Az OMH is javasolta a 8/1976.IV.27. MT rendelet módosítását; nálunk a CGPM definícióját az 1991. évi 45. törvényben rögzítették, október 9-én. A méter 2019-ig érvényben levő meghatározása volt: 1 méter az a távolság, amelyet a fény vákuumban $1/299\,792\,458$ s alatt tesz meg.

A 26. CGPM (2018, érvényes 2019. május 20-tól) szerinti új definíció [8]: „A méter (jele: m) a hosszúság SI-mértékegysége. Definíció szerint a vákuumbeli fénysebesség (c) rögzített számértéke legyen $299\,792\,458$, amely m/s egységben van kifejezve, ahol a másodpercet $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ határozza meg.”

Az előbbi meghatározások szerinti mérés bizonytalansága már csupán legfeljebb 10^{-12} nagyságrendű, egyes kutatók pedig 10^{-20} elérhető bizonytalanságot prognosztizálnak!

A méterrel kapcsolatban a kilón, millin kívül a deci és a centi előtagok is törvényesek. Ez vonatkozik a métert és hatványait tartalmazó származtatott mértékegységekre is.

Bár a fenti meghatározáson alapuló méréshez elvileg bármilyen elektromágneses sugárzás felhasználható, a gyakorlatban olyan atomi és molekuláris átmenetek egy készletét alkalmazzák, amelyek frekvenciáihoz a különféle lézersugárzások állandósíthatók. A hosszúság-kalibrálási feladatok közvetett módszerrel, speciális lézerekkel alapuló műszeregyüttesekkel is megoldhatók, és nem kell mindig a fénysebesség alapján mérő, atomórát is igénylő, rendkívül drága és körülményesen kezelhető berendezésekhez folyamodni, amelyekből jelenleg csak néhány működik a világban.

Hogy milyen eszközökkel és hogyan történtek 2016-ban a legnagyobb pontosságú hosszúságkalibrálások az MKEH-ban, és ezek hogyan vezethetők vissza a Bay-féle definícióra, arról álljon itt egy tömör ismertetés, Tomanyiczka Kálmán nyugalmazott metrológus szíves közlése alapján:

„A $^{127}\text{I}_2$ abszorpciós vonalaira stabilizált He–Ne gázlézer működtetése úgy történik, hogy bekapcsolás után a lézer, mint egy teljesen közönséges He–Ne gázlézer működik, ez a stabilizálatlan állapota. Amikor stabilizált állapotba akarjuk hozni azt, akkor az egyik tükrök mozgásával (piezokerámiára kapcsolt feszültség változtatásával) hangoljuk a lézer frekvenciáját és amikor a kívánt atomi átmenethez érünk (az ún. d, e, f, g, h, i, j vonalak valamelyikéhez) akkor a szabályozó jel harmadik deriváltjának nulla átmenetén kapcsoljuk be a fáziszárt szabályozókört. Ebben a helyzetben az atomi átmenetnek ($E = hf$) megfelelő frekvenciájú fény lép ki 10^{-12} relatív stabilitással.

Ezen nagy pontossággal ismert frekvenciájú fényt heterodin elven, egy féláteresztő tükrön interferáltatjuk az ismeretlen (λ = 633 nm névleges hullámhosszú) lézer fényével. Az interferencia eredménye a két lézer frekvenciakülönbsége. Mivel a frekvenciának nincs előjele, így nem tudjuk megmondani, hogy az nagyobb vagy kisebb-e, mint az etalon frekvenciája. Ezért mind a hét atomi átmeneten megmérjük a frekvenciakülönbséget, és ebből számítjuk ki az ismeretlen frekvenciájú stabilizált lézer aktuális frekvenciáját és annak reciprokát, a hullámhosszát.

Az ellenőrizni kívánt sugárforrás nem csak lézerinterferométer lehet, hanem bármilyen más, $\lambda = 633$ nm hullámhosszúságú stabilizált lézer. Az MKEH-nak jelenleg több lézerinterferométere is van. (A hosszúságmérések területén 1 db HP 5528-cal; 1 db Agilenttel és 1 db Renishaw XL-80-nal rendelkezünk.)

Az előbbieken felsorolt lézerinterferométerek a Doppler-elvet alkalmazzák, azaz közvetlenül a szögprizma mozgási sebességéből származó frekvenciaeltolódást mérik, melynek az idő szerinti első integrálja íródik ki a digitális kijelzőre, mint elmozdulás.

A Bay-féle definícióból az következik, hogy a hosszúság elsődleges etalonja az idő etalonja, mivel a fény terjedési sebességét is definiáltuk, tehát nincs hibája. Ahhoz, hogy a „fény-mérőléce” azaz egy nagypontossággal ismert hullámhosszúságú fényt használhassunk hossz mérésre, arra van szükség, hogy annak periódusidejét közvetlenül meg tudjuk mérni az atomórával mint etalonnal, mert a visszavezetetés csak így teljesül.

A mi esetünkre alkalmazva: a CIPM 1983-as ajánlását követően a CGPM 17. konferenciája „Mise en Pratique”-ban lefektette az ajánlott hullámhosszakat és azok bizonytalanságait a méter gyakorlati megvalósításához. Abban az időben a leggyakrabban a $\lambda = 633$ nm hullámhossz volt használatos, amit egy jódstabilizált gázlézerrel valósítottak meg. Ezen meghatározott hullámhosszakat és bizonytalanságukat a *Consultative Committee for the Definition of the Meter (CCDM)* kiadványában teszik közzé rendszeresen.

Ez azt jelentette, hogy Magyarország (OMFB Pályázattal) 1985-ben vásárolt egy, a méter-definíciót megvalósító és a Mise en Pratique-ot kielégítő $^{127}\text{I}_2$ abszorpciós vonalaira stabilizált, francia gyártmányú He-Ne gázlézert, amely akkor az országos hossz etalon volt. Ma egy modernebb, de ugyanúgy $^{127}\text{I}_2$ abszorpciós vonalaira stabilizált amerikai He-Ne gázlézer a hossz etalon. Ez tehát nem abszolút, hanem összehasonlításos módszer.”

Bay Zoltán az Országos Mérésügyi Hivatal lézeralapú összeállítását 1986-ban láthatta. A Thomson CSF gyártmányú jódstabilizált lézert a hullámhossz-összehasonlítóhoz szükséges optikai rendszerrel a 27. ábrán mutatjuk be.



27. ábra: Thomson gyártmányú jódstabilizált He-Ne lézer. (Az MKEH-ben fotózta a szerző 2016-ban)

Az ellenőrzött lézerinterferométerek segítségével történő, elmozdulásmérésre visszavezetett hosszúságmérések egy nagy Zeiss optikai hossz mérőgépen, mint optikai padon történnek, melynek szájára felszerelték az interferométer szögprizmáját (28. ábra).



28. ábra: Mérési összeállítás a Zeiss hossz mérőgéppel és a HP lézerinterferométerrel. (Az MKEH-ben fotózta a szerző 2016-ban)

Külföldi mérésügyi hatóságok modernebb eszközökkel, ún. fésűgenerátorral (*comb generator*, optikai rásztergenerátor) is rendelkeznek. Ezek a rendkívül bonyolult és drága berendezések femtoszekundumos lézereken alapulnak, amelyek alkalmasak széles frekvenciatartományban (tehát különböző színű) lézerek abszolút módszerrel történő leszármaztatására, frekvenciájuknak megmérésére.

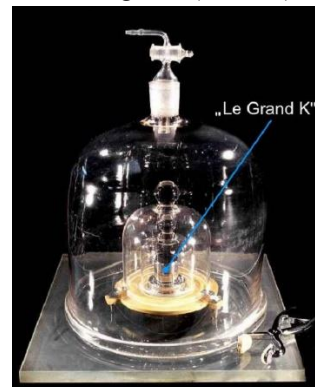
A téma zárásaként helyett álljon itt – másodközlésből – egy, az új méter-meghatározással kapcsolatos furcsaság [6]. Miután az új definíciót bejelentették, egy magyar napilap Csodabogarak rovatában volt olvasható így: „-Párizsból jelentik, hogy ezentúl a méter az a hosszúság, amit a fény 1/299 792 458 másodperc alatt megtesz...”. Nyilván a közreadónak fogalma sem volt a hír tudományos háttéréről és azt valamiféle tréfának vélte...

7 A KILOGRAMMETALON

Jelen írásomban a platina-irídium méteretalon „édestestvéréről”, a kilogrammetalonról is többször esett szó. Érdekesnek tartom kiemelni, hogy míg a hét SI alapegységből hat megnevezése szerint is alapegység, addig a tömegé a „kilo” prefixummal ellátott egység (kg). Holott a CGS mértérendszerben még a gramm (g) volt a tömeg alapegysége, de az MKS-ben és az MKSA-ban is már a kilogrammot definiálták.

A tömeg első nemzetközi etalonja, a *Kilogramme des Archives* platinából készült, 1799-ben rendszeresítették, akár a levéltári métert. Henri Tresca ötlete alapján 1874-ben platina-irídium ötvözetből készítettek el négy darabot, amelyek közül kiválasztották a közelmúltig regnáló kilogrammetalon példányát, az *International Prototype of the Kilogram*-ot (IPK)-t. Emlékezzünk: a végvonásos méter-etaltont is Tresca javasolta, ugyanebből az ötvözetből.

A kilogrammot a legutóbbi időkig ez az 1875 óta használt, az 1889. évben, Párizsban megtartott 1. Általános Súly- és Mértékügyi Értekezlet által a tömeg nemzetközi etalonjának elfogadott, a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatalban, Sèvres-ben őrzött platina-irídium henger tömege képviselte. (Nagyon jó közelítéssel ekkora tömegű egy liter tiszta víz, +4 °C-on.) A gondozói csak „Le Grand K”-ként emlegették (29. ábra).

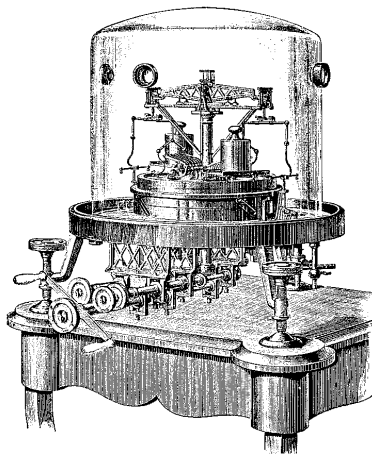


29. ábra: „Le Grand K”, hármás üvegbúrában

Kiviteli formája egy kb. Ø39×39 mm-es, lekerekített élű, tükrösített felületű henger. Mivel az elsőrendű etalon pótolhatatlan volt, rendkívül gondos bánásmódban részesítették, mind magának az etalonnak, mind az azt kezelhetővé tevő speciális fogónak a tisztítására bonyolult procedúrát írtak elő. Az elmondottak a másodrendű,

nemzeti etalonokra is érvényesek (Magyarország a 16-os számút birtokolja), de itt nem térek ki erre. Csupán a tárolására hívom fel a figyelmet: a különleges tartóba állított etalonhengert egy belső üvegbúra takarja. Az egészet egy külső üvegbúra veszi körül. Ezt a tárolási módot is az 1889-es konferencián rögzítették. Később egy harmadik üvegbúra is került a „Le Grand K”-ra (ahogyan az a 29. ábrán látszik). Az alap-kilogrammot igen ritkán vették használatba. Egy trezorban őrizték, aminek a kinyitásához három kulcs kellett, mindegyikkel egy-egy munkatárs rendelkezett.

Sajnos, mindezek ellenére a metrológusok arra a következtetésre jutottak, hogy a Sèvres-i henger az elfogadása óta lassan mintegy 50 μg -ot veszített a tömegéből, az utóbbi években pedig mintegy 100 μg -ot „hízott”, különböző felületi rétegek kialakulása miatt! Ezek az értékek az elsőrendű etalonnak a nemzeti etalonokkal történt rendszeres összehasonlítása során, bonyolult számítások eredményeképpen adódtak. Érdekes, hogy a nemzeti etalonok esetében nem tapasztaltak ilyen mérvű tömegváltozást. Látható, hogy a „Le Grand K” tömegváltozásai 10^{-6} - 10^{-7} nagyságrendbe esnek. Néhány etalontömeg értékváltozásáról érdekes diagramokat közölnek [7].



30. ábra: Kruspér vákuum-mérlege. (A Pallas nagy lexikonából)

Krupér a kilogramm-alapmértékkel kapcsolatban is jeleskedett. Egy olyan, a kilogrammetalonok komparálására szolgáló, manipulátorokkal kívülről kezelhető, szimmetrikus kétkarú vákuummérleget tervezett, aminek az érzékenysége, 1-1 kg-os tömegekkel terhelve, 1 μg -ra tehető (30. ábra).

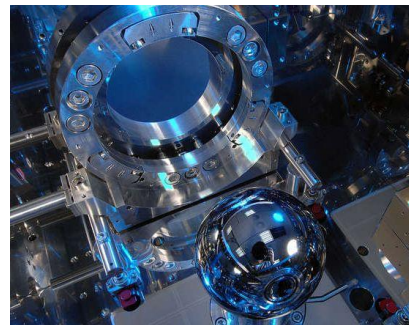
A Gauss-féle tömegcserét is lehetővé tevő szuperprecíz – akkori szóhasználatlalt szigorú – mérleget egy bizonyos Nemetz bécsi műszerész készítette el, aki aztán gyártotta és forgalmazta is. Árjegyzékében 5000 forintért kínálta a „Krupér-féle üresterű mérleget”. Krupér ezzel a tömegkomparátorral elnyerte az 1885-ös antwerpeni világkiállítás aranyérmét. Egy korszerű, szub-mikrogrammos vákuumos tömegkomparátort láthatunk a 31. ábrán.

A legutóbbi időkig tehát a tömeget nem sikerült a méteréhez hasonlóan, laboratóriumi körülmények között előállítható, reprodukálható formában valamilyen természeti állandóból levezetni, bár az ezzel kapcsolatos kutatások folytak.



31. ábra: Korszerű vákuumos tömegkomparátor (Mettler Toledo)

Egyes kutatók adott számú szénatom tömegét definiálták volna kilogrammként, néhány éve pedig a Peter Becker vezette Német Szövetségi Intézet Fizikai és Műszaki Bizottságának kutatásaiban egy 100 mm átmérőjű monokristályos szilíciumgömb atomjainak számából származtatták volna le a tömegegységet, de ez a módszer (sem) emelkedett törvényerőre. Annak kritériuma ui. az lett volna, hogy az Avogadro-állandó meghatározási bizonytalanságát $2,0 \cdot 10^{-8}$ alá vigyék, ami ez ideig nem sikerült. (Több kutató csak 2018-ra datálta a szilícium-tömegetalon elfogadását. Egy néhány évvel azelőtti kísérleti példány látható a 32. ábrán.)



32. ábra: Etalonnak szánt szilíciumgömb (Leibniz Institute Berlin)

Ezzel kapcsolatban érdemes megemlíteni, hogy kemény anyagokból viszonylag egyszerű technológiával, de rengeteg, speciális érzéket is megkívánó kézi munkával gyárthatók rendkívüli geometriai és méretpontosságú gömbök. Jól példázza ezt a Gravity Probe B, 2004-ben felbocsátott műhold szuperprecíz giroszkópja, ami nem más, mint egy néhány atomnyi pontossággal – ez mintegy 10 nm-es alakhibát jelent – megmunkált, 38 mm átmérőjű olvasztott kvarcgolyó. A golyót néhány atomnyi vastagságú nióbiumréteggel vonták be. A 2 K hőmérsékletű szuperfolyékony héliumban pörgő gömb elmozdulását interferométerrel mérték. Einstein szerint a gravitáció egyik hatása a téridő görbítése, amely pl. a Föld tömegének hatására is fel kell hogy lépjen. A műhold giroszkópos mérései ezt 10^{-4} bizonytalansággal igazolták. A golyó megmunkálásának végső fázisát a <https://einstein.stanford.edu/Media/Gyro-polishing-flash.html> videón megtekinthetjük.

Azóta lényeges előrelépés történt a kilogrammetalon ügyében is: elmondhatjuk, hogy a „Le Grand K” végleg nyugalományaiba vonult. 2018 novemberében fogadták el többek között a kilogramm új definícióját Versailles-ban az Általános Súly- és Mértékügyi Konferencián. Ezen a konferencián egyhangúlag szavazták meg az SI (Système International d'Unités) mértékegységrendszer teljes

revízióját. Az SI alapegységeinek – a méter, a kilogramm, a kelvin, a másodperc, az amper, a kandela és a mól – újradefiniálását követően az új szabályzat 2019. május 20-tól érvényes. Ez biztosítja, hogy a mértékegységrendszer hosszú távon stabil és konzisztens legyen.

A kilogramm új etalonképzése végül is nem az említett előzetes elképzelések, kísérletek mentén történt, tehát a modern kilogramm ugyanúgy nem egy megtestesült objektum, mint a méter, ill. mint az SI többi alapegysége. Talán ez a legjelentősebb változás az SI történetében! A kilogramm modern definíciója a Planck-állandóhoz, a kvantummechanika egyik alapvető állandójához kötött, amelynek elfogadott értéke: $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, (másképpen Js), amit hasonló logika mentén rögzítettek, mint a méterdefiníció kapcsán említett fénysebességet.

A komparálás vákuumban dolgozó elektrodinamikus árammérlegen – ún. Kibble-mérlegen – alapuló berendezéssel történik, dinamikus módszerrel, az $U \cdot I = m \cdot g \cdot v$ összefüggés alapján, lényegében a tehetetlen és súlyos tömeg ekvivalenciáját kihasználva. (A korábbi Watt-mérleg elnevezést is ez az összefüggés inspirálta. A mérési elvet Bryan Kibble fizikus javasolta.) A különleges felépítésű, de végső soron élagyazású kétkarú mérleggel történő összehasonlítás során az egyenletben szereplő állandókat az elérhető legnagyobb pontossággal mérik, ill. állítják be. Például a feszültség és az elektrodinamikus rendszert gerjesztő áram közvetetten Josephson-feszültségétalonból származik, a helyi gravitációs állandót hatalmas tömegű, különlegesen pontos abszolút graviméterrel, a karok sebességét és elmozdulását lézer-interferométerrel mérik. A mágneskör és a tekercs kialakítása is rendkívüli gondossággal, precizitással történt. A mechanikus beállítások nem kevésbé pontosak, a mérlegkart egy kör alakú, élagyazású tárcsával helyettesítették.

Az elektrodinamikus rendszer az egyik mérlegkart periodikusan mozgatja mintegy csúcsról csúcsig 15 mm-es amplitúdóval, 1 mm/s közepes sebességgel. A mérendő tömeg is itt van elhelyezve. A másik karon egy kiegyensúlyozó tömeg függ [9]. Léteznek ettől eltérő elrendezések is. A vázolt elv a sebességmérlegé, de létezik az árammérleg működéséhez közelebb álló, statikus működésmód, az ún. erőmérleg.

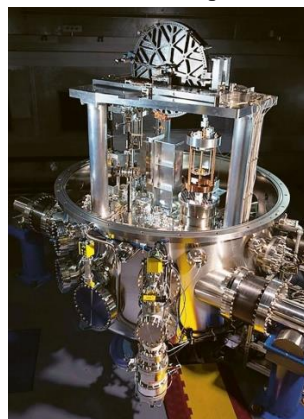
Stephan Schlamminger, amerikai fizikus, a precíziós mérések szakértője, az első megvalósított Kibble-mérleg egyik tervezője mondta: „Egészen addig, amíg a kilogrammot egy tárgyhöz mértük, nem sikerült a tömegmérést időállóvá tenni. Nincs ugyanis olyan emberi kéz alkotta tárgy, amely ne változna, de a Planck-állandó, legalábbis a mai ismereteink szerint, örök.”

Azért az ember olyan, hogy szereti látni a tényleges kilogrammot is (lásd a cikk elején idézett maliciózus megállapításokat), amit végül az említett szilíciumgolyó testesít meg, és a legtöbb hitelesítési feladat során egyszerűbben használható, mint a Planck-állandón alapuló bonyolult, kényes készülék. A szilíciumgömb üvegbúrába helyezett eredeti példánya a 33. ábrán látható, amit Münchenben, a német állami mérésügyi intézetben, a Physikalisch-Technische Bundesanstaltban (PTB-ben) őriznek.

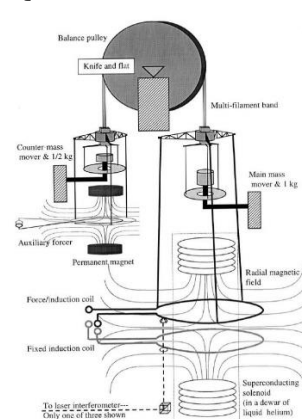


33. ábra: A kilogramm új, megtestesült formája: a szilíciumgömb

Egy Kibble-mérleget csodálhatunk meg a 34. ábrán, a 35. ábra pedig az egyik konstrukció erősen leegyszerűsített szerkezeti vázlatát szemlélteti. Idő közben jelentősen eltérő konstrukciójú társai is épültek. Olyan elképzeléssel is találkoztam a neten, amelyben a két terhelőág között nem egy mechanika, hanem hidraulikus erőátvitel létesít kapcsolatot [10].



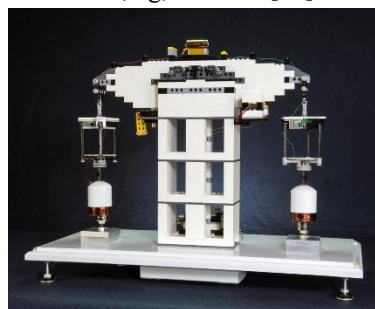
34. ábra: Egy Kibble-mérleg, a vákuumzáró búra eltávolítva. Nem éppen egyszerű szerkezet! [1]



35. ábra: A Kibble-mérleg működési vázlat

Nem kevésbé meghökkentő a „hagyományos” Kibble-mérlegek szabálytalan elmozdulásainak csökkentése érdekében kidolgozott, leginkább a régi, sokcsuklós konyhamérlegekhez hasonló konstrukció [11].

Ám még ezeknél is meghökkentőbb lehet sokunknak: a LEGO elemek felhasználásával kifejlesztett, elemekből összerakható demonstrációs asztali Kibble-mérleg (36. ábra). Bár pontossága szerény, mindkét működési elvet jól demonstrálja. Legfeljebb 20 g-os tömegeket képes kezelni, a felbontása 0,2 g, azaz 1% [12].



36. ábra: A LEGO-elemeken alapuló Kibble-mérleg. A pontossága erősen korlátozott, de az elvet képes demonstrálni

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Végül köszönetet mondok a volt MKEH munkatársainak, Kőszegi József akkori főosztályvezető-helyettesnek és Tomanyiczka Kálmán metrológusnak a rengeteg hasznos információért, és hogy lehetővé tették számomra az intézmény hossz mérő laboratóriumában való fényképezést (2016-ban történt). Igazi élmény volt! Szintén megköszönöm a Magyar Nemzeti Múzeum munkatársainak, dr. Tomka Gábor főigazgató-helyettesnek és dr. Ridovics Anna művészettörténésznek a kért fotók rendelkezésemre bocsátását.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Simonyi M. (2019). A kilogramm detronizálása – Búcsú egy etalontól, *Természet Világa*, 150 (5)
<https://www.termvil.hu/2019/09/12/bucusu-egy-etaltontol/>
- [2] http://www.agt.bme.hu/tantargyak/felso_geodezia/fg3.pdf
- [3] Borbola J. (2009). A Szent Korona és a méter, *Ősi Gyökér*, 27(4), 2-35.
https://epa.oszk.hu/02300/02387/00014/pdf/%C5%90si%20Gy%C3%B6k%C3%A9r_2009_4_002-035.pdf
- [4] Ván Péter: Mennyire állandó a fény sebessége?; A Bay Zoltán 120 emlékkonferencia előadásainak ismertető kiadványa (Bay Zoltán Tudomány és Technikatörténeti Alapítvány, 2021)
<https://hu.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9ter>
- [5] <https://hu.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9ter>
- [6] Mérés és Automatika 1984/4.
- [7] Abbott, P., Kubarych, Z., Jarrett, D., & Elmquist, R. (2019). The units for mass, voltage, resistance, and current in the SI, S. Schlamminger. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 637. https://www.researchgate.net/figure/Top-Mass-values-of-four-official-copies-of-the-kilogram-kept-at-the-BIPM-as-a-function_fig1_333451790
- [8] <https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/26-2018/resolution-1>
- [9] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Kibble-m%C3%A9rleg>
- [10] <https://www.semanticscholar.org/paper/The-MSL-Kibble-Balance-Weighing-Mode-Sutton-Clarkson/52d2e41df73cfd92b26a1776e0d641bfb9b02b8/figure/0>
- [11] <https://epjtechniquesandinstrumentation.springeropen.com/articles/10.1140/epji/s40485-022-00080-3>
- [12] Chao, L. S., Schlamminger, S., Newell, D. B., Pratt, J. R., Seifert, F., Zhang, X., ... & Haddad, D. (2015). A LEGO Watt balance: An apparatus to determine a mass based on the new SI. *American Journal of Physics*, 83(11), 913-922.
- [13] Regőczy, E. (1942). A gödöllői országos összehasonlító alapvonal; magánkiadás.
- [14] Kääriäinen, J. et al. (1988). The Gödöllő Standard Baseline, Helsinki.
- [15] Jokela J. (2001). Remeasurement of the Gödöllő Standard Baseline, Kirkkonummi.
- [16] Ván, P (2021). Mennyire állandó a fény sebessége?, A Bay Zoltán 120 emlékkonferencia előadásainak ismertető kiadványa, Bay Zoltán Tudomány és Technikatörténeti Alapítvány.
- [17] Makkai, L. (szerk.) (1959). Fejezetek a magyar mérésügy történetéből, Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó.
- [18] Rédey, I. (1966). A geodézia története, Tankönyvkiadó.
- [19] Fehér, I., dr. Horváth, Á. (1963). A fizika és a haladás I., Tankönyvkiadó.
- [20] Tisza, S., Tökés, Sz (1968). Mérés és Automatika, 1968/7., p. 319
- [21] Dr. Petrik, F. (1984) Mérés és Automatika, 198/4. p. 148.
- [22] Dr. Bölöni, P. (1984). A méter ötödik definíciója és ennek hatása..., *Mérésügyi Közlemények*, 1984/4., p. 87.
- [23] Dr. Fodor, Gy. (1990). Mértékegység-lexikon, Műszaki Könyvkiadó.
- [24] Wagner, F. S. (1994). Bay Zoltán atomfizikus, az úrkutatás úttörője, Akadémiai Kiadó.
- [25] Kovács, G. (szerk) (1996). További fejezetek a magyar mérésügy történetéből, OMH.
- [26] Quinn, T. J. (1997). A Nemzetközi Mértékegység-rendszer alapegységei, azok pontossága, leszámaztatása és a nemzetközi visszavezethetőség (II.), *Mérésügyi Közlemények*, 1997/2.
- [27] Dr. Pataki, P. (2000). Metrológiai rendszerek, Elektrotechnika, 2000/10.

Az új SI megvalósítása

Realization of the new SI

Szűcs László, Nagyné Szilágyi Zsófia

Budapest Főváros Kormányhivatala, Metrológiai és Műszaki Felügyeleti Főosztály

szucs.laszlo@bfkh.gov.hu, nagyne.szilagyi.zsofia@bfkh.gov.hu

Összefoglalás — 2019. május 20-a óta megváltozott a SI (International System of Units) alapegységeinek definíciója. Az új meghatározások egyes mértékegységeknél csak megfogalmazásban különböznek a régivel, másoknál az előzőtől alapvetően eltérő fizikai elvek kerültek előtérbe. A cél egy invariáns, alapvető természeti állandókon nyugvó mértékegységrendszer megalkotása volt. Az új definíciókat számos publikáció tárgyalta, a jelen összefoglaló az új definíciók gyakorlatban történő megvalósításának bemutatását tűzte ki céljául.

Kulcsszavak: SI, megvalósítás, másodperc, méter, kilogramm, kelvin, amper, mól, kandela, etalon,

Abstract — The definition of the base units of the SI (International System of Units) has changed since May 20, 2019. The new definitions differ from the old ones only in wording for some units, while for others, fundamentally different physical principles have come to the fore. The goal was to create an invariant system of units based on fundamental natural constants. The new definitions have been discussed in numerous publications, and this summary aims to review the implement the new definitions in practice.

Keywords: SI, realization, second, metre, kilogram, kelvin, ampere, mole, candela, Kibble balance, Watt balance, IPK, standard

1 BEVEZETÉS

2018. november 16-án Versailles-ban a világ nemzeti metrológiai intézeteinek képviselői szavaztak és döntöttek a Nemzetközi Mértékegységrendszer (SI) megújításáról. Az új definíciók 2019. május 20-án, a Metrológiai Világnapon (egyben a Méteregyezmény létrejöttének évfordulóján) léptek életbe.

A megújult definíciókat számos publikáció tartalmazza, metrológiai szempontból a BIPM SI – BROCHURE 9. [1] kiadása mérvadó (a legutolsó verzió 2024-ben került kiadásra). Magyarországi bevezetését kormányrendelet írta elő [2].

1.1 Az SI evolúciója

Az SI mértékegységrendszer létrehozásáról a Méteregyezmény legfelsőbb döntéshozó testülete, a General Conference on Weights and Measures (CGPM) 11. ülése döntött 1960-ban. A cél egy koherens és egységes rendszer létrehozása volt, 6 alapegység definíciójával. A definiált mértékegységek a méter, a kilogramm, a másodperc, az amper, a kelvin és a kandela voltak. 1971-ben a 14. CGPM ülés határozata az alapegységek közé sorolta a mól is, hétre bővítve az alapegységek számát.

Az 1960-as SI alapdefiníciók között a méter alapja már nem az 1889-es fizikailag létező platina-irídium „ösméterrúd” volt, hanem a ^{86}Kr -atom két elektronpályája közötti átmenet hullámhosszának a többszöröse. Gyakorlatilag csak a tömeg etalonja, az *International Prototype of the Kilogram* (IPK) maradt az egyetlen mesterségesen létrehozott műtárgy (a már említett platina-irídium).

A tudomány és technika fejlődése során az alapegységek definíciója és azok megvalósítását jelentő etalonok egyre inkább a mikrovilág és a kvantumeffektusok alkalmazása felé tolódott. Az új definíciók már kvantumeffektusokon alapulnak (a kandela kivételével).

Az új SI definíció számos változtatást hozott az előző rendszerhez képest:

- Nincs többé mesterséges műtárgy, amely egy adott mértékegységet megvalósítana (az utolsó az IPK volt).
- Minden mértékegység egy invariáns természeti állandóhoz lett csatolva (a kandela kivételével). Ez azt jelenti, hogy a következő években ezen természeti állandók értékei változatlanok lesznek, bizonytalanság nélkül! A fixált állandók értékei addig maradnak változatlanok, amíg a technika fejlődése nem indokolja, hogy egy, a mainál pontosabb érték cserélje fel a definícióban megadott adatokat.
- A mértékegység definíciók a Föld tetszőleges pontján bármikor és bárki által megvalósítható.
- A megvalósítás technikai kivitelezésére (fizikai háttér) több módszer is lehetséges, egyedül a másodperc az, ami kimondottan egy atomhoz, a ^{133}Cs -hoz van kapcsolva.
- A mértékegységek értékének megvalósítása széles skálán változik és nem egy számértékhez köthető (mint pl. korábban csak a víz hőmérséklete).
- Megváltozott a mértékegységek egymás közti hierarchiája. Az elsődleges a másodperc, amely a legkisebb bizonytalansággal valósítható meg.
- Az eddig csak technikai mértékegységként kezelt mól önálló, valódi mértékegységgé vált.

A következő fejezetekben a teljesség igénye nélkül kerülnek bemutatásra a megvalósítási lehetőségek.

2 A MÁSODPERC

A másodperc hivatalos definícióját az [1] adja meg, a magyar honosított verziót a 127/1991. (X.9.) Korm. rendelet [2] 1. melléklete tartalmazza: „Az idő mértékegysége a másodperc; jele: s. Definíció szerint a

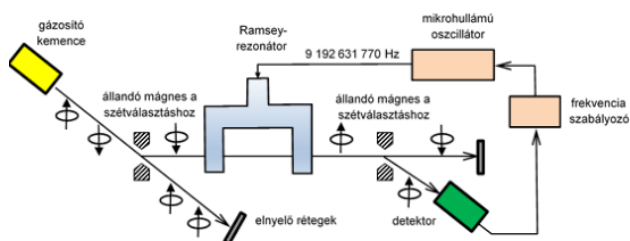
cézium-133 atom $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ perturbálatlan alapállapotú hiperfinom átmeneti frekvenciájának rögzített számértéke legyen 9 192 631 770, amely Hz egységben van kifejezve, ami megegyezik a s^{-1} -nel”.

A definíció alapvetően nem változott a CGPM 13. ülésén megfogalmazottól (1967) [3], csupán a megfogalmazás egységesítése miatt került átdolgozásra. A mértékegység megvalósítása egy evolúciós folyamaton ment át, noha a ^{133}Cs atomhoz való csatolás a mai napig megmaradt.

2.1 Az atomóra

A mértékegység megvalósítása az ún. „atomóra”, amelynek működése a Stern–Gerlach-effektuson [4] alapszik. A ^{133}Cs atom legkülső elektronhéján csak egy elektron van. Ennek az elektronnak a spinje határozza meg az atom mágneses momentumát. Mint a kvantummechanikából ismert, ennek két állapota lehetséges, amelyek közötti átmeneti frekvencia 9 192 631 770 Hz. Egy gázosító kemencéből a cézium-atomnyaláb egy inhomogén mágneses téren halad keresztül, a külső elektronjuk pillanatnyi spinjétől függően két nyalábra válik szét.

Az eltérített nyaláb atomjai egy mikrohullámú rezonátoron (Ramsey-rezonátor) haladnak keresztül, amelyben egy mikrohullámú generátor az átmeneti frekvencián (annak közelében) szabályozható frekvenciájú elektromágneses sugárzást tart fenn. Rezonancia esetén az atomok külső elektronjának spinállapota megváltozik (átbillen). Az atomnyaláb egy újabb inhomogén mágneses téren való áthaladásakor ismét két részre válik. A spinorientációt megváltoztatott atomokat egy detektor érzékeli. Ha a nyaláb intenzitása csökken, a vezérlőegység megváltoztatja a rezonátorban lévő elektromágneses sugárzás frekvenciáját úgy, hogy a nyaláb intenzitása a maximum legyen (negatív visszacsatolás). Ez a frekvencia (Hz-ben megadva) a másodperc alapja [5]. A fenti folyamatot szemlélteti az 1. ábra.



1. ábra: Az atomóra sematikus vázlata

A világ első céziumrezonancián alapuló atomóráját, etalonját Louis Essen és társai helyezték üzembe a National Physical Laboratoryban, Teddingtonban, 1955 júniusában [6]. A céziumrezonancia sáv szélessége 340 Hz volt, ami 10^{-9} pontosságot tett lehetővé. Az atomórák számos nemzeti metrológiai intézetben megtalálhatók, kereskedelmi forgalomban megvásárolhatók. Közülük a legpontosabbak (speciális kialakításúak) elérik az $5 \cdot 10^{-15}$ pontosságot [7], bár a spinállapot-kiválasztó mágneseket már lézerek helyettesítik. Ehhez a pontossághoz 62 Hz-es rezonancia-sáv szélesség tartozik.

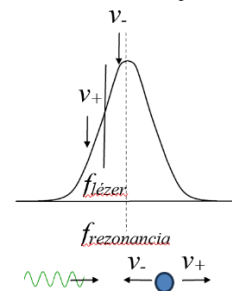
2.2 A „Cesium Fountain” frekvenciaetalonok

Zacharias már az 1950-es években javasolt egy olyan új elrendezést, amikor a céziumnyaláb függőleges irányba hagyná el a gázosító kemencét, áthaladna a mikrohullámú

rezonátoron (csak egy ág), azután a gravitáció hatására lelassulna, megállna, majd visszafelé estében haladna át ismét a rezonátoron. Ez az elrendezés csak a viszonylag kis kezdősebességgel rendelkező atomok esetében működik, a lassú atomokat a jóval nagyobb sebességű atomok kiszorítják a nyalábból (a céziumatomok átlagsebessége szobahőmérsékleten kb. 130 m/s), így akkor ez a berendezés nem működött. Forradalmi változás akkor következett be, amikor 1975-ben Dave Wineland és társai, valamint T. W. Hänsch kidolgozták az atomok lézeres hűtésének elvét [8][9]. Az elméleti háttérrel számos irodalom olvasható [10].

2.2.1 A lézeres hűtés elve

A lézeres hűtés a Doppler-effektuson alapszik. Egy gázatom elektronhéjának gerjesztése a két elektronnívó közti energiakülönbségnek megfelelő lézersugárzással lehetséges. Ha a lézerfény frekvenciája megfelelő, az atomokkal való kölcsönhatás során az atomok elnyelik a fotonokat, majd legerjesztődnek és az átmenetnek megfelelő energiájú foton kibocsátják.



2. ábra: Doppler-effektus foton atomon történő szórásánál

Az egyszerűség kedvéért egydimenziós esetet feltételezve, a 2. ábra alsó részén látható a lézernyalábot jelképező hullámalak, amellyel szemben, vagy vele egy irányban mozog egy gázatom. A lézer frekvenciája az atom valamely rezonanciafrekvenciája alá van hangolva, önmagában kis valószínűséggel gerjeszti az atomot. A vele szemben mozgó (v_-) atom számára a Doppler-effektus miatt a lézer frekvenciája magasabbnak látszik. Ekkor nagy valószínűséggel az atom elnyeli a foton és felgerjesztődik. Mivel szemben mentek, az impulzusmegmaradás miatt az atom sebessége csökkenni fog. A lézer irányában haladó atom (v_+) számára a Doppler-effektus miatt a foton frekvenciája még távolabbra kerül a rezonanciától.

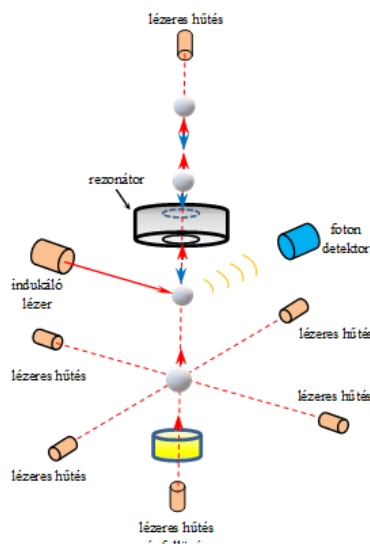
A gerjesztett atom fotonkibocsátással kerül alapállapotba. A foton kibocsátásának iránya véletlenszerű, legrosszabb esetben a lézer irányában történik, ekkor visszakapja eredeti sebességét. Minden más esetben a lézer irányára eső sebességkomponens csökkenni fog. A sebességcsökkenés átlagos mértéke 6 cm/s [9], de a folyamat ismétlődik, így jelentős sebességcsökkenés érhető el rövid idő alatt. A gyakorlatban három pár lézernyalábot alkalmaznak, a páronként kijelölt egyenesek egymásra merőlegesek.

2.2.2 A cézium fountain megvalósítása

Az új típusú atomóra az ún. *cézium fountain* (a céziumatomok nyomvonalának szökőkútúra emlékeztető volta miatt). A gázosító kemencét elhagyva a céziumatomok hat, egymással derékszögben lévő lézer hűtő rendszerbe kerülnek, amelyek frekvenciája enyhén az atomok optikai rezonanciaátmenete alatt van, hogy a Doppler-hatás érvényesülni tudjon. A céziumatomok

néhány száz ms alatt mintegy $1\ \mu\text{K}$ (vagy az alá) hűlnek, és kis „golyókat” alakítanak ki. Ekkor a sebességük megközelítőleg $1\ \text{cm/s}$ lesz. A céziumatomok által alkotott „golyókat” a függőleges lézer enyhén meglöki, hogy azok felfelé mozogjanak, egyben a lézerek lekapcsolódnak. A felfelé mozgó atomcsomag keresztülhalad egy mikrohullámú rezonátoron, ami az atomokat gerjeszti. Az atomcsomag kb. 1 méter utat megtéve megáll, majd visszafordul a gravitáció hatására, majd ismét átmegy ugyanazon a rezonátoron. A rezonátort elhagyva egy lézernyalábbal átvilágításra kerül, indukált fotonemissziót létrehozva azoknál az atomoknál, amelyek a rezonátorban gerjesztett állapotba kerültek. A kibocsátott fotonok intenzitását egy detektor méri. Ez a folyamat sokszor ismétlődik, kissé változtatott mikrohullámú frekvencia mellett. Amely frekvenciánál a mért fotonintenzitás a legmagasabb, az a keresett rezonanciafrekvencia [11].

A *cézium fountain* sematikus elrendezését szemlélteti a 3. ábra.



3. ábra: A *cézium fountain* sematikus elrendezése

A *cézium fountain* pontossága 10^{-16} nagyságrendbe esik (30 millió év alatt 1 másodperc tévedés). Az SI alapegységei közül a másodperc az, amelynek a megvalósítása a legpontosabb.

2.3 Az optikai órák, a jövő kronométere

Bár az idő mérése a *cézium fountain* létrehozásával rendkívül pontosan megvalósítható, mégis várhatóan 2030-at követően a másodperc definíciója meg fog változni, köszönhetően a tudomány és technika gyors fejlődésének. A változást a már napjainkban is megvalósított ún. optikai órák megjelenése indokolja.

Az atomórák és a *cézium fountain*-ek az atomhéjak olyan átmeneteit használják ki, amelyek frekvenciája az elektromágneses skálán a látható fény frekvenciája alatt van. Az optikai órák működésének alapja, hogy a látható fény tartományába eső átmeneteket alkalmaznak. A megvalósításuknak két lehetséges változata van.

2.3.1 Az optikai órák megvalósítása csapdázott ionokkal

Az első lépés egy ion létrehozása elektronok eltávolításával vagy hozzáadásával. Az ionokat aztán elektromágneses mezővel csapdába zárják (4. ábra).

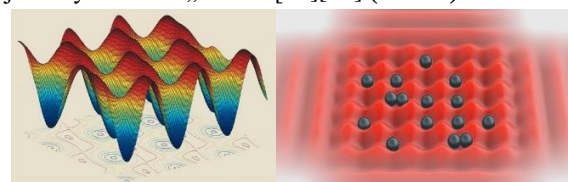


4. ábra: Elektromágnesesen csapdázott ion

A csapdába zárást követően lézeres hűtés következik, majd az optikai tartományba eső lézernyalábbal sugározzák be, folyamatosan változtatva a lézer frekvenciáját. A besugárzás során méri az abszorpció mértékét. Ahol a legnagyobb, ott van az ion rezonanciafrekvenciája. Ezen a frekvencián gerjesztve mérhető a legerjesztődéskor kilépő foton, melynek frekvencia-sávszélessége sokkal kisebb, mint a *cézium fountain* sávszélessége, ezért annál jóval pontosabb. Erre a célra elsőként az alumíniumiont alkalmazták.

2.3.2 Az optikai órák megvalósítása optikai rács segítségével

Az optikai rács segítségével létrehozott „órák” működési elve hasonló a csapdázott ionokkal megvalósított elvhez, azonban egyszerre több ion rezonanciája valósul meg. Két egymásra merőleges, egy síkban sugárzó lézernyaláb segítségével olyan periodikus elektromágneses tér jön létre, amely hasonlít a „tojástartóhoz”, amelyben tojás helyett ionok „ülnek” [12][13] (5. ábra).



5. ábra: Optikai ráccsal létrehozott ioncsapdák

A csapdába esett ionok lézeres hűtést, majd együttes besugárzást követően együtt érik el a rezonanciaállapotot, így erősebb, megbízhatóbb rezonáns sugárzást hoznak létre.

3 A MÉTER

Hivatkozva az [1] és [2] irodalmakra, a méter definíciója: „A hosszúság mértékegysége a méter; jele: m. Definíció szerint a vákuumbeli fénysebesség (c) rögzített számértéke legyen 299 792 458, amely m/s egységben van kifejezve, ahol a másodpercet $\Delta\nu_{Cs}$ határozza meg.”

Az első CGPM ülés 1889-ben meghatározta az alap mértékegységek definícióit [14]. A méter egy platina (10 % irídiummal ötvözve) rúdon lévő két karcolás közti távolság a jég olvadáspontjának a hőmérsékletén. Az SI bevezetésekor, 1960-ban már a ^{86}Kr -atom két elektronpályája közti átmenet ($2p^{10} \rightarrow 5d^5$) hullámhosszának $1650763,73$ -szereseként lett meghatározva. Azonban viszonylag hamar nyilvánvalóvá vált, hogy a megvalósítása közben az etalonok stabilitása nem volt megfelelő.

1965-ben Bay Zoltán már javasolta, hogy a méter a fénysebességhez legyen csatolva. A 17. CGPM 1. számú határozata [15] (1983) szerint a méter a fény által vákuumban 1 másodperc alatt megtett távolságának $1/299792458$ része. Ez a definíció a 2019-ben elfogadott mértékegységrendszerben sem változott, csupán a megfogalmazás lett egységes a másik 6 mértékegységgel.

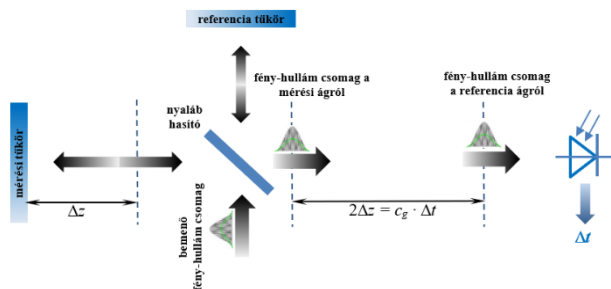
A méter megvalósítására primer és másodlagos etalonokkal is van lehetőség.

3.1 A méter megvalósítása primer etalonokkal

A méter primer etalonokkal történő megvalósítása két úton lehetséges: közvetlen és közvetett mérési elvekkel.

3.1.1 A méter primer megvalósítása közvetlen méréssel

A primer megvalósítás sematikus elrendezését a 6. ábra szemlélteti.



6. ábra: A méter megvalósításának fénypulzusokkal történő megvalósításának sematikus elrendezése

Egy modulációval létrehozott fénypulzus a központi (féláteresztő) tükrön két, egymásra merőleges impulzussá válik szét. Az egyik impulzus egy „referencia” tükrőről visszaverődve visszatér a központi tükrökhöz, majd onnan visszaverődik és tart a fotodetektor felé (fénycsoport a referenciáról). A hasított másik impulzus a „mérési” ágra kerül, amely Δz távolsággal hosszabb, mint a referenciátükrökhöz vezető szakasz. A „mérési” tükrőről visszaverődve, majd a központi tükrön áthaladva egy második hullámcsomagot alkot (fénycsoport a mérési ágról) [16] [1].

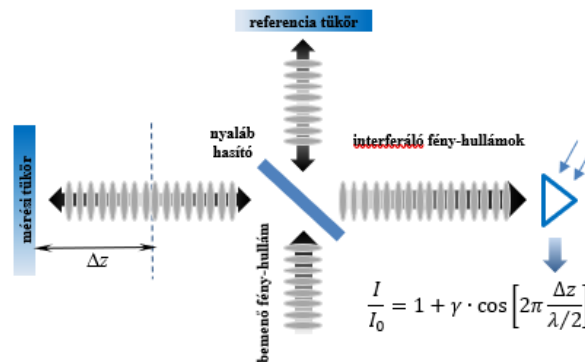
A referencia és a mérési ág l útkülönbsége kifejezhető:

$$l = \Delta z = 1/2 c_g \cdot \Delta t \quad (1)$$

ahol Δt a két fénypulzus detektálása között eltelt idő, c_g pedig a fénycsoport sebessége. Vákuumban c_g megegyezik a c fénysebességgel, levegőben azonban függ annak törésmutatójától. A látható fény esetében ez $2,8 \cdot 10^{-4}$ nagyságrendbe esik. A távolság pontos méréséhez a közeg törésmutatójának ismerete is alapvető szempont. Rövid távolságok mérése ezzel a módszerrel kevésbé pontos, mert az elektronika időfelbontása is számottevő bizonytalanságot okozhat. $l=1$ m esetében a fénypulzusok közti időtartam (Δt) ~ 6 ns. A Hold–Föld távolság mérésénél a referenciatávolság elhanyagolható és a vákuum miatt c_g egyszerűen c -vel helyettesíthető az (1) kifejezésben.

3.1.2 A méter primer megvalósítása közvetett méréssel

Néhány méteres távolságok meghatározására a legalkalmasabb eszközök az interferométerek, amelyek működése a fény interferenciáján alapulnak. A megvalósítási elrendezés hasonló a fénypulzus időkülönbség-mérésnél alkalmazottal, sematikus elrendezését a 7. ábra szemlélteti [1][16].



7. ábra: A méter megvalósításának interferométerrel való megvalósításának sematikus elrendezése

A bemenő fénycsoport a féláteresztő tükrön két részre van osztva. A referencia- és a mérőtükrökről visszavert fénycsoportok interferenciájának intenzitását a fotodiódák méri. A fotodiódán megjelenő intenzitás (I/I_0) függ a Δz értékétől és a fény hullámhosszától. A kifejezésben található γ értéke ([1] Appendix 2. csak elektronikusán):

$$\gamma = 2 \cdot \sqrt{I_1 \cdot I_2} / (I_1 + I_2), \quad (2)$$

ahol $I_0 = I_1 + I_2$.

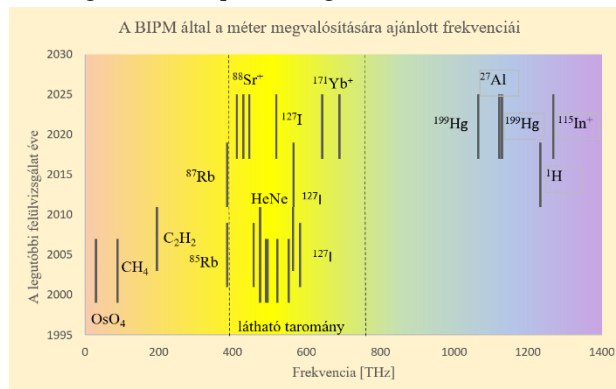
A legegyszerűbb esetben a távolság méréséhez a mérési tükröt kell a fénycsoport útja mentén mozgatni, és meg kell számolni az intenzitásmaximumokat. Az intenzitásmaximumok számából és a fény hullámhosszából meghatározható a mozgatott tükrök által megtett távolság.

Az interferenciás megvalósításnál nagyon lényeges az alkalmazott fény hullámhosszának nagyon pontos ismerete. A BIPM hosszúság- (CCL) és idő-frekvencia (CCTF) tanácsadó bizottságainak közös munkacsoportja (WGFS) publikálja azokat a frekvenciákat, amelyekkel a méter megvalósítása interferenciás módszerrel meghatározható [17]. A BIPM honlapján jelenleg (2025) 29 ajánlott frekvencia található meg.

Kiemelendő, hogy a primer megvalósítást kitűző intézetek széles körben megválaszthatják a számukra kedvező frekvenciát, valamint magát a megvalósítandó távolságot is. Néhány frekvenciát (a létrehozó atommal vagy molekulával együtt) a 8. ábra jelenít meg.

3.2 A méter megvalósítása másodlagos módszerekkel

A méter primer etalonokkal történő megvalósítása a távolság makroszkopikus világában történik.



8. ábra: A BIPM által ajánlott frekvenciák a méter primer megvalósítására

A mai gyakori nanométeres technológiai eljárások olyan rövid távolságok esetén igénylik a visszavezetettséget, amelyet a primer módszerekkel már nem lehet biztosítani.

A félvezetőgyártás alapanyaga a szilícium, ezért a tulajdonságainak kutatása régóta a középpontban van. Különösen az SI 2019-es revíziójához vezető úton, hiszen sokáig jelölt volt a kilogramm megvalósításának versenyében. A Si {220} rácsszerkezetű, tiszta egykristály, rácsláncja a CODATA (Committee on Data of the International Science Council) 2022-es adatbázisa (amely hozzáférhető [18]) szerint: $d_{222}: 1,920155716 \cdot 10^{-10}$ méter, relatív standard bizonytalansága $1,6 \cdot 10^{-8}$, $22,5^\circ \text{C}$ hőmérsékleten, vákuumban.

A BIPM CCL nanotechnológiai munkacsoportjának ajánlása alapján: a Si {220} rácslánc használható, mint a méter definíciójának másodlagos megvalósítása. Három példa a szilícium rácson keresztüli visszavezettség alkalmazására a nanométerek világában:

- Az elmozdulás mérése a Si {220} rácslánc síkjához képest röntgensugaras interferométerrel [19],
- Transzmissziós elektronmikroszkóp (TEM) kalibrációja [20]
- Rácslépcsők lépésmagasság-mérésének visszavezetettsége [21]

4 A KILOGRAMM

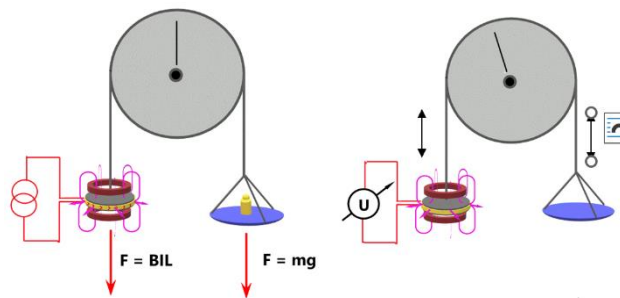
2019-ig a tömeg etalonja volt a legutolsó műtárgy, amely az SI mértékegységrendszer definícióiban szerepelt, mint az egység megvalósítása. Ez volt az International Prototype of the Kilogram (IPK, 9. ábra).



9. ábra: A tömeg etalonja 2019-ig

A CGPM 2019-ben úgy döntött, hogy az összes többi SI mértékegység definícióhoz hasonlóan (kivéve a kandela) a tömeg mértékegységét is invariáns természeti állandóhoz köti. Ez volt az SI „forradalom” legnagyobb újdonsága. Az új definíció [2]: „A tömeg mértékegysége a kilogramm; jele: kg. Definíció szerint a Planck-állandó (h) rögzített számértéke legyen $6,62607015 \cdot 10^{-34}$, amely J·s egységben van kifejezve, ami megegyezik a $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ -nel, ahol a métert és a másodpercet c , illetve $\Delta \nu_{\text{Cs}}$ határozza meg.”

A megvalósítás talán a legbonyolultabb az összes mértékegység közül. A definícióváltásra való felkészülés hosszú évek munkája volt, amelynek során két megvalósítás versenyzett egymással. Az egyik az ún. „Watt balance”, a másik pedig a „Si-gömb” elgondolás. A Watt balance (mai elnevezéssel Kibble balance) kisebb bizonytalansággal valósította meg a tömegetalon értékét, így ez a megfogalmazás, és vele együtt a Planck-állandó került az új SI-definíciók közé. A megvalósítás az eredeti megoldásokban két lépcsőben történt, manapság ezt egy lépésben teszik. Az alapelv a következő [23][24][28]:



10. ábra: A Kibble-balance működési elve

Az első lépésben (10. ábra bal oldal) a meghatározandó tömeg a „csiga” egyik serpenyőjében helyezkedik el, az „ellensúly” egy elektromágnes tekercsben lévő mágnes. A tekercsben folyó áram akkora, hogy egyensúlyt tart a meghatározandó tömeg által kifejtett nehézségi erővel, azaz:

$$BIL = mg \quad (3)$$

ahol B a mágneses indukció, I az áramerősség, L a tekercs menetszáma, m a meghatározandó tömeg és g a lokális gravitációs állandó.

Második lépésben a mágnes v sebességgel mozog ugyanabban a tekercsben, ezzel U feszültséget indukál.

$$BLv = U \quad (4)$$

A (3) és (4) egyenletekből:

$$m = (g \cdot v)^{-1} \cdot U \cdot I \quad (5)$$

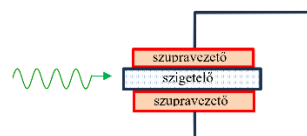
Az U feszültséget a Josephson-etalonról lehet lezámaztatni, az I áramerősség pedig a Hall-effektus segítségével határozható meg. Az m tömeget meghatározó kifejezés:

$$m = N \cdot K_J^2 \cdot (4 \cdot g \cdot v)^{-1} \cdot h \quad (6)$$

ahol K_J a Josephson-állandó ($\sim 484 \text{ GHz/mV}$), h a Planck-állandó és N egy, a megvalósítás során alkalmazott állandók reprezentánsa. A gyakorlati megvalósítás nagyon pontos és technikailag magasszintű munkát igényel [22][23][24].

4.1 A Josephson-etalon

A Josephson-effektus két szupravezető közt lévő szigetelőréteg elrendezésben jön létre. Ekkor, ha a szigetelő külső mikrohullámú sugárzás alatt van, a szupravezetők közt ún. Cooper-párok segítségével áram jön létre, feszültség fellépéssel (11. ábra) [25]



11. ábra: A Josephson-etalon sematikus ábrája

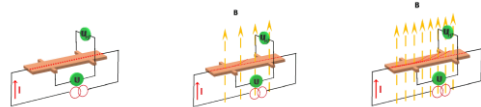
A feszültség nagysága függ a mikrohullámú sugárzás frekvenciájától:

$$V_n = n \cdot \frac{h}{2e} \cdot f \quad (7)$$

ahol n egy egész szám. A $2e/h$ konstans értékét K_J Josephson-állandónak hívják, értéke $483\,597,9 \text{ GHz/V}$. A PTB feszültségetalonja több tízezer Josephson-cellát tartalmaz sorba kapcsolva, így 10 V nagyságú etalon feszültség is elérhető [26].

4.2 A Hall-effektus

Ha egy vezetőben U feszültség hatására I áram folyik, a vezető két oldala közt nincs feszültségkülönbség. Ha a vezető B indukciójú mágneses térben van, az elektronok eltérülnek, és a két oldal közt feszültség alakul ki (12. ábra)



12. ábra: Hall-effektus. Külső mágneses térben az áramjárta vezető két oldala között feszültség alakul ki

A vezető két oldala közötti Hall-feszültség arányos a B indukció nagyságával:

$$U_H = R_H \cdot I \quad (8)$$

ahol U_H a Hall-feszültség, R_H a Hall-ellenállás, I pedig az áramerősség.

Gyakran a (8) kifejezést az áram meghatározására alkalmazzák.

5 AZ AMPER

Az áram eredeti, 1960-as definíciója a gyakorlatban megvalósíthatatlan volt, tekintve, hogy „végtelen hosszú” vezetópár közti kölcsönhatásról szólt. A megújult SI az elektron töltéséhez kötötte az áram fogalmát: „Az áramerősség mértékegysége az ámpér; jele: A. Definíció szerint az elemi töltés (e) rögzített számértéke legyen $1,602176634 \cdot 10^{-19}$, amely C egységben van kifejezve, ami megegyezik az A · s-mal, ahol a másodpercet $\Delta\nu_{Cs}$ határozza meg.” [2].

A megvalósításnak több útja van [1]. Közülük két lehetőség:

- Az Ohm-törvény felhasználásával, alkalmazva a Josephson- és a kvantum Hall-effektusokat,
- Az egy elektron transzport segítségével (SET: single electron transport).

5.1 Az ámpér megvalósítása az Ohm-törvény alkalmazásával

Az ámpér Ohm-törvényén keresztüli megvalósítása a *Kibble balance* leírásánál említett Josephson- és Hall-effektusokon keresztül történik [25][26][29].

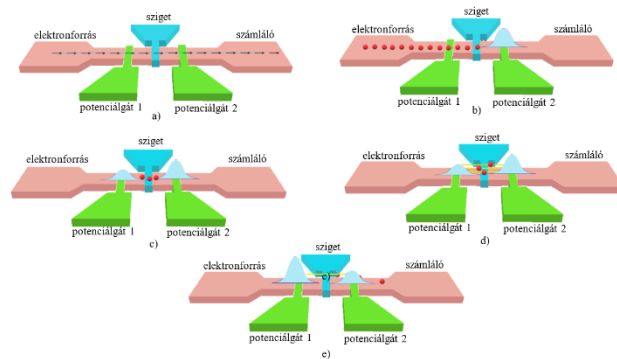
A megvalósítandó kifejezés:

$$I = U/R \quad (9)$$

Az ún. PQCG (programmable quantum current generator) leírása, illetve működési elvének ismertetése meghaladja ezen összefoglaló kereteit. A megvalósításról szóló összefoglaló megtalálható a [31] irodalomban.

5.2 Az ámpér megvalósítása egy elektrontranszport alkalmazásával

1 ámpér áramerősség esetén 1 másodperc alatt (a definíció alapján) egy vezető keresztmetszetén $6,241509 \cdot 10^{18}$ elektron halad át. Az ámpér megvalósításának ezen módja az elektronok megszámlálásán alapul [32][33].



13. ábra: SET megvalósítás

A 13. ábra a) része egy alap kvantumrendszert ábrázol, egy elektronforrás és egy elektronszámláló között akadálytalanul haladhatnak az elektronok. A b) ábra részen a „potenciálgát 2” egy olyan akadályt jelent az elektronoknak, amelyen keresztül nem tudnak áthaladni. A „sziget”-re beáramlott elektronok mögött a „potenciálgát 1” is megemelkedik, megakadályozva, hogy az elektronok visszaáramoljanak. c) A két potenciálgát között lévő elektronok egy kvantumrendszert alkotnak, ami azt jelenti, hogy minden elektronnak egy energianívón kell elhelyezkednie (2 elektron lehet egy nívón, ellentétes spinnel, Pauli-féle kizárási elv). d) Végül a „potenciálgát 2” csökkentésével a legfelső energianívón lévő elektron kiszabadul, és a számlálóba kerül.

A jelenkori megvalósításnál mintegy 10^8 elektront tudnak megszámolni másodpercenként, de a technika fejlődésével ez közelíteni fogja az 1 ámpert.

6 A KELVIN

A kelvin definíciója 2019 óta jelentősen megváltozott: „A termodinamikai hőmérséklet mértékegysége a kelvin; jele: K. Definíció szerint a Boltzmann-állandó (k) rögzített számértéke legyen $1,380649 \cdot 10^{-23}$, amely $J \cdot K^{-1}$ egységben van kifejezve, ami megegyezik a $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$ -nel, ahol a kilogrammot, a métert és a másodpercet h , c , illetve $\Delta\nu_{Cs}$ határozza meg.”

A régi SI-ben a megvalósítás a víz hármaspontján alapult. Az új definíció számos lehetőséget ad, többek között a hőmérsékleti skála más pontjaiban is lehetővé teszi az etalonok működését. Az új definíció eredete a statisztikus mechanikából származik, mely szerint a termodinamikai hőmérséklet a rendszer szabadsági fokaira eső átlagos termikus energia mértéke. Elvileg a termodinamikai hőmérséklet mértékegysége a joule, nem lenne szükség a kelvin egységre. Történelmi és gyakorlati megfontolásokból a kelvin maradt a hőmérséklet SI alapegysége. A BIPM CCT (hőmérsékletmérések tanácsadó bizottsága) több megvalósítási lehetőséget javasolt.

6.1 Akusztikus gáz-hőmérsékletmérés

Egy megvalósítási lehetőség az AGT (acoustic gas thermometry), amely az ideális gázban lévő hangsebesség (u) és a termodinamikai hőmérséklet (T) kapcsolatán alapul:

$$u^2 = \gamma \cdot k \cdot T/m \quad (10)$$

ahol k a Boltzmann-állandó, m a gázmolekulák átlagos tömege, γ a gáz állapot nyomáson és állandó térfogaton lévő hőkapacitásának aránya. Egyatomos gázokra $\gamma=5/3$.

6.1.1 Abszolút-primer akusztikus gáztermometria

A hangsebesség meghatározása egy izotermikus üregben lévő egyatomos gáz rezonanciafrekvenciájából származtatható. A rezonanciafrekvenciák pontos meghatározásához nem-degenerált akusztikus módusok szükségesek, ilyen célra gyakran közel gömb alakú üregeket használnak.

Az akusztikus rezonanciafrekvenciákat, a nyomást, az üreg dimenzióit és a gázmolekula-tömegeket vissza lehet vezetni a méterre, a kilogrammra és a másodpercre. A primer AGT módszer bizonytalansága a víz hármaspontjánál 10^{-6} nagyságrendben van.

A témával kapcsolatos áttekintés a [34] irodalomban található.

6.1.2 Relatív akusztikus gáztermometria

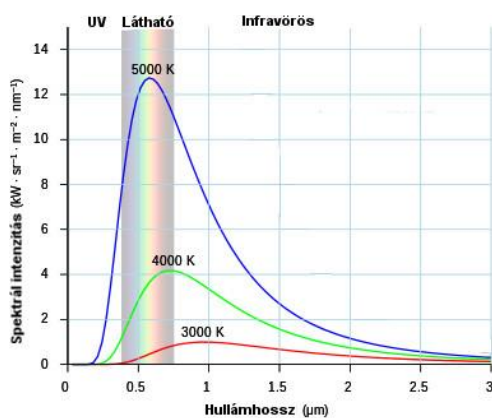
A módszer részletes leírása ugyancsak a [34] irodalomban található. A relatív mérések esetén csak az adott T hőmérséklet és egy T_{ref} referenciahőmérséklet aránya kerül meghatározásra, nem az abszolút érték. A tipikus bizonytalanság $3 \cdot 10^{-6}$. A relatív akusztikus gáz termometriai módszer alkalmazási skálája néhány kelvintől 550 K tartományra terjed ki.

6.2 Spektrálsáv radiometrikus termometria

A spektrálsáv radiometrikus termometria alapja a testek feketetest-sugárzásának Planck-törvényén alapul. A törvény alapján a sugárzás intenzitása (spektrális komponensektől való függése) függ a T hőmérséklettől és a Boltzmann-állandótól:

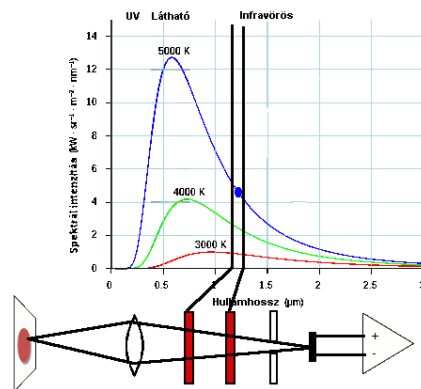
$$I_{(\lambda,T)} \propto \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (11)$$

ahol k a Boltzmann-állandó, h a Planck-állandó, c a fénysebesség, λ a hullámhossz és T pedig a hőmérséklet. Az összefüggés által adott hőmérsékleten meghatározott spektrális eloszlást a 14. ábra szemlélteti.



14. ábra: A Planck-féle feketetest-sugárzás spektruma

A hőmérséklet meghatározására alkalmazott berendezés sematikus elrendezését mutatja a 15. ábra.



15. ábra: A spektrális hőmérsékletmérés sematikus elrendezése

A céltárgyról jövő feketetest-sugárzás egy gyűjtőrendszeren keresztül áthalad két (vagy több) szűrőn, amelyek után már csak egy szűk frekvenciasávban lévő nyaláb halad tovább. Egy kollimátort követően a sugárnyaláb az érzékelőre jut, amely méri az intenzitást. A szűrők cseréjével a spektrum több pontjában is meg lehet mérni az intenzitást, amelyekből vissza lehet számolni, hogy az adott eloszlás mekkora hőmérséklethez tartozott.

Ezt a módszert általában 1500 K felett alkalmazzák.

7 A MÓL

A mól eredetileg az SI megalkotásakor, 1960-ban még nem volt alapegység. Az anyagmennyiség definíciója 1971-ben került az alapegységek közé, leszámaztatása a ^{12}C tömegén és az Avogadro-számon keresztül történt. A 2019-es új SI-ben azonban már igazi alapegységként szerepel. A [2] irodalom alapján: „Az anyagmennyiség mértékegysége a mól; jele: mol. Egy mól pontosan $6,02214076 \cdot 10^{23}$ elemi egységet tartalmaz. Ez a szám az Avogadro-állandó (N_A) rögzített értéke mol^{-1} egységben kifejezve, az ún. Avogadro-szám. Az anyagmennyiség (jele: n) egy rendszer meghatározott elemi egységei számának a mérőszáma. Az elemi egység lehet atom, molekula, ion, elektron, bármely más részecske vagy meghatározott részecskecsoport.”

A mól megvalósítása ^{28}Si gömb alkalmazásával történik. A szilícium-gömb sokáig jelölt volt a kilogramm definíciójáért való versenyben, azonban a *Kibble balance* általi megvalósítása kisebb bizonytalansággal vált lehetővé, ezért a kilogramm definíciója a Planck-állandóhoz lett csatolva.

A szilíciumgömb létrehozásához először dúsítással nagy tisztaságú (99,99%) ^{28}Si alapanyag készül. Ebből az alapanyagból növesztett nagy tisztaságú szilícium egykristályból kerül kialakításra a gömb. A gömbalaktól való eltérés kisebb mint 50 nm, a felületi érdesség pedig kisebb mint 0,2 nm. Egy, a PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) által elkészített ^{28}Si gömböt mutat a 16. ábra [35].



16. ábra: Nagytisztaságú szilíciumgömb

A gömbben lévő ^{28}Si -atomok számát megadó kifejezés:

$$N = 8V_s/a(\text{Si})^3 \quad (12)$$

ahol V_s a kristály térfogata, 8 a szilícium kristálycellájában lévő atomok száma, $a(\text{Si})$ pedig az egységcella rácsállandója. A megvalósítás alapvető feltétele a rácsállandó meghatározása, amely XRCD- (X-ray crystal density) módszer alkalmazásával történik.

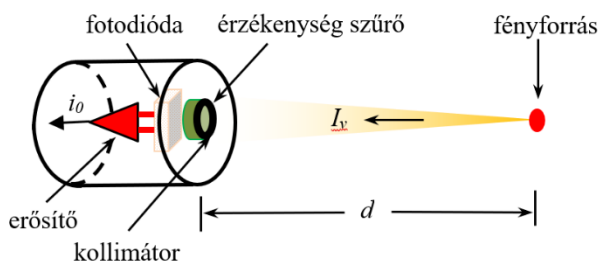
Az XRCD-módszer leírása és a szilícium gömb rácsparaméterének meghatározása a [36] irodalomban részletesen megtalálható.

8 A KANDELA

A kandela az egyetlen olyan SI alapegység, amely (az új SI szerint) nem természeti állandóhoz kötődik. A definíciója egy ún. technikai állandón (K_{cd}) keresztül valósul meg [2]: „A fényerősség mértékegysége a kandela; jele: cd. Definíció szerint az $540 \cdot 10^{12}$ Hz frekvenciájú monokromatikus sugárzás fényhatásfoka állandójának K_{cd} rögzített számértéke legyen 683, amely $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ egységben van kifejezve, ami megegyezik a $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$ -nel, vagy a $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$ -nal, ahol a kilogrammot, a métert és a másodpercet h , c és $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ határozza meg.”

Egy lehetséges megvalósítás bemutatása a [37] irodalom alapján történik.

Az emberi szem relatív spektrális érzékenységét az International Commission on Illumination (CIE) határozta meg először 1924-ben, majd 1983-ban, a 360 nm és 830 nm intervallumban az 555 nm-es ($540 \cdot 10^{12}$ Hz) csúcsra normalva. Az emberi szem érzékenysége 555 nm-es hullámhossznál a legerősebb, az ehhez tartozó csatolási állandó a K_{cd} , amelynek számértéke 683. A régebbi megvalósítás a gyertya fényéhez (a fényforráshoz) kötődött, míg az új definíció megvalósítása a detektorhoz kapcsolható. A mérési elrendezést mutatja a 17. ábra.



17. ábra: A kandela megvalósítása

A fényerősség a fényforrás és a fotométer közötti d távolság esetén:

$$I_v = (i_0/R_v) \cdot (d^2/\Omega_0) \quad (13)$$

ahol I_v a fényerősség, Ω_0 a térszög, R_v pedig a fotométer fényerősség érzékenysége. R_v megadható:

$$R_v = (A \cdot \int S_{(\lambda)} r_{(\lambda)} d\lambda) / (K_m \cdot \int S_{(\lambda)} V_{(\lambda)} d\lambda) \quad (14)$$

ahol A a kollimátor felülete, $V_{(\lambda)}$ a relatív spektrális fényhatásfok függvény, K_m a maximális fényhatásfok (683 lm/W). $S_{(\lambda)}$ a fényforrás spektrális eloszlásfüggvénye (felhasználva a feketetest-sugárzást 2856 K esetén), és $r_{(\lambda)}$ a fotométer teljes abszolút spektrális hatásfoka.

9 AZ ÚJ SI ELŐNYEI ÉS HÁTRÁNYAI

Az előző fejezek érzékeltették azt a technikai szabadságot, amelyet az új SI definíciók nyújtottak (tanak).

Az új SI bevezetésének legfontosabb indokait és előnyeit a BEVEZETÉS fejezet tartalmazza.

Azonban meg kell említeni, hogy az előnyök mellett nehézségekkel is szembe kell nézni.

A definíciók megvalósítása nagyon magas szintű technikai felkészültséget, mérnöki/fizikusi ismereteket igényel. Az új etalonok létrehozása és alkalmazása a kvantummechanika (számos esetben a kvantum-elektrodinamika) ismeretét feltételezi.

Habár számos, az új definíciókat megvalósító etalon már kereskedelmi forgalomban is elérhető, de jelentős anyagi kiadással jár, különösen ezeknek a berendezéseknek a metrológiai célra történő specializálása.

A SI mértékegységrendszer definícióinak oktatása és a megvalósítási lehetőségei már kikerültek a középiskolák keretei közül.

A felsorolt nehézségek ellenére az új definíciók és azok alkalmazásai megnyitották a lehetőséget egy pontosabb, széles skálájú megvalósítás felé.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] SI-BROCHURE-9 (2019). The International System of Units (aktualizálva 2024). <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure>
- [2] 127/1991. (X.9.) Korm. rendelet a mérésügyről szóló törvény végrehajtásáról.
- [3] Le Système International d'Unités (SI) (SI Brochure 1), Pavillon de Breteuil, F-92-Sèvres, France, 1970.
- [4] Friedrich B., Herschbach D. (2003). Stein and Gerlach: How a Bad Cigar Helped Reorient Atomic Physics, *Physics Today* 56(12) 53-59.
- [5] Lombardi M. A., Heavner T. P., Jefferts S. R. (2007). NIST Primary Frequency Standards and the Realization of the SI Second, *NCSL International Measure*, 2(4)74-89.
- [6] Essen L. Parry J. (1955). An Atomic Standard of Frequency and Time Interval: A Caesium Resonator, *Nature*, Vol. 176, 280-281.
- [7] Shirley J., Lee W., Drullinger R. (2001). Accuracy evaluation of the primary frequency standard NIST-7, *Metrologia* Vol 38, 427-458.
- [8] Wineland D., Dehmelt H. (1975). Proposed $10^{14} \Delta\nu < \nu$ Laser Fluorescence Spectroscopy on Tl^+ Mono-Ion Oscillator III, *Bulletin of the American Physical Society*, Vol. 20, 637.
- [9] Hänsch T. W., Shawlow A. L. (1974). Cooling of gases by laser radiation, *Optic Communication*, 13(1) p. 68.
- [10] Domokos P. (2005). Semleges atomok lézeres hűtése és csapdázása, *Fizikai Szemle*, 45(6) 193-198.
- [11] <https://www.nist.gov/news-events/news/1999/12/nist-f1-caesium-fountain-clock>. (aktualizálva 2025).
- [12] <https://www.nist.gov/atomic-clocks/optical-clocks-future-time>
- [13] <https://physicsworld.com/a/optical-clocks>, 2005,
- [14] *Proceedings of the 1st CGPM* (1889), 1890, p. 38.
- [15] 17e CONFÉRENCE GÉNÉRALE DES POIDS ET MESURES, 1983, ISBN 92-822-2084-2, p. 97.

- [16] Schödel R., Yacoot A., Lewis A. (2021). The new *mise en pratique* for the metre – a review of approaches for the practical realization of the traceable length metrology from 10^{-11} m to 10^{13} m.
- [17] <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies-metre>
- [18] <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?d220sil>
- [19] Basile G., Becker P., Bergamin A., Cavagnero G., Franks A., Jackson K., Kuetsgens U., Mana G., Palmer E.W., Robbie C.J., Stedman M., Stümpel J., Yacoot A., Zosi G. (2000). Combined optical and X-ray interferometer for high precision dimensional metrology, *Proc. R. Soc. A*, 456 p. 701-719.
- [20] Orji N. G., Dixon R. G., Garcia-Gutierrez D. I., Bunday B. D., Bishop M., Gresswell M. W., Allen R. A., Allgair J. A. (2007). *Proc. of SPIE*, Vol. 6518.
- [21] Lawn M. A., Bolton Z., Murphy L., Gartner S., Oh Y., Coleman V. A. (2024). Step height measurement of monoatomic silicon crystal lattice steps with a commercial atomic force microscope, *Meas. Sci. Technol.*, 35.
- [22] Mirandés E., Zeggagh A., Bradley M. P., Picard A., Stock M. (2014). Superconducting moving coil system to study the behaviour of superconducting coils for a BIPM cryogenic watt balance, *Metrologia*, 51.
- [23] Kibble B. P., Robinson I. A. (2014). Principles of a new generation of simplified and accurate watt balances, *Metrologia*, 51.
- [24] Robinson I. A., Schlamminger S. (2016). The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass, *Metrologia*, 53.
- [25] Josephson B. D. (1962). Possible new effects in superconductive tunnelling, *Phys. Letters* 1, p. 251
- [26] <https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt2/abt2-josephson.html>
- [27] Stock M. (2011). The watt balance: determination of the Planck constant and redefinition of the kilogram, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 369.
- [28] Fang H., Kiss A., Picard A., Stock A. (2014). A watt balance based on a simultaneous measurement scheme, *Metrologia*, 51.
- [29] Djordjevic S., Behr R., Poirier W. (2025). A primary quantum current standard based on the Josephson and the quantum Hall effects, *Nature Communications*, 16:1447.
- [30] Brun-Picard J., Djordjevic S., Lepat D., Schopfer F., Poirier W. (2016). Practical Quantum Realization of the Ampere from the Elementary Charge, *PHYSICAL REVIEW X* 6, 041051.
- [31] Djordjevic S., Behr R., Drung D., Götz M., Poirier W. (2021). Improvements of the programmable quantum current generator for better traceability of electrical current measurements, *Metrologia*, 58.
- [32] Giblin S. P., Kataoka M., Fletcher J. D., See P., Janssen T. J. B. M., Griffiths J. P., Jones G. A. C., Farrer I., Ritchie D. A. (2012). Towards a quantum representation of the ampere using single electron pumps, *Nature Communication*, 3:930.
- [33] Gamero M. E., Lapi A. J., Gimenez I. B. J., ChierChie F., Moroni G. F., Cervantes-Vergara B. A., Tiffenberg J., Estrada J., Paolini E. E., Cancelo G. (2025). Towards a quantum realization of the ampere using single-electron resolution Skipper-CCDs, *Cornell University, ArXiv*, 2502.07742
- [34] Moldover M. R., Gavioso R. M., Mehl J. B., Pitre L., Podesta M., Zhang J. T. (2014). Acoustic gas thermometry, *Metrologia*, 51.
- [35] https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/presse_aktuelles/messe_n_events/si-kg_workshop/Presentations/PTB_Si_SurfaceCharacterization_Busch.pdf
- [36] Fuji K., Bettin H., Becker P., Massa E., Rienitz O., Pramann A., Nicolaus A., Kuramoto N., Busch I., Borys M. (2017) Realization of the kilogram by the XRCD method, *Metrologia*, 53.
- [37] <https://www.nist.gov/pml/sensor-science/optical-radiation/realization-candela>

A metrológiai visszavezethetőség modern eszközei és ezek akkreditálása

Modern tools for metrological traceability and their accreditation

Stelczer Attila

Nemzeti Akkreditáló Hatóság, Budapest, Magyarország
attila.stelczer@nah.gov.hu

Összefoglalás — A cikk bemutatja a metrológiai visszavezethetőség egyik modern lehetőségének, a tanúsított anyagminták használatának lehetőségeit, a kiválasztás követelményeit, és a kompetens gyártók akkreditálásának elmúlt évben elért hazai sikereit, végül felhívja a figyelmet a jelenlegi változásokra.

Kulcsszavak: metrológiai visszavezethetőség, anyagminta, tanúsított anyagminta, tanúsított referenciaanyag, CRM, kalibrálás, vizsgálólaboratórium, orvosi vizsgálólaboratórium

Abstract — This article describes the possibilities of using certified reference materials, one of the modern options for metrological traceability, the requirements for selection, and the domestic successes of accreditation of competent manufacturers in the past year, and highlights current changes.

Keywords: metrological traceability, reference material, certified reference sample, certified reference material, CRM, calibration, testing laboratory, medical testing laboratory

1 BEVEZETÉS

A metrológia ősidőktől visszanyúló [1] történelme során a törvényes mértékegységek köre a jelenkorban már jól meghatározott és szabályozott. Azonban a mérési területek sokasodásával, a pusztán törvényes mértékegységekre való közvetlen metrológiai visszavezethetőség megvalósítása egyre több esetben problémákba ütközik.

A metrológia feladatai között szerepel a közvetlen vagy közvetett leszármaztatás az országos/nemzeti etalonról, mely a fentiek miatt nem minden tevékenység során lehetséges.

A cikk bemutatja a törvényes metrológia területén kívül eső, ám a modern mérési-laboratóriumi gyakorlatban egyre nagyobb számban használt tanúsított referenciaanyagok helyét a metrológiai visszavezethetőség biztosításával, és a mérési eredmények érvényességének biztosításával kapcsolatban, illetve kiterjesztésük használatuk egyes lépéseire, valamint készítésük szabványosítására és akkreditálására egyaránt.

2 ANYAG ÉS MÓDSZER

A hazai és nemzetközi szabályozó/magyarító dokumentumok, illetve kapcsolódó műszaki és rendszer-szabványok az elmúlt bő 30 évben jelentek meg, ez az időtáv azonban (sajnos) lehetővé teszi az egyes fogalmak következetlen definiálását és alkalmazását.

A téma megértéséhez szükséges így néhány fogalmat tisztázni és ellenmondást feloldani, illetve szabályozó dokumentumot megismerni.

2.1 Érintett területek meghatározása

Mivel a terület egyszerre szabályozott jogi [2, 3], szakmai [4] és műszaki [5] oldalról, így ezen dokumentumokban foglalt meghatározások ismerete együttesen szükséges.

2.1.1 Hiteles vagy tanúsított?

A Nemzetközi Metrológiai Szótár (és 2017-es felülvizsgálata) szerint a hiteles anyagminta fogalmát kell(ene) használnunk. A VIM 3 magyar fordításának [4] 5.14. szakasza szerint ez egy „...hatóság által kiadott dokumentummal kísért anyagminta...”. Ez a megfogalmazás félrevezető, mert tanúsított anyagmintát nem-hatósági, piaci szervezetek is készíthetnek, mivel a gyártó jogállására vonatkozó kitétel az MSZ EN ISO 17034:2017 szabványban nem szerepel, sőt a 3.1. pont szerint referenciaanyag-előállító lehet „szervezet vagy vállalat, állami vagy magán.”

2.1.2 Bizonyítvány vagy tanúsítvány?

További problémát vet fel a VIM 3 fogalmának 1. megjegyzése, mely szerint a fenti dokumentáció „bizonyítvány”-t jelent, miközben az MSZ EN ISO 17034:2017 szabványban (7.14. szakasz szerint) a „tanúsított referenciaanyagokra referenciaanyag-tanúsítványt [...] kell kiállítania”, tehát a kísérő dokumentumnak egyszerre kell(ene) bizonyítványnak és tanúsítványnak lennie.

A VIM 3 további érdekessége, hogy, bár a magyar fordítás előszava szerint 2017-ben felülvizsgálták, mégis (az 5.14. 2. megjegyzésben) hivatkozza az ISO GUIDE 34-es útmutatót. A probléma, hogy az ISO GUIDE 34-et 2016. november 31-én visszavonták, és az ISO 17034:2016

váltotta fel, de ez nem jelenik meg a Nemzetközi Metrológiai Szótárban.

Várhatóan a VIM 4 közelgő kiadása már feloldja ezeket az ellenmondásokat.

2.1.3 MSZ EN ISO 17034:2017

A már sokat emlegetett szabvány [5] 3.2. szakasza szerint a tanúsított referenciaanyag (CRM) esetén követelmény, hogy a referenciaanyag tanúsítvány tartalmazza;

- az előírt tulajdonság értékét,
- a kapcsolódó mérési bizonytalanságot,
- és a metrológiai visszavezethetőségre vonatkozó nyilatkozatot.

Az utóbbi két elem kizárólag a tanúsított referenciaanyagok esetében követelmény, és leginkább e két jellemző választja el azokat egymástól a referenciaanyagoktól (RM). Az eltérő anyagokra vonatkozó releváns követelményekről nyújt információt a szabvány A melléklete.

2.1.4 Vonatkozó nemzetközi követelmények

Elsősorban az ILAC (*International Laboratory Accreditation Cooperation*) által kiadott, a mérési eredmények metrológiai visszavezethetőségével foglalkozó ILAC-P10 változásai érdekesek.

A szabályzat – ugyan jelölése szerint politika (*policy*) – hatályos kiadása [6] 2020-as. Ez már elődjénél [7] részletesebben foglalkozik a mérést/kalibrálást végző felhasználók felelősségével az RM/CRM anyagok kiválasztásával és felhasználási korlátaival.

Az ILAC-P10:07/2020 2.4-2.6 pontjai szerint a CRM-ek használata is bizonyítja a metrológiai visszavezethetőséget, ha:

- Nemzeti Metrológiai Intézet által, BIPM KDBC (*Key Comparison Data Base*: Kulcsösszehasonlítások adatbázisa) [8] adatbázisában szerepel,
- ILAC által elismert akkreditált szervezet által akkreditált CRM gyártó készítette,
- vagy a JCTLM (*Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine* – Laboratóriumi Medicina Visszavezethetőségi Egyesített Bizottság) adatbázisa [9] tartalmazza azokat.

Ugyanakkor az ILAC és a NAH egyaránt elismerik, hogy vannak olyan műszaki területek, ahol sem a hitelesítés, sem a kalibrálás, sem a fenti követelmények szerint gyártott CRM-ek nem elérhetőek, ebben (és csak ebben) az esetben kereshetnek a felhasználók egyéb, alternatív megközelítéseket.

2.1.5 Az ILAC követelmények megjelenése a NAH szabályozásában

A Nemzeti Akkreditáló Hatóság (NAH) NAR-36 Metrológiai visszavezethetőség szabályzata [10] illeszkedik az ILAC-P10 követelményeihez.

Ennek megfelelően a NAH is preferálja a kompetens gyártó által előállított tanúsított referenciaanyagok alkalmazását, mint a metrológiai visszavezethetőség igazolásának eszközét.

A NAR-36 frissítése 2024 augusztusában történt meg széleskörű szakmai egyeztetés után. Ebben a véleményezési folyamatban az Akkreditálási Tanács II. Szakmai Bizottságának munkáját ki kell emelni.

Emellett egyes szervezetek megjegyezték, hogy „Az ISO 17034 és az ISO 17025 nem említi az ILAC nevű szervezetet, és a fogalom meghatározásoknál sem szerepel. A visszavezethetőséget jól szabályozza a fenti két ISO [szabvány], nincs szükség további irányelvekkel történő bonyolításra.” A NAH számára – az EA aláírói státuszából adódó kötelezettségek miatt – az ILAC és EA kötelező dokumentumainak átültetése a hazai szabályozásba nélkülözhetetlen.

2.1.6 A közelmúlt változásai

Az MSZ EN ISO 17034:2017 szabvány többször hivatkozik ISO GUIDE-okra mint támogató, útmutató dokumentumokra (ide nem értve az ISO GUIDE 30-at, melyet a szabvány 3. fejezete hivatkozik és kötelezővé tesz, illetve fogalmi ellentmondás esetén előnyben is részesíti a további szabványokkal, dokumentumokkal szemben).

Az ISO GUIDE 31, ISO GUIDE 33, ISO GUIDE 35 dokumentumokat hivatkozza a szabvány, azonban azokat az ISO 2024 nyarán visszavonta, és kialakította az ISO 3340x sorozatot. A szabványok jelenleg csak az ISO honlapjáról érhetőek el angol nyelven, jóváhagyó közleményes hazai közzétételük a közeli jövőben várható.

A sorozat publikált tagjainak felsorolását az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat: Az ISO 3340x szabványsorozat tagjai

szabvány jele	angol cím
ISO 33401	Reference materials. Contents of certificates, labels and accompanying documentation
ISO 33403	Reference materials. Requirements and recommendations for use
ISO 33405	Reference materials. Approaches for characterization and assessment of homogeneity and stability
ISO 33406	Approaches for the production of reference materials with qualitative properties
ISO 33407	Guidance for the production of pure organic substance certified reference materials

A felhasználóknak különösen fontos az ISO 33403, amely a felhasználásra vonatkozó követelményeket és ajánlásokat tartalmazza, így nagy segítség lehet a vizsgálólaboratóriumoknak.

2.1.7 Várható változások

Az ILAC-P10 kiegészítése egy (B informatív) új melléklettel folyamatban van, mely a jelenlegi A melléklet mintájára nem a kalibrálási szolgáltatások, hanem a CRM-ek kiválasztásának, illetve a vonatkozó metrológiai visszavezethetőségi alapelveket tartalmazza majd.

A közeli jövőben várható az ISO GUIDE 30-at felváltó ISO 33400, illetve a fémipari referenciaanyagok előállításával foglalkozó ISO 33408 megjelenése is.

3 VONATKOZÓ SZABÁLYZATOK

3.1 RM/CRM-gyártók akkreditálásának nemzetközi kitekintése

A fentiek szerint egy fejlődő tevékenységi területről beszélhetünk, melynek erősítését minden szereplő szorgalmazza. A CRM gyártói tevékenység jellegéből következően az akkreditált szervezetek száma csak lassan emelkedik, ugyanakkor a felhasználók szempontjából nem is a gyártószervezetek száma, hanem a gyártott anyagok sokfélesége (meghatározott komponens, megfelelő tulajdonságérték meghatározása megfelelő karakterizációval, megfelelő mintatípus készítése stb.) a lényeges.

Az ILAC nyilvántartása szerint [11] 2023-ban világszerte 44 akkreditáló szervezet foglalkozott az RM/CRM-gyártók akkreditálásával. Ugyanakkor összehasonlításként, vizsgálólaboratóriumok akkreditálásával 109.

Az EA (Európai Akkreditálási Együttműködés) adatai [12] alapján a 44 EA MLA aláíró tagból 14 nemzeti akkreditáló testület akkreditál RM/CRM-gyártókat.

Az EA MLA-t aláíró, RM/CRM-gyártókat is akkreditáló nemzeti akkreditáló testületek (NAB) számának változását a 2. táblázat mutatja be.

2. táblázat: Az EA MLA aláírók számának változása

EA jelentés dátuma	összes aláíró NAB (EA-MLA)	17034 szerint is akkreditáló aláíró NAB-ok száma
2017 december	41	0
2018 december	42	0
2019 december	43	8
2020 december	43	8
2021 december	43	12
2022 december	44	12
2022 december	44	12
2023 december	44	13
2024 január	44	14
2025 január	44	14

Az egy nemzeti akkreditáló testület által akkreditált CRM-gyártók száma nem ismert, az akkreditált státuszok számának változását a 3. táblázat mutatja be az EA MLA éves jelentések adatai alapján [12].

3. táblázat: Az EA MLA aláírók által akkreditált CRM-gyártók száma

EA jelentés dátuma	EA-MLA aláíró által akkreditált szervezetek száma
2019	38
2020	50
2021	72
2022	74
2023	74
2024	84

Látható, hogy 14 nemzeti akkreditáló testületre vetítve a 84 szervezet 6 akkreditált szervezetet jelentene átlagosan.

4 A REFERENCIAANYAGOK FELHASZNÁLÁSA

4.1 Az EA-4/14 INF:2003 és az Eurachem útmutató

Az EA az EA-4/14:2003 informatív dokumentumban [13], míg az Eurachem az EEE/RM/062rev3 [14] tette közzé az RM/CRM kiválasztási és felhasználási útmutatót, mely foglalkozik a saját készítésű anyagminták készítésével és használatával is. Fontos megjegyezni, hogy ezek a „házon belüli” anyagminták nem képezik részét a metrológiai visszavezetethez igazolásának. Az útmutató sajnos elavult, frissítése folyamatban van, új kiadása hamarosan várható.

4.2 Az Európai Bizottság Közös Kutatóközpontjának alkalmazási útmutatói

A Joint Research Centre [15] számos szakmai támogató dokumentumot készített és tett közzé, melyek közül többet az EU minden hivatalos nyelvén, így magyarul is közzé tett. Ezek nem kötelező érvényű dokumentumok, de az anyagok kiválasztásában, az eredmények, dokumentumok jobb megértésében segítik a felhasználókat.

Az Application Note 3 kifejezetten az RM-ek metrológiai visszavezethetőség igazolásában betöltött szerepét mutatja be, de sajnos az a dokumentum is elavult (2008-as), és még az ISO/IEC 17025:2005-ös kiadását hivatkozza.

Az Application Note 9 pedig a „(Hiteles) anyagminták kiválasztása”, mely 2020-ban került kiadásra, és felhívja a felhasználók figyelmét a „tisza anyag” és „mátrix alapú” CRM-ek alkalmazási különbségeire, mely azt jelenti, hogy a metrológiai visszavezetethez mindkét CRM-féle esetén igazolt, ugyanakkor a teljes vizsgálati folyamat (és a mintaelőkészítés) igazolásának eszköze elsődlegesen mátrix alapú kell hogy legyen.

4.3 Az ISO/IEC 17025 követelményei

A NAH által akkreditált szervezetek több mint fele az MSZ EN ISO/IEC 17025:2018 [16] szabvány szerint akkreditált a NAH szakmai beszámolója alapján [17].

A metrológiai visszavezetethez láncban (vö. VIM 3 2.42.) a kalibrálólaboratóriumok általában magasabban állnak, és nem CRM-ekkel, hanem etalonok és további kalibrálók révén kapcsolódnak a referenciákhoz, míg a vizsgálólaboratóriumok – és a mintavevő szervezetek egy részének esetében – (összesen 433 akkreditált szervezet) a MSZ EN ISO/IEC 17025:2018 szabvány 6.5.2. szakasza szerint a visszavezethetőség biztosításának eszközei között szerepel: a kompetens gyártó által gyártott tanúsított referenciaanyag, a kompetens kalibrálólaboratórium által végzett kalibrálás és a közvetett/közvetlen összehasonlítás megvalósítása nemzeti/nemzetközi etalonra (például hitelesítés útján).

Kompetens gyártó alatt a szabvány az ISO 17034 követelményeit kielégítő referenciaanyag-gyártókat tekinti, míg tanúsított referenciaanyag alatt az ISO/IEC 17025 által is hivatkozott ISO 17034 fogalmai alkalmazandók.

Ki kell emelni, hogy a szabvány csak a metrológiai visszavezethetőséggel kapcsolatban említi a tanúsított referenciaanyag fogalmát, mindenütt máshol (pl. berendezések, verifikálás, validálás, eredmények érvényességének biztosítása) a referenciaanyagok meghatározást használja.

A metrológiai visszavezethetőséggel kapcsolatos követelmények pontosítása a szabvány A mellékletében található, mely tájékoztató melléklet kiter a metrológiai visszavezethetőség kialakítására és bizonyítására is.

4.4 Az ISO 15189 követelményei

Az orvosi vizsgálólaboratóriumokra vonatkozó rendszerszabvány [18] 6.5.1. követelményei szerint maguknak az orvosi vizsgálólaboratóriumoknak kell meghatározniuk a visszavezethetőséggel kapcsolatos szabályzatukat. A szabvány 6.5.3. szakasza az ISO/IEC 17025 szabványhoz hasonlóan a metrológiai visszavezethetőség bizonyítékának tekinti a kompetens kalibrálólaboratórium kalibrálási szolgáltatása mellett a kompetens gyártó által gyártott CRM-eket is. Itt a szabvány hivatkozza a már ismertetett ISO 17034-et, illetve további eshetőségként beemeli az ISO 15194 szabvány [19] követelményeinek megfelelő tanúsított anyagmintákat is, melyek megfelelőnek tekinthetők.

A szabvány – mivel ezen a speciális területen gyakran előfordulhat – további lehetséges eszközöket is megenged a metrológiai visszavezethetőség igazolására, amennyiben a fenti eszközök nem elérhetőek. Ezek elsősorban referenciamódszerek használatát, vagy már mérési eljárás alkalmazását teszik lehetővé az ISO 17511 szabvány [20] követelményeivel összhangban. Az ISO 17511 már a nemzetközi előszóban is kiemeli, hogy a „a humán minták végleges jelentett értékének a legmagasabb rendű elérhető referenciáig metrológiailag visszavezethetőnek kell lennie”. A megfelelő referenciaanyagokat többek között a már hivatkozott JCTLM adatbázisa [9] tartalmazza.

5 A GYÁRTÓ SZEMSZÖGÉBŐL

A gyártóknak az ILAC-P10 és a NAR-36 előírásai szerint kompetensnek kell lenniük, amelynek egyik eszköze az akkreditálás. Az ILAC-P10:07/2020 korábban már hivatkozott 2.5 pontja és a NAR-36 4.1.6. pontja szerint a megfelelő CRM kompetens gyártótól kell hogy származzon, így megfelelőek a „Referenciaanyag-gyártó (RMP) által előállított tanúsított referenciaanyagok (CRM), amely tevékenységre az RMP akkreditált az ILAC MRA vagy az ILAC által elismert Regionális Megállapodás hatálya alá tartozó akkreditáló testület által.”

Fontos megjegyezni, hogy az akkreditált gyártók számának változása önmagában nem jelzi a referenciaanyagok felhasználásával kapcsolatos, jelentősen növekvő igényeket.

5.1 Az első hazai akkreditálási kérelem

Az első akkreditálást kérelmező szervezet a Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal Élelmiszerlánc-biztonsági Laboratórium Igazgatóság Radioanalitikai Referencia Laboratórium (NÉBIH-RRL), mely honlapjuk [23] szerint több évtizede készít referenciaanyagokat/tanúsított referenciaanyagokat. 2005 óta a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) együttműködő laboratóriuma a referenciaanyag-gyártás területén.

A szervezetnél már az 1990-es évektől készítenek anyagmintákat, elsősorban jártassági vizsgálatokhoz és körvizsgálatokhoz. Az ezredfordulón mérőeszközök kalibrálásához használt cézium és stroncium

anyagmintákat készítettek, 2001-ben jelzett tejpor (RA-U-2001) anyagmintát is.

A NÉBIH a több mint két évtized alatt számos referencia-anyagot készített, többségében saját laboratóriumainak anyagmintaként radionuklid területen, de 2020-ban már elkészült az első (DON) mikotoxin anyagminta is. Ettől az akkreditálási eljárástól és folyamattól függetlenül akkreditált vizsgálólaboratóriumként, az MSZ EN ISO/IEC 17025:2018 szabvány követelményeinek megfelelő irányítási rendszert is működtetett akkreditáltan.

A NAH és A NÉBIH szakmai egyeztetéseket folytatott 2022-től, hogy emeljék felkészültségüket, és kölcsönösen megfeleljenek a vonatkozó akkreditálási követelményeknek.

A NAH a kérelmezett műszaki terület ismeretében a nemzetközi mintáknak megfelelően kezdte meg a belső személyzet és a minősítők képzését.

Az akkreditálás értékelési szakaszába a vezető minősítő mellett egy toxikológiai és egy radioanalitikai szakterületen jártas független szakértő került bevonásra, akik első lépésként értékelték a benyújtott dokumentációt és elkészítették az akkreditálás nemzetközi normáinak megfelelően a szemleterv alapjául szolgáló „lefedettség” dokumentumot.

A helyszíni szemle során megfigyelésre és értékelésre került a konkrét tevékenység elvégzése, a referenciaanyag-gyártás lépéseinek gyakorlati megvalósítása, kompetenciák és erőforrások rendelkezésre állása, valamint az irányítási rendszer működtetése.

Az értékelési szakaszba bevont szakértők 2024. március közepén fogalmazták meg javaslatukat az akkreditált státusz odaítéléséről.

Az értékelési szakasz követően a döntési szakaszba bevont független opponens elkészítette az eljárás elvégzéséről a szakvéleményét, melyben megfelelőnek ítélte az értékelési szakaszt, a Nemzeti Akkreditáló Hatóság elnökhelyettesének döntését követően eredményeként kiadásra került az akkreditálási státusz odaítéléséről szóló határozat. 2024. március 22-én reggel megjelent a kapcsolódó hír [21] a NAH honlapján.

5.2 A második hazai akkreditálási kérelem

Érdeklőség, hogy a döntés napján érkezett egy informális jelzés, hogy újabb referenciaanyag-gyártó szervezet készül akkreditálásra, azóta a kérelmet a NAH befogta, az eljárást lefolytatta, és az akkreditálási státusz odaítéléséről szóló döntés megszületett.

6 AZ AKKREDITÁLÁS SZEMSZÖGÉBŐL

Gregász [24] munkájából arra lehetne következtetni, hogy a már a NAH jogelődje, a Nemzeti Akkreditáló Testület (NAT) is felkészült volt referenciaanyag-gyártók akkreditálására, de végül nem akkreditált referenciaanyag-gyártót, és a nemzetközi követelmények, szabályozások is többször változtak azóta.

A NAH akkreditálási eljárásának jogszerűségi kritériuma, hogy a NAH jogszabályban legyen felhatalmazva a feladat elvégzésére. Ezt a felhatalmazást a 2015. évi CXXIV. törvény [25] 5§ 1. bekezdés i) pontja adja meg.

A Nemzeti Akkreditáló Hatóság első lépésben a kompetenciakövetelményeket meghatározó szabályzatot készítette el (NAR-06-07 melléklet), a kategóriára vonatkozó akkreditálási programmal (NAR-01-11 melléklet) és akkreditálási kérelem (NAD-103-REF) dokumentummal együtt.

A szabályozás frissítése 2022-ben vált esedékessé, ekkor az volt a cél, hogy a rugalmas terület pontosabb szabályozásával, a NAH-ban lévő metrológiai kompetenciát felhasználva úgy kerüljön frissítésre a szabályozás, hogy a kérelmezők igényének kielégítése mellett feleljen meg a vonatkozó követelményeknek és trendeknek.

A szabályozás kialakításánál az ISO/IEC 17011 [23] 7.8.3. pontját, a vonatkozó [24] kormányrendelet 13. § (1) f) pontját, illetve az ILAC-G18 [25] Appendix D mellékletét vette a NAH figyelembe. Utóbbi követelmények megegyeznek az ILAC-G18:01/2024 [26] követelményeivel, így 2024-ben, a *guide* frissítése miatt nem volt szükség a szabályzatok módosítására.

A dokumentumok kialakításakor a NAH figyelembe vette a nemzetközi példákat, mint EA által is elismert jó gyakorlatokat.

2022-ben jelent meg a NAR-01-11. mellékletének 2. kiadása (2022.09.08.) valamint a NAD-103 akkreditálási kérelem 7. kiadás (2022.09.08.) is. A NAR-01-11 ekkori kiadása már szabályozta és megengedte a rugalmas műszaki területre történő akkreditálást a referenciaanyag-mátrix, vagy a minősített jellemző tekintetében.

Az akkreditálási eljárás egyéb tekintetben a NAR-01 szabályzat [30] általános követelményei szerint zajlott.

A Nemzeti Akkreditáló Hatóság a referenciaanyag-gyártó szervezetek kategóriában ugyan még nem szerepel az EA MLA aláírói között, hiszen nem tudott bemutatni tevékenységet kérelem hiányában, de a két hazai szervezet akkreditációja lehetővé teszi a kölcsönös elismerési státusz aláírási folyamatának jelen kategóriával történő bővítés elindítását. A jelenleg akkreditált szervezetek listája a NAH honlapján [22] elérhető.

7 VISSZAJELZÉSEK AZ AKKREDITÁLÁSI ELJÁRÁSSAL KAPCSOLATBAN

Egy-egy új akkreditálási kategória bevezetése különös többletfigyelmet és -munkát igényel mind a Nemzeti Akkreditáló Hatóságtól, mind az akkreditált szervezettől, így különösen fontos a visszajelzés és a tapasztalat, hiszen ezek beépítése a folyamatinkban teszük stabilabbá, átláthatóbbá és a gyorsabbá a további kérelmek szerint elvégzendő akkreditálási eljárásokat.

7.1 Formális visszajelzések

Az akkreditáltaktól a NAH az ASZEK [31] közvetítésével vár visszajelzést, de ilyen az érintett eljárásokban nem érkezett.

A hatósági (és akkreditálási) munka minőségértékelése eleve nehezen kivitelezhető és problematikus [32], és az akkreditálási folyamat különböző érdekelt feleinek is az igényei igen szerteágazóak, olykor ellentétesek.

A NAH éves beszámolója szerint [17] az akkreditált szervezetek értékelése alapján a magas vevői elégedettség

szint fenttartása folyamatos, valamint a belső munkatársak elégedettsége is 95 % feletti.

7.2 Informális visszajelzések

Informális visszajelzések (konferenciák előadásai) alapján a szervezet összességében elégedett az eljárás lefolytatásával.

7.3 Belső audit

Érdemi külső visszajelzés hiányában a NAH belső kontrollrendszere fontos szerepet kapott az első akkreditálási eljárás értékelésében.

A NAH az MSZ EN ISO/IEC 17011:2018 szabvány követelményeivel összhangban szervezi az irányítási rendszerének felülvizsgálatát. A szabvány 9.7 pontja szerint legalább évente belső auditot kell végezni, és az auditprogram figyelembe vesz kockázati szempontokat is. Egy új akkreditálási kategória első eljárása kiemelt kockázatot hordoz, így a belső auditja sem maradhatott el.

A megállapítások kivizsgálása belső (elnöki) utasításban szabályozott. A 17011 és a 8D módszer elemeinek összevetését az 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: Az ISO/IEC 17011 és a 8D kapcsolata

Leírás	8D	ISO/IEC 17011
az auditor megállapítása	D0 a probléma észlelése, 8D indítása	--
kivizsgálásért felelős	D1 a probléma megoldó csapat	---
részletes információk a megállapítással kapcsolatban	D2 a probléma leírása	9.5. a) nemmegfelelőségek azonosítása
azonnali intézkedések	D3 azonnali intézkedések	9.5. c) a nemmegfelelőségek helyesbítése
gyökérok-elemzés	D4 gyökérok-elemzés	9.5. b) a nemmegfelelőség okainak meghatározása
szükséges intézkedések	D5 intézkedések bevezetése	9.5. d) a nemmegfelelőségek ismétlődését megakadályozó tevékenységek szükségességének kiértékelése 9.5. e) a szükséges tevékenységek meghatározása [...] kellő időn belül

Leírás	8D	ISO/IEC 17011
határidő, felelős	D6 intézkedések ellenőrzése	9.5. e) a szükséges tevékenységek [...] bevezetése kellő időn belül 9.5. g) a helyesbítő tevékenységek eredményességének átvizsgálása
szükséges intézkedések	D7 következtetések, szabványosítás	9.5. f) az elvégzett tevékenységek eredményeinek rögzítése
visszaellenőrzés és eredményközlés felelőse, visszaellenőrzés dátuma	D8 értékelés, összefoglalás	9.5. g) a helyesbítő tevékenységek eredményességének átvizsgálása

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] <https://mkeh.gov.hu/meresugy/hasznos/metrology>
- [2] 1991. évi XLV. törvény a mérésügyről
- [3] 127/1991. (X. 9.) Korm. rendelet a mérésügyről szóló törvény végrehajtásáról
- [4] VIM 3 Nemzetközi Metrológiai Értelmező Szótár (ASZEK)
- [5] MSZ EN ISO 17034:2017
- [6] ILAC-P10:07/2020
- [7] ILAC-P10:01/2013
- [8] <https://www.bipm.org/kcdb/>
- [9] <https://www.jctimdb.org/#/app/home>
- [10] https://www.nah.gov.hu/hu/oldal/NAR_Dokumentumok/
- [11] <https://ilac.org/?ddownload=126085>
- [12] <https://european-accreditation.org/information-center/newsroom/promotional-materials-2/>
- [13] <https://european-accreditation.org/wp-content/uploads/2018/10/ea-4-14-inf-rev00-february-2003-rev.pdf>
- [14] <https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/EEE-RM-062rev3.pdf>
- [15] <https://crm.jrc.ec.europa.eu/e/132/User-support-Application-Notes>
- [16] MSZ EN ISO/IEC 17025:2018
- [17] <https://www.nah.gov.hu/hu/oldal/szakmai-beszamolok/>
- [18] MSZ EN ISO 15189:2023
- [19] MSZ EN ISO 15194:2009
- [20] MSZ EN ISO 17511:2021
- [21] <https://www.nah.gov.hu/hu/hirek/lezarult-az-also-hazai-referenciaanyag-gyarto-szer/>
- [22] https://www.nah.gov.hu/hu/szervezet-kereses?search=&valid=true&suspended=true&withdrawn=false&category_slug=referenciaanyag-gyarto--reference-material-produce
- [23] <https://portal.nebih.gov.hu/-/referenciaanyag-gyarto-eloallito-tevenyseg>
- [24] Gregász, T. (2014). Szabványos minőségmenedzsment rendszerek működési elvei, Nemzeti Közszerzői Egyetem
- [25] 2015. évi CXXIV. törvény a nemzeti akkreditálásról
- [26] MSZ EN ISO/IEC 17011:2018
- [27] 424/2015. (XII. 23.) Korm. rendelet a Nemzeti Akkreditáló Hatóságról és az akkreditálási eljárásról
- [28] ILAC-G18:12/2021
- [29] ILAC-G18:01/2024
- [30] https://www.nah.gov.hu/hu/oldal/NAR_Dokumentumok/
- [31] <https://aszek.hu/hirek/ertekek-velemenyezese-osszefoglalok/ertekele/>
- [32] Kaiser, T. (2014). Hatékony közszolgáltatás és jó közigazgatás – nemzetközi és európai dimenziók, Nemzeti Közszerzői Egyetem

8 ÖSSZEGZÉS

A NAH minősítői a helyszíni szemlék során kiemelt figyelmet fordítanak adott akkreditálási kategóriákban a metrológiai visszavezethetőség követelményének igazolására és dokumentálására.

Fontos a használt CRM/RM-ek tudatos kiválasztása, a vonatkozó vizsgálati szabványok, előírások, útmutatók ismerete, a megfelelő fogalomhasználat.

Ki kell emelni, hogy a metrológiai visszavezethetőség (a törvényes metrológiai eszközök és a kalibrálás mellett) csak valódi CRM-mel igazolható, RM-mel nem, ugyanakkor az RM-ek, saját készítésű anyagminták is alkalmazhatóak, pl. ellenőrző anyagként, oldatként, vagy kísérő/belső standardként, ha az adott vizsgálati szabvány másképp nem rendelkezik.

Emellett az RM-ek széleskörűen használhatóak belső minőségbiztosításra, kontrollmintaként, illetve alkalmasak ismételt mérések/vizsgálatok elvégzésére, vagy személyek közti laboratóriumon belüli összemérés kivitelezésére.

A referenciaanyag-gyártókkal együttműködve szükséges az akkreditált szervezetek edukálása. Fejlesztendő terület a fogalmak megfelelő használata, hogy megfelelő célra megfelelő anyagmintát használjanak a szervezetek.

A NAH gondoskodik a minősítők kompetenciájának fenntartásáról, míg az akkreditált szervezeteknek is lehetősége van szakmai képzéseken részt venni. Például a szerző egy nemzetközi referenciaanyag-gyártó felkérésére tartott már előadást „A referenciaanyagok jelentősége a kémiai analízisben” elnevezésű webináriumon, 2023 szeptemberében az akkreditáltak részére is tartottak képzést, és a témával kapcsolatban további képzések is várhatók.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm a NAH vezetőinek segítségét.

Etalonok és hitelesség jelölése mérőeszközökön

Standards and marking of legal verification on measuring instruments

Kóhalmi Erika

Magyar Mérésügyi Egyesület „1874”, Magyarország, Budapest
metrologia1874@gmail.com

Összefoglalás — Az olvasó rövid áttekintést kap, miként jelölték az etalonokat és tanúsították a mérőeszközök hitelességét Magyarország területén a különböző történelmi korokban. Mi a jelentősége, melyek az ismérvei a hitelesítési bélyegzésnek és milyen kutatás kapcsolódik a témához?

Kulcsszavak: hitelesítés, etalon, jelölés, pecsét

Abstract — In the following article a brief overview can be read of how the standards were marked, how the accuracy of measuring instruments was certified in Hungary throughout different historical periods, and what the significance and characteristics of certification marking are, and what research is related to the topic.

Keywords: verification, measurement standard, sign, stamp

Történelmi időkre visszatekintve, a métermérték megjelenése előtt számos mértékegység, s ezáltal mérőeszköz volt használatos valamennyi országban. A mérések szabályozásra pedig szükség volt ellenőrizhető, a szabályoknak megfelelő eszközökre, melyeket hivatalos jelöléssel kellett ellátni.

1622-ben Erdélyben az országgyűlés az alábbiak szerint határozott: „minden városbeliek vékájokat, eyteleket és vedreket, szit. Matgit asszony napra, városok pecsét előtt ad revidendum Feérvárott prezentálják.” [1]

Marosszéken: „Véka, Ejtél sütésről. Fontmérésről. Minden faluk vékát, ejtelt, úgy minden mészáros fontot V. Tiszt atyánkfiaival süttesenek, sub poena ft. 12, hogy az egész székben Rendek egy mértékkel éljenek.” [2] A „süttetés” a hitelesítő pecsét beégetését jelentette.

Franciaországban 1649-től vezették be a hitelesített eszközök jelölésére a kézfogást ábrázoló pecsétet (1. ábra). A kölcsönös bizalom és jóhiszeműség jelképe különösen fontos lehetett az üzleti és kereskedelmi tranzakciók megkötésekor. „A kézfogás, mint pecsét segíthetett abban, hogy a hivatalos mérések érvényességét és megbízhatóságát kommunikálják a közönség felé.” [3]

A magyarországi bélyegzések közül is számosat ismerünk. Szimbolikájukban végigkísérhetjük a különböző történelmi időszakokat. Legfőbb jellemzőjük, hogy utalnak az etalon vagy mérőeszköz elfogadásának időpontjára. Budavár fontkészletén látható bélyegzés 1798-ból külön lenyomattal jelzi az évet és egy másikon a vár szimbolikus képe, valamint előtte egy folyó – a Duna – látható (2. ábra). Gyakori volt még a hármaskorona álló kereszt jelölés is, majd megjelent a korona szimbólum.



1. ábra: Kézfogást ábrázoló pecsét



2. ábra: Budavár fontkészlete, 10 lbs [4]

A Kereskedelemügyi M. Kir. Minister 1908. évi 107225. számú rendelete az 1907. évi V. T.-cz. alapján HITELESÍTÉS ALÁ BOCSÁTHATÓ MÉRTÉKEK ÉS MÉRŐESZKÖZÖK KELLÉKEI, HIBAHATÁRAI, AZOKON ALKALMAZANDÓ HITELESÍTÉSI BÉLYEGEK ALAKJA TÁRGYÁBAN megjelent utasítás 175. §-a, a napjainkban használatos bélyegzéshez teljesen hasonló bélyegzőlenyomatot írt elő.



3. ábra: Átmeneti és időszakos hitelesítési bélyegző

Érdekesség, hogy a koronás bélyegzőt csak az első hitelesítéshez használták. Az időszakos hitelesítésre minden évben változó – görög betűjelet és alatta egyéni számot kellett alkalmazni. A jelet évenként a Magyar Királyi Mértékügyi Intézet állapította meg (3. ábra).

Az 1874. évi VIII törvénycikk alapján elbírálendő eszközöket átmeneti bélyegzéssel látták el, mely felül a 74 számot alul pedig a hitelesítő egyéni számát tartalmazta. „A m.kir. mértékügyi intézet bélyege a koronából és két csillagból állt.” [5] (4. ábra).



4. ábra: Fonalsúlyon lévő bélyegzések

1920-21-ben jelent meg először a címerpajzsos szimbólum a korona helyett (5. ábra). A Magyar Népköztársaság kormányának 5746/1918. „a magyar köztársaság címeréről és az állampecsétről” szóló rendelete kimondja: „A címerpaizson nyugvó királyi korona és a hármás halom középső részén volt nyílt korona elmarad [...] A címerpaizs körvonalai legyenek egyszerűek [...] díszítések alkalmazása megengedett, de nem kötelező.” 1922-től ismét a stilizált korona szimbólum szerepelt a hitelesítő bélyegzőkön, alatta az egyéni számmal. Jellemzően az évszám külön bélyegzéssel került jelölésre.

1945-től a korona helyét átvette a Kossuth-címer, majd 1950-ben a búzakalász-kalapács szimbólum utalt az ország ipari és mezőgazdasági fő gazdasági irányára, és megjelent az ötágú csillag szimbólum is. 1950-ben visszatért a Kossuth-címerpajzs, majd 1957-ig ismét a búzakalászos jelölés volt érvényes. 1957-58-as években visszatérő Kossuth-címerpajzs-jelölés helyét 1958-tól átvette a stilizált háromsávos címerpajzs, felette az ötágú csillaggal.

1991-től – az eredetileg javasolt egyszerűsített állami címer helyett – napjainkig használatos bélyegzés került elfogadásra: körkeretben a Szent Korona stilizált jele, a Szent Korona két oldalán a hitelesítés évének két utolsó számjegye és a Szent Korona alatt középen a hitelesítő azonosító jelölése. Érdekesség, hogy a közel 80 évig használt szimbólumok



5. ábra: Címerpajzsos szimbólumok

1909-től a bélyegzés rajzolata: a középen lévő – korona, címerpajzs stb. – szimbólumok mellett két oldalon a hitelesítés évszámának utolsó két számjegye szerepel, alatta pedig a hitelesítő egyéni száma, mely mint egy névjegy, beazonosítja a hitelesítési feladatot ellátó személyt. A hitelesítési bélyegzők kiadásáról szigorú nyilvántartás készül minden évben, így pontosan visszakövethető, hogy kihez köthető a hitelesítési feladat ellátása.

A bélyegzőlenyomatokat az egész világon nyilvántartják és kutadják. Európa legnagyobb hitelesítéssel foglalkozó kiadványa, a több 100 oldalas Europäische Eichzeichen (EEZ) [6] szerzői arra vállalkoztak, hogy összegyűjtsék az összes európai hitelesítési bélyegzet, és azokat dokumentálják. Az EEZ (Special Issue 14) a Measures & Weights és nemzetközi testvér szövetségei által összeállított, illetve azonosított összes európai kalibrációs jel teljes munkája. A kompendium tartalmazza az összes ismert európai kalibrációs jelet a XVI. századtól napjainkig. Ha az olvasó egy kalibrációs szimbólumot szeretne azonosítani egy mérlegen vagy súlyon, akkor itt jó eséllyel megtalálja ezt a szimbólumot. Az EEZ a közel 300 tagot számláló Weights & Measures közel 30 éves kutatásának összegyűjtött tudását, valamint a nemzetközi testvér szövetségek kutatási eredményeit tartalmazza. Vásárlásával egyben nonprofit egyesületünk munkáját és a kizárólagos gazdasági övezet jövőbeni bővítését is támogatja. A munkát a metrológiai egyesületek tagjai 1986 óta állítják össze és bővítik. A szerzők Gregor Linkenheil és Claus Borgelt.

Magyarországi bélyegzések 2011-ig összesen 3 oldalt tettek ki, köszönhetően Gyarmati Béla munkájának, aki az Országos Mérésügyi Hivatal munkatársa volt. 2011-től ezt a kutatómunkát dr. Harmath Zoltán vette át.

Dr. Harmath Zoltán a BME-n, Villamosmérnöki Karon Műszer- és Szabályozástechnikai szakon végzett. Az egyetemen a mérésügyhöz közelebb hozták a mérés- és automatika laboratóriumban tanult tárgyak. A BME elvégzése után az ELTE-re került, ahol informatikával foglalkozott és tanított. A programozás, programnyelvek, operációs rendszerek oktatása mellett lehetősége volt a matematika-fizika szakos hallgatóknak az informatika gyakorlatába is betekintést nyújtani a metrológiai alapok és a számítógéppel vezérelt mérések (pl. sebesség, gyorsulás, súly mérése) megtervezésével és kivitelezésével. Az ELTE-n sok lehetősége nyílt a KFKI megbízásából mérésügyi szoftvereket fejleszteni (pl. CAMAC-BASIC (a kísérleti atomreaktorral végzett kutatások informatikai támogatása céljából fejlesztett BASIC interpreter CAMAC interfésszel), IMA (Intelligent Mössbauer Analizator stb.)). Később ebből a témából doktorált.

A 80-as években Svájcban talált rá az első óramérlegre, melyet megjavított és felújított. Ezek a nem hitelesíthető – lakásdíszként is kezelt – mérlegek lettek gyűjtői szenvedélyének tárgyai. A gyűjteményét képező 208 darab mérleg mellett sok mérlegsúlytal is találkozott, ezenkívül érdeklődését felkeltették a különböző hitelesítési bélyegzések. „Nagyon megfogott a – sokszor csak néhány négyzetmilliméter területen beütött – bélyeg sokszínűsége, kifejező ereje. Az is fantasztikus, mennyire visszatükröződik a bélyeg megjelenésében a történelem! Sok bélyeg grafikája híven tükrözi a politikai, társadalmi

változásokat, s egyes esetekben ez támpontot adhat az évszámot nem tartalmazó bélyegek azonosításánál.” [7]

Kutatómunkája eredményeként a Europäische Eichzeichen katalógus már 7 oldalon mutatja be a magyar bélyegzéseket.



6. ábra: Europäische Eichzeichen katalógus – részlet

A hitelesítésre szolgáló bélyegzők fémbeütő-, később fémnyomóbélyegzők voltak, és egészen napjainkig használatosak. Az évenként készülő, évszám és egyéni szám jelölésű bélyegzőket manufaktúrában, vésnőkök gyártják. Az egyediség – a kézi munka miatt, erős nagyításban felfedezhető eltérések – különösen fontos, mert a visszaélések, hamisítások bizonyításánál bírósági eljárásokban bizonyító erővel bírnak.



7. ábra: Fémbeütőbélyegzők

Különleges bélyegzések: hordók jelzésére égető-billogokat alkalmaztak, külön-külön a hitelesítési és az évszámbélyegzőt, valamint a hordó úrtartalomra szám- és betűbillogokat.

Üvegtárgyak jelzéséhez foszforsavba mártott gumibélyegzőt használtak, vagy homokfúvással vitték fel a mérték- és hitelesítési jelet (8. ábra). Öntött üvegtárgyakba gyártás során került a bélyegzés.



8. ábra: Üveg bélyegzése

A XX. század végén a fém bélyegzéseken kívül megjelentek a különböző hitelesítést tanúsító matricák is, melyek önmagukban vagy a plombás bélyegzés mellett információtartalmuk miatt használatosak. A sorszámozott, szigorú elszámolású levonóképes bélyegzők több különleges biztonsági elemmel készülnek a hamisítások megelőzése érdekében.

A Magyarországon mindenkor érvényes, hitelesítési jelöléseket a mérésügyről szóló 1991. évi XLV. törvény a végrehajtására kiadott 127/1991. (X. 9.) Korm. rendelet 3. számú melléklete tartalmazza.

Az új ipari-technológiai fejlesztések és a nemzetközi szabályozások folyamatos változást hoznak a hitelesség jelölésében is. A változások nyomán követése és a régi mérőeszközökön még felbukkanó különleges jelzések gyűjtése további kutatómunka alapja lehet.



9. ábra: Réz lemezre készített nagyított bélyegzőkép

A Magyar Mérésügyi Egyesület „1874” a méréstörténetének bemutatása mellett külön figyelmet fordít a régi mérőeszközökön található bélyegzőlenyomatok gyűjtésére és közkinccsá tételére. Két fotógyűjteményt tekinthetnek meg az érdeklődők:

1. https://drive.google.com/drive/folders/1WlgvshFT0kFgv7HQpdTmiwUsoRIsiQr4?usp=drive_link az MME 1874 múzeumában megtekinthető tárgyakon lévő bélyegzések
2. https://drive.google.com/drive/folders/1nQaUhlseOTaB1gj73IeyvrYdu05Wllt?usp=drive_link bélyegzőlenyomatokról rézlemezre készített nagyítások (9. ábra). (Kárpáti István munkája).

Méréstörténeti Kiállítás

Gyűjteménygazda:

Magyar Mérésügyi Egyesület „1874”

Cím:

1124 Budapest, Németvölgyi út 37-39.

Előzetes bejelentkezéssel látogatható:

+36/20-43-44-199

Állandó nyitvatartási napok:

- Metrológiai Világnapon május 20-án
- Múzeumok éjszakája 17:00-23:00
- Kulturális Örökség Napjai minden év szeptemberének harmadik hétvégéje 10:00-17:00

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Erdélyi Országgyűlési Emlékek. VIII. 99. „ad revidendum” – vizsgálatra benyújtani
- [2] ÖRÖKSÉGÜNK III. évfolyam (2009) 4. szám
- [3] Gregor Linkenheil: Eichzeichencaus Frankreich von 1800 bis 2000)
- [4] Méréstörténeti Kiállítás – Magyar Mérésügyi Egyesület 1874
- [5] Az 1907. évi V. T.-cz. s a végrehajtására vonatkozó rendeletek és utasítások II. füzet.
- [6] EEZ (Special Issue 14)
- [7] Idézet - dr. Harmathy Zoltántól

Hőelemek inhomogenitásának meghatározása Curie-pontos módszerrel

Determination of the thermocouple inhomogeneity using the Curie point method

Turzó-András Emese, Németh Tibor és Szögi Antal

Budapest Főváros Kormányhivatala – Metrológiai és Műszaki Felügyeleti Főosztály (BFKH MMFF)

turzo-andras.emese@bfkh.gov.hu

Összefoglalás — Magas hőmérsékletű (200 °C és 1100 °C között) hőmérsékletméréseknél használatos hőelemek esetében fontos a fokozott hőigénybevétel miatt jelentkező inhomogenitás kimutatása, mert jelentősen növelhető a mérések pontossága és csökkenthető a mérési bizonytalanság. A nemesfémű előállított szabványos hőelem-szál mentén az inhomogenitás meghatározására Curie-pontos módszert használtunk, amely fémek ferromágneses tulajdonságán alapul. A kutatási eredmények elősegítik azon ipari folyamatok megbízhatóbbá és hatékonyabbá tételét, amelyeknél a hőmérséklet meghatározó tényező. Ez a munka a 18PRT03 EMPIR projekt keretében valósult meg [1].

Kulcsszavak: hőelem, inhomogenitás, Curie-pont

Abstract — For thermocouples used in high temperature measurements (between 200 °C and 1100 °C), the detection of inhomogeneity due to increased heat input is important because the accuracy of measurements could be significantly increased and the uncertainty could be decreased. The Curie point method, based on the ferromagnetic properties of metals, was used to determine the inhomogeneity along a standard thermocouple filament made of precious metals. The findings of this research will enhance the reliability and efficiency of industrial processes where temperature plays a crucial role. This work was carried out in the framework of the EMPIR project 18PRT03 [1].

Keywords: thermocouple, inhomogeneity, Curie point

1 BEVEZETÉS

A hőmérséklet egyike a tudományos területen és az iparban leggyakrabban mért fizikai mennyiségeknek. A 18PRT03 EMPIR projekt egyik fő célkitűzése a hőmérsékletméréseknél használatos hőelemek jellemző állapotának meghatározása. Az elért eredmények közvetlen hatással vannak egyes ipari folyamatok minőségére, minimalizálva az energiafogyasztást és elősegítve a 200 °C és 1100 °C közötti hőmérséklettartományban működő folyamatok versenyképességét.

A BFKH-MMFF-nek ebben a kutatási projektben való részvételét az elektromos mérések szakterület és a hőmérséklet mérések szakterület szoros együttműködése

jellemezte. Elektromos mérésekhez kapcsolódó jelenség, hogy ferromágneses fémek adott hőmérsékleten (Curie-ponton) elveszítik mágnességüket, amely állandó hőmérsékletet eredményez. A Curie-ponton alapuló új módszert használtuk fel a hőmérsékletmérések szakterületén a hőelemek vizsgálatára.

A hőelem két eltérő Seebeck-együtthatójú huzalból készült vezetékpar, mely huzalok egyik vége össze van hegesztve, ez a melegpont, ahol a hőmérsékletváltozás történik, a fennmaradó két szabad végződés állandó hőmérsékletű hidegpontba kerül.

A hőelem működésének alapja a Seebeck-effektus, amelynek lényege, hogy hőmérséklet-gradiens hatására az anyagban elektromos térerősség jön létre. Fémhuzalban jelentkező elektromos térerősség (E) függ a Seebeck-együtthatótól (S) és a hőmérséklet-gradienstől:

$$E = S(T, M) \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Ha az egyenletet egy (Δx) szakaszra alkalmazzuk, amelyben (S) állandónak tekinthető, akkor megkapjuk a (ΔT) hőmérsékletváltozás által generált (U) elektromos feszültséget:

$$U = E \cdot \Delta x = S \cdot \Delta T \quad (2)$$

A hőelemek teljesítőképessége akkor megfelelő, ha a hőelemszál a teljes hossza mentén azonos fizikai és kémiai tulajdonságokkal rendelkezik. Hő-, kémiai vagy mechanikai igénybevétel hatására a hőelemszál inhomogénvá válik [2].

Rögzített hidegponti hőmérséklet esetén, a hőelem feszültsége elvileg csak a munkavégződés hőmérsékletétől függ. Az inhomogenitás azt okozza, hogy ez az állítás nem lesz igaz, vagyis a keletkezett feszültség függ attól, hogy a hőmérséklet változása a hőelem mely szakaszán következik be. Ha hőmérsékletváltozás hatására a hőelemes áramkör inhomogén szakaszában a többi szakasztól eltérő elektromos feszültség keletkezik, akkor ez mérési hibához vezet.

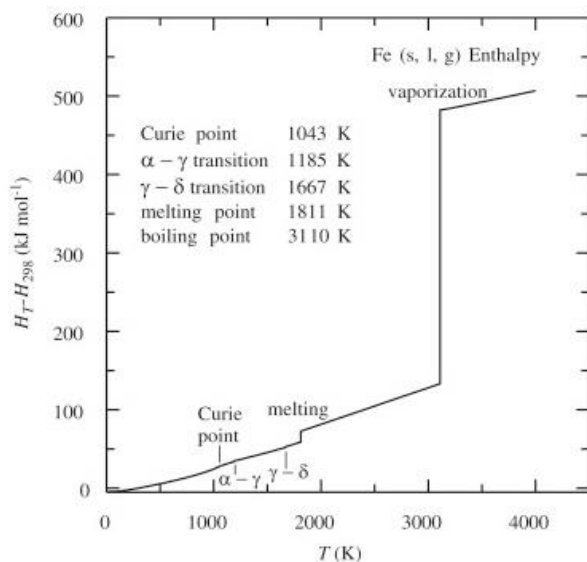
Hőelemek nagy pontosságú, fixpont kemencékben és termosztátokban végzett kalibrálása során, valamint etalon hőelemekkel végzett magas hőmérsékletű nemzetközi körmérések során szükséges az inhomogenitás-tesztek elvégzése. Az erre használatos hagyományos módszer lényege a folyadékos termosztátba merített hőelem bemerülési mélységének változtatása [3]. Ezen módszer hátránya, hogy nehezen megvalósítható. Ezért az iparban helyszíni méréseknél az inhomogenitás veszélyének elkerülése érdekében a hőelem-kötegeket gyakran lecserélik, ezzel biztosítva a mérések minőségének folytonosságát és a termelési folyamatok szabályozásának optimális szinten tartását.

A 18RPT03 EMPIR kutatási projekt fő célkitűzése volt olyan új módszerek kifejlesztése, amelyek lehetővé teszik hőelemek teljesítőképességének minél pontosabb meghatározását.

2 AZ ÚJ MÓDSZER ELMÉLETI ALAPJAI

Hőelemek inhomogenitásának meghatározására kifejlesztett módszer a Curie-pont elvén alapul. A Curie-pont az a hőmérséklet, amelynél egy adott ferromágneses fém elveszíti mágneses tulajdonságait, ezáltal konstans hőmérsékletet hozva létre.

A vas (Fe) Curie-pontját az 1. ábra mutatja be. Egy anyag mágneses szuszceptibilitása (χ) megmutatja, hogy az anyagra ható mágneses tér milyen mértékben mágnesezi át ezt az anyagot.



1. ábra: Ferromágneses anyag Curie-pontja

A mágneses szuszceptibilitás kifejezhető az egységnyi térfogatra eső mágneses momentum (M) és a mágneses tér (H) arányával, valamint meghatározható a Curie-állandó (C) és a Curie-ponti hőmérséklet (T) segítségével.

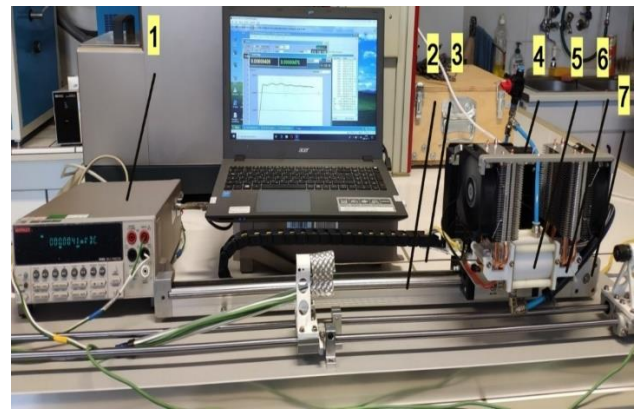
$$\chi = \frac{M}{H} = \frac{M \cdot \mu_0}{B} = \frac{C}{T} \quad (3)$$

Amikor az adott anyag eléri a Curie-ponti hőmérsékletet, a mágneses permeabilitása és ezáltal a felvett energiája is

nagymértékben lecsökken, ami egy állandó hőmérsékleti értéket tartja. Példák különböző ferromágneses anyagok Curie-ponti hőmérsékletére: gadolínium 20 °C, nikkel 360 °C, vas 760 °C, kobalt 1100 °C. Ha a kemence fémtestje ilyen anyagból készül, akkor a Curie-pontjára jellemző tulajdonsága által megvalósul a kemence önszabályozó képessége.

3 HŐELEMENK INHOMOGENITÁSÁT MONITOROZÓ BERENDEZÉS (TIMF) MEGVALÓSÍTÁSA

A hőelemek tesztelésére szolgáló TIMF berendezés (2. ábra) működési elve, hogy a vizsgálni kívánt hőelem (3) hossza mentén mozgatunk egy miniatűr csökemencét (5).



2. ábra: Mérési összeállítás



3. ábra: Ferromágneses fémtest és fűtő tekercs

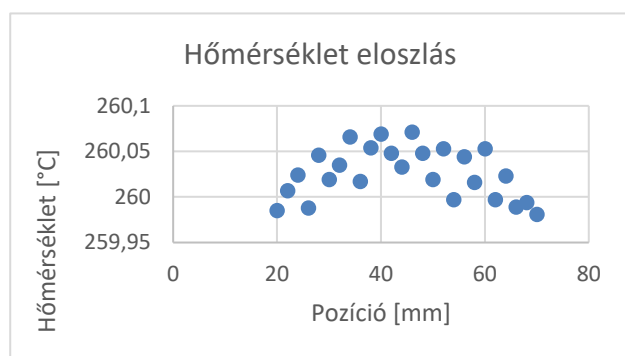
A miniatűr csökemence mozgását léptetőmotor (7) biztosítja egy meghatározott pálya (2) mentén mindkét irányban. A vizsgált hőelem egy multiméterhez (1) kapcsolódik, lehetővé téve a számítógépes adatgyűjtést és a mérések grafikus ábrázolását. A kemence és a hőelem hűtését folyadékos, valamint ventilációs hűtőegységek (4 és 6) biztosítják.

A csökemencétől azt várjuk el, hogy biztosítsa a rajta átfutó hőelem-szakasz stabil és egyenletes hőmérsékletét. E kívánalmak lehető legjobb megközelítésére speciális megoldást választottunk. A kemence magja egy indukciós módon fűtött, ferromágneses anyagból készült fémhenger, tengelyében a hőelemet befogadó átmenő furattal. A kemence a ferromágneses blokk anyagának Curie-pontján üzemel. Ha bármilyen hőt von el a blokkból, és ezért csökken a hőmérséklete, a permeabilitás nőni kezd, és a

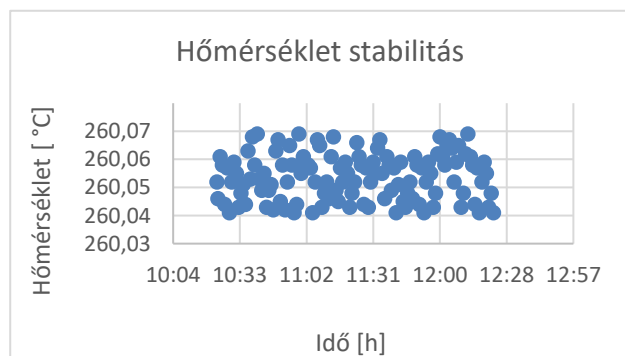
teljesítményfelvétel fokozódik, ezáltal az elvont hő pótlódik.

A csőkemence fémtestjének hossza 50 mm, átmérője 10 mm, furata 2,5 mm (3. ábra), anyaga Invar36, amely 36%-os nikkel ferromágneses ötvözet és Curie-pontja 260 °C-on biztosítja stabilan az állandó hőmérsékletet és a folyamatos önszabályozó működést.

Amint elértük a 260 °C-os Curie-ponti hőmérsékletet, drasztikusan lecsökken a fémtest anyagának permeabilitása, ami által a kemence által felvett energia is, biztosítva az állandó hőmérsékleti platót. Ha a kemence szélei hőt veszítenek, életbe lépteti önszabályozási képességét azáltal, hogy a széleken megnöveli a permeabilitást, kompenzálva az elvesztett hőt. A 4. és 5. ábrán látható, hogy a miniatűr kemence biztosítani tudja a 0,1 °C-os hőmérséklet-eloszlást és a 0,03 °C-os hőmérséklet stabilitást.



4. ábra: Axiális hőmérséklet eloszlás a kemencében



5. ábra: Hőmérséklet-stabilitás a kemencében

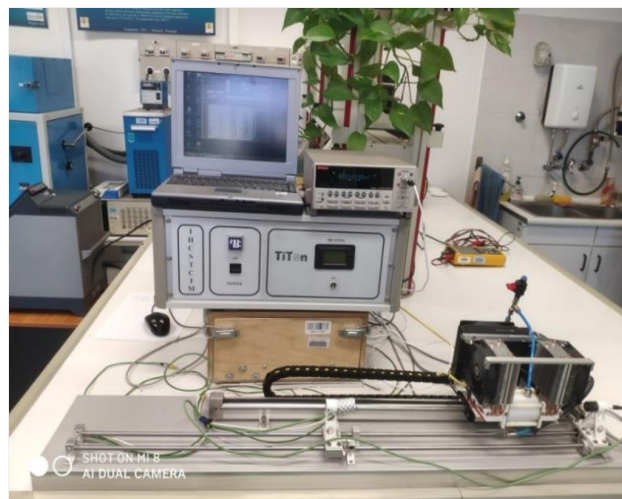
A Curie-pontos jelenséget alkalmazva, az önszabályozó folyamat megvalósításához szükséges az optimális frekvencia-átmérő arány meghatározása, a mi esetünkben az alkalmazott frekvencia 1250 Hz.

A TIMF berendezés úgy viselkedik, mint egy két-gradiensű szkennerek, mivel a hőelemek inhomogenitásának tesztelése a kemence be- és kilépő szakaszán történik, az adott hőmérséklet-gradiens megvalósításával. Ez a hőmérséklet-gradiens a hőelem 4 mm-es szakaszát érinti. A miniatűr Curie-pontos kemence alkalmazásának lényege, hogy biztosítani tudja a pontosan meghatározható méretű és pozíciójú hőmérséklet-gradienst az elemezni kívánt hőelemen.

4 K-TÍPUSÚ KÖPENYHŐELEMENK INHOMOGENITÁSÁNAK VIZSGÁLATA

Az elvégzett mérések egy részénél K-típusú (Cr-Al) köpenyhőelemeket használtunk, amelyeknek magas a szenzitivitásuk és hőállóságuk. A köpenyhőelemek különleges célokra készülnek. A fém védőcsövet, az aprószemcsés kerámia szigetelést és a hőelem huzalokat egy nagyobb átmérőjű egységből hengerlik vékonyabbra. Így egész vékony (0,2 ÷ 8 mm külső átmérőjű), hajlékony hőelemeket is elő tudnak állítani igen nagy hosszban.

A mérések megkezdése előtt a köpenyhőelemet rögzítjük a berendezés pályája mentén. A hőelem vizsgált szakaszán elhelyezünk egy speciális csőkemencét (6. ábra).



6. ábra: TIMF berendezés

A kemence belépő- és kilépő felületén egy pozitív és egy negatív hőmérséklet gradiens jön létre. Amennyiben a két szakasz Seebeck-együtthatója nem egyezik meg, ez a kimenő elektromos feszültségben jelentkezik. A csőkemencét végighúzzuk a hőelemen és begyűjtjük a pozíció függvényében mért elektromos feszültség adatokat, majd a kísérleti úton kapott feszültség görbéből numerikus módszerrel meghatározzuk az inhomogenitás-függvényt. A csőkemence mozgása automatizált, és a hőelem hossza mentén mindkét irányban megvalósítható.

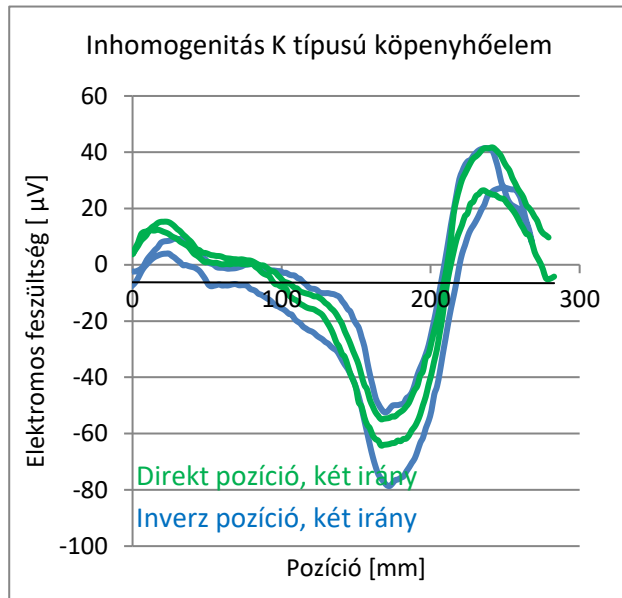
Összekapcsolva és azonos környezeti hőmérsékleten tartva a hőelem melegpontját és hidegpontját, a hőelem által kiadott elektromos feszültség nulla kell hogy legyen. Ebből következik, hogy a hőelem vizsgált szakaszán jelentkező elektromos feszültségváltozást az inhomogenitása okozza. A miniatűr Curie-pontos kemence mozgását, valamint a mérést vezérlő programot és az adatok gyűjtését az ezekre a célokra kifejlesztett szoftverek végzik.

A csőkemencére jellemző egy gyors, 8 perces időtartamú felfűtési idő és képes maximum 2 mm-es átmérőjű köpenyhőelemek vizsgálatára. Az egyes lépéseket követően a hőmérséklet stabilizálódását rövid, 20 másodperces mérési periódusok követik. A hőelem hossza mentén mozgatva a csőkemencét kísérleti úton meghatározható az a diagram, amely az elektromos feszültség változását ábrázolja.

Kezdetben befogjuk a K-típusú köpenyhőelemet a berendezésbe direkt pozícióban, és elvégezzük a hossza mentén az inhomogenitás-vizsgálatot oda-vissza (bal és jobb irány), majd megfordítjuk a hőelemet és inverz pozícióban is végigpásztázzuk oda-vissza.

A TIMF berendezés validálása két feltétel teljesüléséhez kötött. Az egyik feltétel azon mérési eredmények elemzéséből adódik, amelyeket egy adott hőelemen, különböző befogási pozíciókban és tesztelési irányokban végeztünk. A másik feltétel különböző hőelemek méréseinek összevetéséből adódik.

A 7. ábrán látható egy adott K-típusú köpenyhőelemen végzett mérések eredménye.

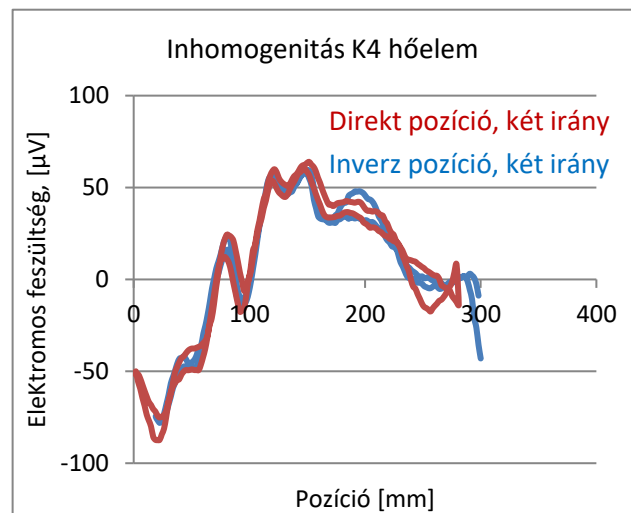


7. ábra: K-típusú köpenyhőelem inhomogenitás mérése

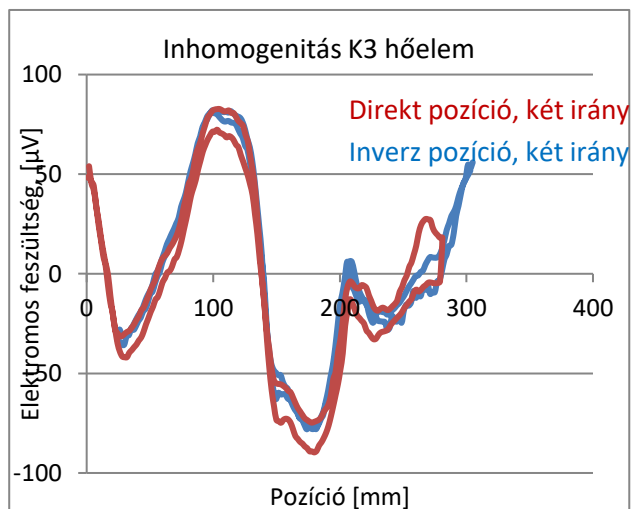
és inverz), és a két különböző tesztelési irányban (bal és jobb) végzett mérések esetén. A második feltétel esetében az ellenkezője elvart, tehát hogy a különböző hőelemek inhomogenitás-görbéinek ne legyen azonos jellegük.

Elemézve a görbék jellegét bármelyik befogási pozícióra vagy tesztelési irányra, jól látható, hogy ezek azonos jellegűek, tehát az első feltételben megfogalmazott elvárásunkat a TIMF berendezés teljesíti.

A 8. és 9. ábrákon két különböző K-típusú hőelemen végzett inhomogenitás-görbék láthatóak, bizonyítva a második feltétel teljesülését is, mivel a két hőelemnek különböző jellegű az inhomogenitás-diagramja, miközben egy adott hőelemre vetítve nem függ annak befogási pozíciójától és tesztelési irányától.



9. ábra: Különböző hőelemek inhomogenitási tesztje



8. ábra: Különböző hőelemek inhomogenitási tesztje

Tekintetbe véve az első feltételt, egy adott hőelemre vonatkoztatva szükséges a görbék egybeesése mind a négy esetben, vagyis a két különböző befogási pozícióban (direkt

5 KÖVETKEZTETÉSEK

Az alkalmazott egyedi módszer lényege különböző anyagoknak a Curie-pontban tanúsított viselkedése, vagyis a kapott plató hőmérséklete függ attól, hogy a csökkenése melyik ferromágneses anyagból készült. Különböző hőmérsékletű platók különböző Curie-pontú anyagból készült fémtömbbel valósíthatók meg.

A Curie-pontos kemencének, az önszabályozó képességnek köszönhetően, a gyors felfűtést követően túllövésmentesen beáll az egyensúlyi hőmérséklete, megfelelő hőmérséklet-eloszlást és stabilitást biztosítva. Ezért úgy tekinthető, mint egy olyan különleges kemence, amely úgy működik, mintha számtalan zóna-fűtése lenne, azonnali jelfeldolgozással. Az eddig használt fixpontos módszerhez képest, amely a fémek fázisátalakulásához köthető hőmérsékleti platón alapul, a Curie-pontos módszernek számos előnye van. Az egyik ilyen előnye, hogy egyszerűbb, olcsóbb és szélesebb körben alkalmazható az ipari felhasználók által, így jelentősen megkönnyíti az S- és K-típusú szabványos hőelemek vizsgálatát. A másik fontos előnye, hogy a párórás hőmérsékleti plató helyett végtelen hosszú platót biztosít. Ezenkívül az is nagy előnye, hogy használat közben az

alkalmazott fém szilárd marad, ezáltal sokkal kevésbé érzékeny a szennyeződésre és a nyomásváltozásra.

Mivel a hőelemeket nagyon magas hőmérsékletek mérésére használjuk, akár 1600 °C-ig, a fokozott hőigénybevétel miatt elveszíthetik homogenitásukat. Ezért fontos vizsgálni az inhomogenitást a hőelem hossza mentén, ezáltal jelentősen növelhető a mérések pontossága és csökkenthető a mérési bizonytalanság.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Arifovic N, Sestan D, Zvizdic D, Hozic N, Turzo-Andras E, Cohodarevic S, Strnad R, Opel K, Neagu D, Bordanu C, Spasova S and Vukicevic T, A new EMPIR Project “MetForTC” for Developing Traceable Measurement Capabilities for Monitoring Thermocouple Performance, 19th International Congress of Metrology, Article 18006, 2019
- [2] Machin G, Anhalt K, Battuello M, Bourson F, Dekker P, Diril A, Edler F, Elliott C J, Girard F, Greenen A, Knazovicka L, Lowe D, Pavlasek P, Pearce J v, Sadli M, Strnad R, Seifert M, Vuelban E, The European project on high temperature measurement solutions in industry (HiTeMS) - A summary of achievements, Measurement 78, 168–179, 2016
- [3] Del Campo D, García Izquierdo C, Jose Martin M, Euramet.T-S3 Calibration of thermocouples from freezing point of Zn to melting point of the Pd-C eutectic by the temperature fixed point and comparison methods Final Report, BIPM, 2020

Változások az érdességmérési szabványban

Changes in the roughness measurement standard

Győri Dorottya Beatrix, Czifra Árpád

Óbudai Egyetem - Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország
gyori.dorottya.beatrix@gmail.com

Összefoglalás — A valós felületek geometriája mindig eltér az ideáltól, és ezek az eltérések összetettek, nem írhatók le egyszerűen. A modern mérőműszerek precíz digitalizálást tesznek lehetővé, miközben a szabványosított mérési paraméterek biztosítják az eredmények összehasonlíthatóságát. Jelen munka az ISO 4287:1997 és az ISO 21920-2:2021 szabványok összehasonlítására fókuszál, kiemelve a tartalmi változásokat a korábbi kiadáshoz képest. Az új szabvány bevezetése lehetőséget kínál a pontosabb, szélesebb körű és megbízhatóbb mérésekre, így fontos megérteni a változásokat és azok gyakorlati hatásait is.

Kulcsszavak: ISO 4287, ISO 21920-2, geometriai termékspecifikáció, felületi érdesség.

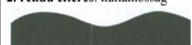
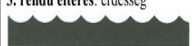
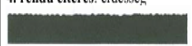
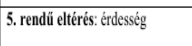
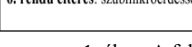
Abstract — The geometry of real surfaces always deviates from the ideal, and these deviations are complex and cannot be described simply. Modern measuring instruments enable precise digitization of surface quality, while the standardization of measurement parameters ensures the comparability of results. This study focuses on the comparison of ISO 4287:1997 and ISO 21920-2:2021, highlighting the content changes introduced in the latest edition. The introduction of the new standard allows for more accurate, more comprehensive and more reliable measurements, making it essential to understand its modifications and their practical implications in industrial applications.

Keywords: ISO 4287, ISO 21920-2, geometrical product specifications, surface roughness.

1 BEVEZETÉS

A felületi minőség egy komplex fogalom, amely magában foglalja a felületi textúrát, ami alatt a felszín fizikai és kémiai állapotát, keménységét, maradó feszültségeit, valamint geometriai jellemzőit értjük. Ide tartoznak továbbá a megmunkálás során létrejövő képlékeny alakváltozások és a szövetszerkezet változásai. A felületi mikrogeometriai eltérések, mint például az érdesség és a hullámosság, a felületi minőséget jellemző tényezők közé sorolhatók.

Miért is fontos egy adott alkatrész felülete? Az optimalizált felületi tulajdonságok közvetlen hatással vannak a berendezések hatékony és hosszú távú üzemeltetésére. A felületi minőség különböző aspektusait számos tudományág vizsgálja, amelyek szorosan összefonódnak. A DIN szabvány a felületi eltéréseket geometriájuk és keletkezési okaik alapján hat csoportra osztja, és 1-6. rendű egyenletlenségként definiálja. Az 1. ábrán láthatók a DIN 4760 szerinti jellegzetes eltérések és keletkezésük leggyakoribb okai:

	Példák	A keletkezés lehetséges okai
1. rendű eltérés: alakhiba 	egyenesség-, síkklapúság, köralkhiba	a szerszámgép vezetékhibái, a szerszámgép vagy a munkadarab deformációja, hibás befogás, kopás
2. rendű eltérés: hullámosság 	hullámok	hibás szerszámbefogás, a munkadarab-szerszámgép-szerszám rendszer lengései
3. rendű eltérés: érdesség 	barázdák	a szerszám vágóélének alakja, előtolás, fogásmélység
4. rendű eltérés: érdesség 	karcok, pikkelyek, dudorok	forgácsolás során anyagreszcsekk kiszakadása, elnyíródása, homokfúvaskor a felszín képlékeny alakváltozása, egyenetlen rétegek képződés galvanizálásakor
5. rendű eltérés: érdesség 	szövetszerkezet mintázata	kristálykítőredezés, a felület változása vegyi hatás következtében, korrózió
6. rendű eltérés: szubmikroérdesség 	kristályszerkezet mintázata	

1. ábra: A felületi egyenletlenségek csoportosítása [1]

A szakirodalomban általánosságban az eltéréseket a következő három kategóriába sorolják: alakhiba, hullámosság és érdesség. Eltérés az érdesség kistérközű komponenseinek értelmezésében figyelhető meg. [1]

De mik azok a paraméterek, amik alapján vizsgálni tudjuk a felületek geometriáját? Az ISO egy egységesen használható szabályrendszert alakított ki, ami által lehetővé vált egy adott termék geometriájának egységes mérési és kiértékelési folyamata, ami azonban nem tekinthető lezártnak, hisz a különböző vizsgálatok számos új kérdést fogalmaznak meg, ami a szabványok hiányosságát tárják fel, így szükséges időközönként az átdolgozásuk.

A geometriai termékspecifikációk (GPS) rendszerében a felületi mikrogeometria szabványosítása önálló helyet kapott. Ezek a szabványok biztosítják, hogy a felületek érdessége, mikrogeometriája, mikrotopográfiája mérhető és összehasonlítható legyen.

A modern gyártási és tervezési folyamatok során egyre kisebb térfogatba zsúfolunk be alkatrészeket, így a méretek csökkenésével párhuzamosan egyre nagyobb precizításra van szükség, ami az anyagtudomány, gyártástechnológia, tribológia és a mérés technika fejlődését is ösztönzi. Az új elvárásoknak megfelelően a kapcsolódó szabványok is folyamatosan változnak. Jelen munkánk célja az ISO 21920 szabványba beépült, a korábbi ISO 4287 szabványon túlmutató mérési és kiértékelési módszerek áttekintése, bemutatása.

2 ÁTFOGÓ VÁLTOZÁSOK

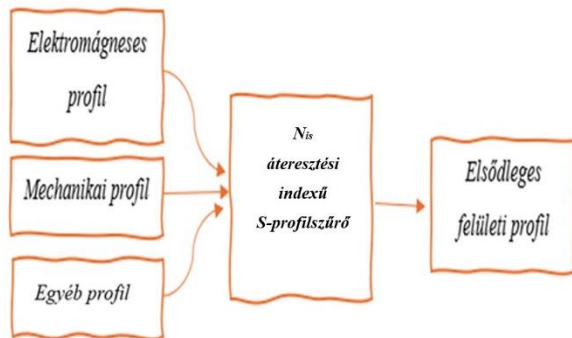
Az érdességmérési szabványok többségét az 1990-es évek végén tették közzé vagy vizsgálták felül utoljára. Az ISO 25178 szabvány – ami a felületi mikrotopográfia átfogó jellemzését foglalja össze – közelmúltbeli

közzététele azonban univerzális alapot teremt a felületi érdesség kiértékelésére. Célszerű és észszerű ugyanazokat a fogalmakat alkalmazni nem csak a 3D-s, hanem a 2D-s érdességmérésben is, és ezért történt meg a korábbi 2D-s érdességmérési szabványok felülvizsgálata és lecserélése.

2.1 Strukturális változások

Az új szabvány (ISO 21920) bemutatását a profilalkotás ismertetésével kezdjük, mivel a felületi érdesség értékelése továbbra is a profilok meghatározásán alapul. Korábban megkülönböztettünk periodikus és nemperiodikus érdességi profilokat, azonban az új szabvány már nem tesz különbséget ezek között [2,3].

Az első fogalom, amellyel a szabványban találkozunk, a burkolófelület, amely egy nemideális felületi modell. Ahhoz, hogy a mérési eredmények értelmezhetők és összehasonlíthatók legyenek, ezt a modellt részletesebben kell vizsgálnunk. A burkolófelület a munkadarab és környezete közötti fizikai interfészt írja le, figyelembe véve a gyártási folyamatokból eredő eltéréseket.



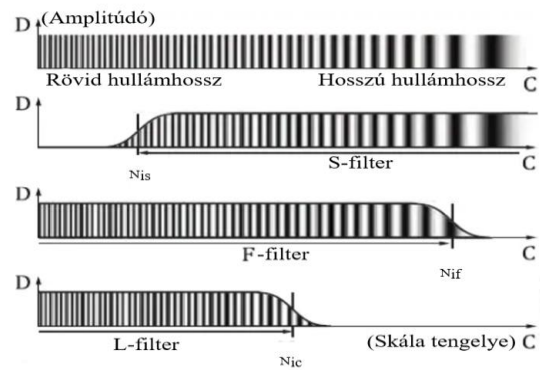
2. ábra: ISO 21920-2 alapján az elsődleges felületi profil meghatározása

Ahhoz, hogy megkapjuk a méréseink kiindulópontjaként szolgáló elsődleges profilt, az ISO 4287 szabványban már meghatározott módon egy metszősíkot kell kialakítanunk. Több típusa is létezik a profiloknak, amik kiindulási alapként szolgálhatnak. A burkolófelület velejárója az elektromágneses felület és elektromágneses profil, amely az optikai mérésekből származó profil.

Ha a munkadarab burkolófelületével nem mechanikai (metszettapintós műszerekkel végzett mérésekből) vagy elektromágneses kölcsönhatás eredményeként kapunk profilt, akkor azt egyéb profilnak nevezzük. Ilyen például amikor szoftveres mérési szabványokat alkalmazunk, amelyek nem közvetlenül a fizikai kölcsönhatás alapján, hanem algoritmusok és modellek segítségével dolgozzák fel az adatokat, illetve minden egyéb más mérés technikával meghatározott profilt is így nevezünk el. Ezeket, mint a szűrési folyamathoz szükséges kiindulási lépéseket a 2. ábra szemlélteti.

A '90-es években számos kutatás mutatott rá, hogy a felületek teljes körű jellemzésére a 3D-s vizsgálatok alkalmasabbak, ebből adódóan itt több paraméter már meghatározásra került, aminek analógja 2D-s vizsgálatoknál nem létezett. Az új szabványnak így ezen paraméterek 2D-s megfelelőinek meghatározásában nagy

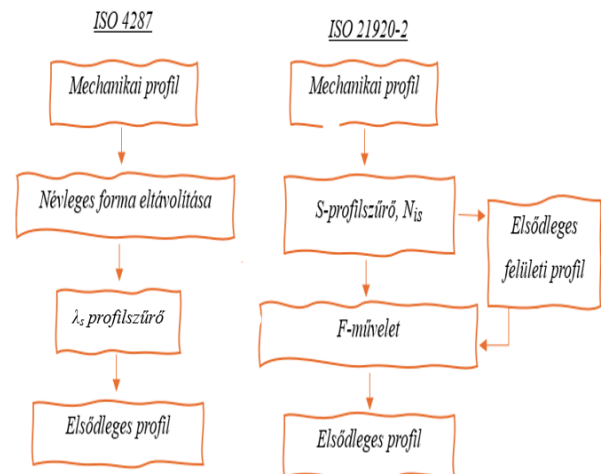
szerepe van, emellett számos paraméter változása a 3D-s mérésre vezethető vissza [1].



3. ábra: ISO 21920-2: profilszűrők [3]

Az új szabvány kétféle szűrőt és egy operátort különböztet meg a korábbi λ_s , λ_c , λ_f határhullámhossz helyett, melyeket a 3. ábra szemléltet. Ezeket az ISO 25178 szabvány a felületek vizsgálatra vonatkozóan már tartalmazta korábban.

- S-aluláteresztő szűrő, ami az N_{is} áteresztési (nesting) indexnél nagyobb hullámhosszú összetevőket tartja meg.
- L-feluláteresztő szűrő, ami az N_{ic} áteresztési (nesting) indexnél kisebb hullámhosszú összetevőket tartja meg.
- F-operátor olyan feluláteresztő szűrő, ami az N_{if} hullámhossznál kisebb összetevőjű elemeket tartja meg, azonban általában az alakhibát (formát) szűri.



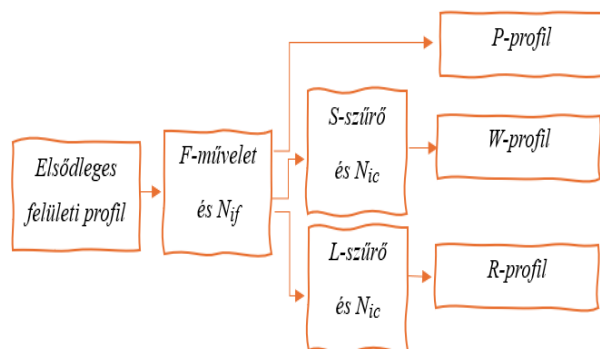
4. ábra: Elsődleges profil meghatározása metszettapintós mérésnél az ISO 4287 és ISO 21920-2 szabványokban

Az elsődleges profil, a P-profil meghatározása több típusú profilból is származtatható (ld. 2. ábra), N_{is} áteresztési indexű S-profil szűrő segítségével. Itt a korábbi szabványhoz képest változás történt: a műveletek fordított sorrendben követik egymást. Míg az ISO 4287 szerint a névleges formaeltávolítás után λ_s szűrő következett, az új szabvány alapján a F-műveletet csak szűrés után alkalmazzák (ld. 4. ábra). Ez azoknál a profiloknál jelenthet számottevő különbséget, ahol az elsődleges felület profil

valamilyen formát is tartalmaz. (Az elsődleges profil az S–F-felületből is származtatható, ami az S-szűrő és az F-operátor művelet után kapott felület.)

- W-profil (hullámossági profil): P-profilból L-profil-szűrővel, N_{ic} áteresztési index alkalmazásával határozható meg
- R-profil (érdességi profil): P-profilból S-profil-szűrővel, N_{ic} áteresztési index alkalmazásával határozható meg.

Ez megegyezik a korábbi gyakorlattal, és az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra: P-, W- és R-profilok meghatározása az ISO 21920-2 szabvány alapján

A kiértékeléshez szükséges referenciavonal (alap- vagy középvonal) a korábbi szabványhoz hasonlóan kerül meghatározásra. Az alapvonal meghatározása az F-művelet alkalmazásakor Gauss-illesztéssel (legkisebb négyzetek módszere) történik.

A kiértékelési hossz meghatározása nem változott, azonban a jelölése módosult. Míg az ISO 4287 szabványban l_n -nel jelölték, az új szabványban l_e lett a jelölése. A mintavételi vagy alaphossz (l_p , l_r , l_w) neve és jelölése is módosult, hogy elkerüljük a diszkrét profilon lévő pontok mintavételével való összetéveszthetőséget (angol nyelvben sampling length és sampling distance). Az új szabványban „szakaszhossz” lett az elnevezése, és l_{sc} jelölést kapott. Mivel a magyar szóhasználatban ennek nincs jelentősége, így a továbbiakban is az alaphossz megnevezést használjuk. Utolsó eltérés: az előzőekben említett névváltozáshoz igazodva, az alaphosszak számának jelölése is megváltozott: a korábban használt (n) helyett az új szabványban a meghatározott jelölés (n_{sc}) lett. [5]

2.2 Parametrikus változások

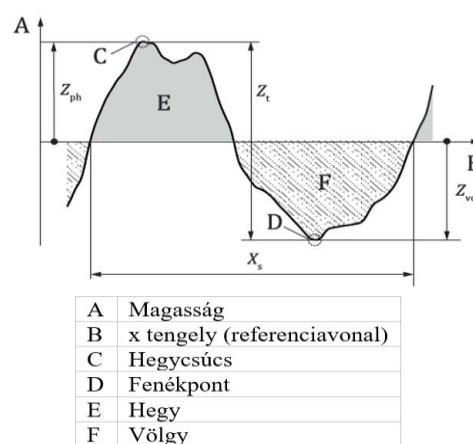
Az ISO 21920 szabványra is igaz marad, hogy minden paraméter (R_{xxk} , P_{xxk} kivételével) a P-, R- és W-profilra is egységesen értelmezhetőek.

A paraméterek csoportosításában teljesen új szemléletet követ az új szabvány [6]. A korábbi, matematikai alapú csoportosítás helyett geometriai sajátosságokon alapuló szemléletet vezet be. Új paramétercsoportosítás a mezőparaméterek – *field parameters* – (magassági, térközi, hibrid, anyagarány-, térfogatparaméterek), amelyek meghatározása minden esetben a kiértékelési hosszon történik, és valamilyen módon tartalmazzák a „teljes mérési

mező” minden mintavételi pontjának információit. A másik nagy csoport a geometriai sajátosságok – *feature parameters* – csoportja, amik a profil egyes geometriai sajátosságainak jellemzésére szolgálnak. Ide tartoznak a csúcsmagasság- és fenékpont-mélység-paraméterek, a profilelemek egyes jellemzői (pl.: profilelemek átlagos távolsága) és a profil sajátosságait, jellemző paraméterek (pl.: csúcscsúsz, görbület).

Ennek a felületi sajátosságokat kihangsúlyozó szemléletnek az eredménye, hogy a profilelemek azonosítása és jellemzése sokkal részletesebbé vált a 2D-s mérésekre vonatkozóan is.

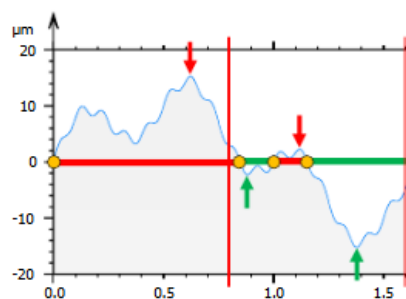
Míg az ISO 4287-es szabvány az érdességszcúcsokat és -völgyeket azonosította, addig az ISO 21920 a csúcscsúsz és völgyek azonosítása mellett külön hangsúlyt fektet a csúcs- és fenékpontok meghatározására (ld. 6. ábra).



6. ábra: Profilelemek változása [3]

Az ISO 21920-2 új, a geometriai jellemzők kiemelésére használt eljárása a szegmentáció (a 3D-s mikrotopográfiára vonatkozó ISO 25178 szabvány ezt már korábban is alkalmazta). A szegmentálásnak három típusa van:

- 1) Csúcsmagasságon és fenékpontmélységen alapú paramétereknél a hegyek és völgyek azonosításával történik a szegmentáció, ahol az ordinátaértékek előjelet váltanak vagy nullával egyenlők.

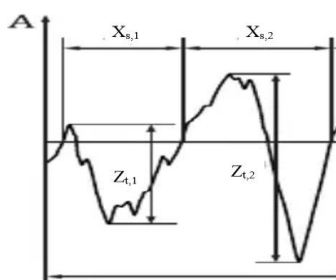


7. ábra: Csúcscsúsz és fenékpontok azonosítása [4]

A 7. ábra első alaphosszán egy csúcspontot (R_{p1}), a második alaphosszán pedig egy csúcs- (R_{p2}) és két fenékpontot (R_{v1} és R_{v2}) azonosíthatunk az új szabvány szerint. A vizsgált profil elejét vagy végét mindig hegynek vagy völgynek kell tekinteni.

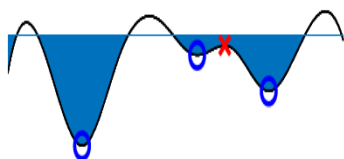
2) A profilelemek alapuló paramétereknél, keresztező – *crossing-the-line* – szegmentációt alkalmaznak. Ez a módszer a profil mentén azokat a pontokat azonosítja, ahol a profil átlépi a referenciavonalat. A meghatározás négy lépésből áll:

1. Tetszőleges magasságú és mélységű hegyek és völgyek észlelése a kiértékelési hosszban belül.
2. A számunkra jelentéktelen hegyek és völgyek törlése, alkalmazva a csúcsmagasság és a fenékpont-mélység megkülönböztetését.
3. A számunkra jelentős profilú hegy és völgy szomszédok összevonása.
4. Profilelemek meghatározása a kiértékelési hosszban oda és vissza is. Ezzel együtt megkapjuk az X_{si} , az i -edik profilelem-távolságát és a Z_{ti} , az i -edik profilelem magasságát is. (ld. 8. ábra).



8. ábra: Profilelemek meghatározása [3]

3) A felületi sajátosságokon alapuló paramétereknél a vízválasztó – *watershed* – szegmentációval választják el a topográfiai jellemzőket úgy, hogy a felületet mélyedések és dombok mentén osztják fel. A „víz a völgyekben gyűlik össze”, és a dombok választják el a különböző területeket az 1_e értékelési hosszban keresztül.

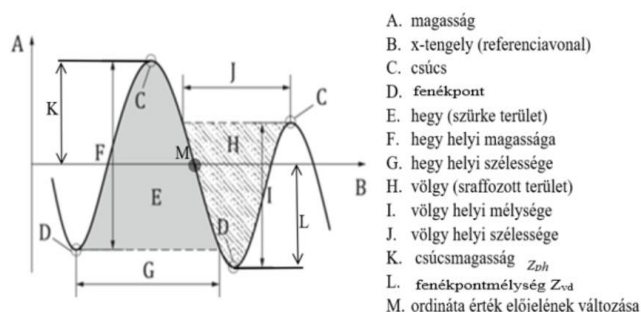


9. ábra: Vízválasztó szegmentáció [7]

A különböző szegmentációk máshogy definiálják a profilelem részeit. Míg a vízválasztó szegmentációs módszer szerint a hegycsúcsa a profil olyan pontja, ami magasabb, a fenékpontja meg olyan pontja, ami alacsonyabb, mint a szomszédságába lévő összes többi pont. A referenciavonalhoz képest viszont annyiban változik a meghatározásuk, hogy a hegycsúcs a hegy lemagasabb pontja a fenékpont meg a völgy legalacsonyabb pontja. Ehhez kapcsolódóan létezik a csúcsok száma paraméter (n_p) ami a jelentős csúcsok számát jelöli, és a jelentős fenékpontok száma paraméter (n_v) is, ami a fenékpontok számát jelöli a kiértékelési hosszban belül. Hasonlóan, a hegy és a völgy definíciója is változik attól függően, hogy milyen szegmentációt alkalmazunk. A vízválasztó szegmentáció szerint a hegy egy csúcs körüli terület, amelynek az összes felfelé irányuló útja a csúcson ér véget, míg a völgy a fenékpont körüli

terület, amelynek az összes lefelé irányuló útja a fenékponton ér véget (ld. 9. ábra). A referencia-vonalhoz képest viszont a hegyet és a völgyet két szomszédos pont határozza meg, amit a profil és a referenciavonal keresztezésével kapunk. Míg a hegy a két pont közötti rész, ami a vonal felett található, addig a völgy az a terület a két pont között, ami a vonal alatt található [7].

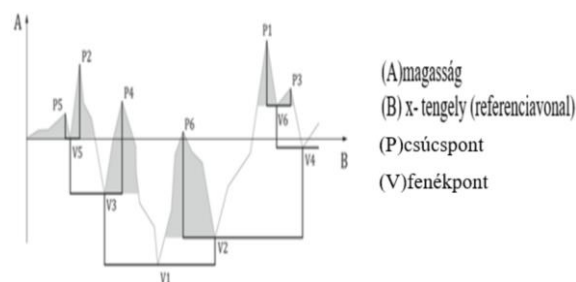
Továbbá profilon a topográfiai jellemzők besorolása szerint a hegy és a völgy vonal típusú jellemző, míg a csúcs és a fenék pont típusú jellemző lett.



10. ábra: Hegy/völgy lokális magassága/mélysége, szélessége, térfogata [3]

Ehhez kapcsolódó paraméterek (ld. 10. ábra) a csúcsmagasság (Z_{ph}) és a fenékpontmélység (Z_{vd}). Minden korábbi paramétert is a hegycsúcs és a fenékponthoz viszonyítva határozzuk meg az új szabvány szerint.

Az új profilelemekhez kapcsolódik a hegycsúcsok és a fenékpontok közötti kapcsolatot ábrázoló grafikon, amelynek egyik változata a hegycsúcsváltozás-fa, amely a csúcsok lokális magassága szerint ábrázolja a csúcsokat a sorok végén, míg a fenékpontokat az összekötő vonalak jelölik. Ennek fordítottja a völgyváltozás-fa, amely a fenékpontok és csúcsok közötti kapcsolatokat a völgyek lokális mélysége szerint ábrázolja.



11. ábra: Hegycsúcsváltozás-fa [3]

Nemcsak a felületi érdességsúcsok és -völgyek jellemzésében vezet be új módszereket a szabvány a különféle szegmentációkkal, hanem kibővíti a térközi jellemzők kiértékelésének módszertanát is.

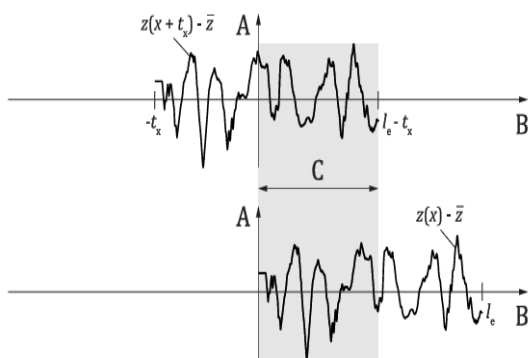
A felületek vizsgálatakor az izotrop vagy anizotrop jellegről a Fourier-transzformáció, vagy az autokorrelációs függvény alkalmazása ad információt.

Az autokorrelációs függvény (ACF) a profil globális szerkezetét és periodicitását vizsgálja, megmutatja, hogy a $z(x)$ profil egy adott x pontja mennyire hasonlít saját

magához egy bizonyos t_x távolsággal eltolva, ez azonosítja a felületi mintázatokat és periodikus jellemzőket. Az ehhez tartozó paraméter az autokorrelációs hossz $R_{al}(s)$ (ISO 21920-3 határozza meg az s értékét). Az autokorreláció vizsgálata több évtizedes múltra tekint vissza, de a korábbi 2D-s szabványok ezt a módszert nem tartalmazták. Az ISO 25278 3D-s topográfiai szabvány alkalmazza ezt a paramétert, és most az ISO 21920 is lehetőséget biztosít ennek meghatározására.

Azonban a felületi érdesség és hullámosság teljes körű frekvenciaalapú elemzéséhez a Fourier-transzformációt használjuk. Ez lehetővé teszi, hogy a felület különböző mérettartományú egyenetlenségeit térfrekvenciák szerint rendezzük, és azonosítsuk a gyártási folyamatokból eredő különböző komponenseket. A Német Autóipari Szövetség (VDI) a 2000-es évek elején adta ki a domináns hullámhosszok kiértékelésére vonatkozó ajánlását [8], amit az új szabvány most széles körű alkalmazásra is javasol.

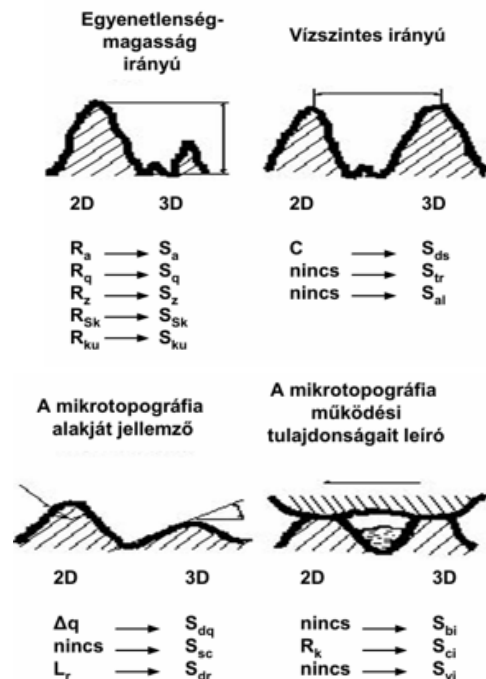
A Fourier-transzformáció és az autokorrelációs függvény között szoros matematikai kapcsolat van. Az autokorrelációs függvény Fourier-transzformáltja az úgynevezett teljesítményspektrum ($S(p)$), amely megmutatja, hogy mely frekvenciák járulnak hozzá leginkább a felületi szerkezethez. A Fourier-analízishez tartozó fogalmak még az amplitúdó spektrális sűrűsége és a teljesítmény-spektrálsűrűség. Az első megmutatja, hogy a különböző térfrekvenciákhoz tartozó komponensek milyen intenzitással vannak jelen a felületi struktúrában, míg a másik azt írja le, hogy a felületi profil különböző térfrekvenciáinál milyen a teljesítmény eloszlása, az ehhez tartozó paraméter a domináns térbeli hullámhossz (R_{sw}).



12. ábra: Autokorrelációs hossz átfedési intervalluma [3]

3 MEGVÁLTOZOTT ÉS ÚJ PARAMÉTEREK

Az új szabvány a 3D-s felületi mikrotopográfiai vizsgálatok paramétereinek megfelelő 2D-s paramétereket vezetett be, így a legtöbb esetben az ott használt jelölést dolgozta át. Felsorolásunkban csak az újonnan behozott paramétereket említjük meg, a csoportosításokban szereplő többi paraméter már meg volt határozva korábban az ISO 4287 által is (ld. 13. ábra).



13. ábra: Az ISO 21920 bevezetése előtt a mikrotegeometria és a mikrotopográfia paraméterei [1]

3.1 Új felületi jellemzők

Az új kiértékelési módszerek új jellemzők megadására adnak lehetőséget. Az alábbiakban összefoglaljuk azokat a paramétereket, amik a mikrotegeometria eddig nem vizsgált sajátosságainak, jellemzőinek az értékelésére szolgálnak. A paraméterek részletes leírását mellőzzük, csak arra hívjuk fel a figyelmet, hogy az új szabvány milyen új geometriai tényezők leírását teszi lehetővé. Továbbá minden esetben csak az érdességre vonatkozó jelölést használjuk, de a szabvány ezeket a paramétereket az elsődleges és a hullámossági profilon is értelmezi.

- R_{dl} (developed length): Profilhossz (kiterítési hossz) paraméter, ami megmutatja a profilvonal teljes hosszúságát.
- R_{dr} (developed length ratio): Relatív profilhossz (relatív kiterítési hossz), ami megmutatja a profilvonal hosszának és az l_e kiértékelési hosszának a relatív arányát. Ha az érték 0, az azt jelenti, hogy a profilvonal hossza megegyezik a kiértékelési hosszal, azaz nincs érdesség a profilon. Az érték növekedése egyre tagoltabb profilra utal. 3D-s megfelelője az S_{dr} (developed interfacial area ratio).
- R_{smq} és R_{cq} a profilelemek távolságának (térközének) és magasságának szórását adja. A korábbi szabványok nem tartalmazták az egyes jellemzők szórását. Újdonság, hogy ez önálló paraméterként került be a szabványba.
- R_{pc} (csúcscsúsz), R_{pd} (érdességsúcsok sűrűsége), R_{vd} (völgyek sűrűsége) paraméterek az egységnyi hosszra eső profilelemek, csúcsok és völgyek számát mutatják. Ezek a jellemzők a korábbi ISO szabványban nem szerepeltek, de pl. az amerikai ASME B 46.1. érdességi szabvány meghatározott csúcscsúsz paramétert. Erre most már az ISO is részletes értékelési lehetőséget ad, különösen úgy,

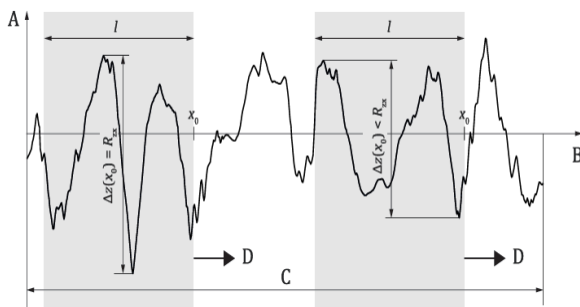
hogy az R_{pc} paraméter a *crossing-the-line* szegmentációhoz, míg az R_{pd} és R_{vd} paraméterek a *watershed* szegmentációhoz kapcsolódnak.

- R_{mpc} és R_{mve} a csúcsok és a völgyek görbületét jellemző paraméterek. A korábbi szabványok semmilyen formában nem értékelték a geometriának ezt a jellemzőjét, így ezzel teljesen új lehetőség nyílik a kiértékelésben.

3.2 Kiegészítő paraméterek

Az új kiértékelési lehetőségek a korábban is használt és paraméterekkel jellemzett geometriai sajátosságok kiértékelésére is nyújtanak új módszereket. A továbbiakban kategorizálva mutatjuk be azokat a paramétereket, amiknek a korábbi szabványokban is volt megfelelője, de most a széleskörű lehetőségek ugyanannak a geometriai sajátosságnak a jellemzésére kettő vagy több különböző paramétert is meghatároznak. Illetve az is megváltozott, hogy egyes paraméterek, amelyek eddig a kiértékelési hosszon kerültek kiértékelésre, most az összes szekcióhosszon kiszámításra kerül, majd ezek átlaga adja a paraméter értékét (pl. a soron következő R_z parameternél is).

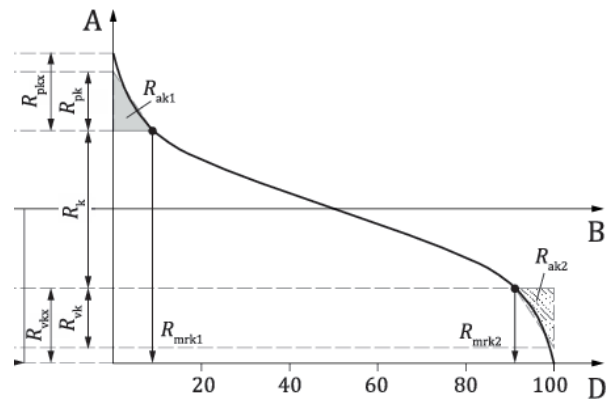
- Az R_z maximális átlagos profilmagasság paramétert megtartotta a szabvány, de kiegészítésként találunk nagyon hasonló jelentéstartalmú paramétereket. Ilyen az R_{zx} (alaphossz egyenletlenség magassága) paraméter, ami a kiértékelési hosszon (l_e) mozgó l hosszúságú szakaszon kiszámított legmagasabb és a legalacsonyabb pont közötti különbség maximális értéke (ld. 14. ábra). Hasonlóan a profil maximális egyenletlenségére utalnak az R_t , R_c , R_{cx} és R_{10z} paraméterek. Az R_t a profil érdesség magasságát, a legmagasabb és legalacsonyabb pont távolságát, adja a teljes kiértékelési hosszon, az R_c a profilelemek átlagos magasságát, míg az R_{cx} a profilelemek legnagyobb magasságát adja a keresztező (*crossing-the-line*) szegmentációt használva, míg az R_{10z} paraméter a vízválasztó (*watershed*) szegmentációval meghatározott 5 legmagasabb csúcs és legmélyebb völgy átlagos távolságát mutatja.



14. ábra: Alaphossz egyenletlenség magassága, l hosszúságú mozgó szakasz a kiértékelési hosszon [3]

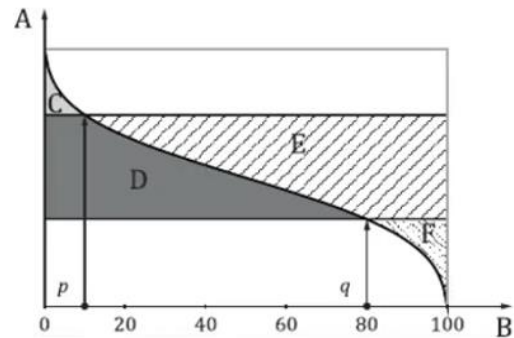
- A közepes profil meredekségéből (R_{dq}) kiindulva az új szabvány két kiegészítő paramétert határoz meg:
 - R_{da} : abszolút gradiens számtani átlaga, mely a felület szabályosságát és simaságát jellemzi,

- R_{dt} : maximális abszolút gradiens segít meghatározni a profil éles változásait.



15. ábra: Hordfelületgörbe és paraméterei [3]

- A hordfelületgörbéből származtathatjuk a korábban is ismert paramétereket (ld. 15. ábra), de ezeket bővíti az új szabvány. Egyrészt az R_{pk} és R_{v_k} paramétereket kiegészíti az R_{pkx} és R_{v_kx} paraméterekkel; másrészt a hordfelületi görbe 3D-s értékelésből (ISO 25178) származó értelmezéssel kerülnek meghatározásra az anyagtérfogat- és ürestérfogat-paraméterek (ld. 16. ábra). Így a 15. ábrán szereplő R_{ak1} paraméternek egy alternatív meghatározását adja a 16. ábrán C-vel jelölt érdességsúcsanyagtérfogat-paraméter (R_{vmp}), míg az R_{ak2} paraméter megfelelője az R_{vvv} érdességvölgyürestérfogat-paraméter.



16. ábra: Ürestérfogat- és anyagtérfogat-paraméterek (C terület paramétere: R_{vmp} , F terület paramétere: R_{vvv}) [3]

- A térközi jellemzők közül továbbra is használatos az R_{sm} paraméter (profilelemek átlagos távolsága), de a térközök jellemzése kibővíti. Egyrészt megjelent az R_{smx} paraméter, ami megadja a maximális profilelem-távolságot, másrészt az autokorrelációs és domináns hullámhossz-analízis két új paraméterrel bővítette a hullámhossz jellegű kiértékelés lehetőségeit:
 - az R_{al} paraméter az autokorrelációs hosszt, míg
 - az R_{sw} a domináns hullámhosszt adja meg.
- Az R_p csúcsmagasság és R_v völgymélység meghatározása a korábban ismert profilelem-azonosítás mellett a keresztező és vízválasztó szegmentációkkal is lehetséges. Így az R_p paraméterrel hasonló tartalmú az R_{pt} és az R_{5p} , míg az R_v paraméter kiegészítői az R_{vt} és R_{5v} paraméterek.

4 KÖVETKEZTETÉSEK

Következtetéseinket az alábbiakban foglalhatjuk össze:

- A szűrésnél változást jelent, hogy az F-operátor alkalmazása csak az N_{is} indexű, S-profilszűrő után történik, azaz először a kistérközű, zavarások eltávolítása történik és csak utána az alakszűrés.
- Az új szabvány teljesen új gondolkodásmódot követ, melynek alapjai a korábbi 3D-s ISO 25178 szabványon alapulnak. Az érdességi profilok kiértékelésében kiemelt hangsúlyt kap a felületi sajátosságok azonosítása. Ehhez a korábbi profilelemek meghatározó technika mellett további két szegmentáció alkalmazására is lehetőséget biztosít a szabvány: ezek a keresztező (*crossing-the-line*) és a vízválasztó (*watershed*) módszerek. Ez utóbbi az ISO 12085, *motif* alapú kiértékelésen nyugszik.
- Az új szabvány az R_{al} és R_{sw} paraméterekkel lehetőséget teremt az autokorrelációs és domináns hullámhossz-analízis alkalmazására.
- Az újonnan bevezetett szegmentációk eddig nem használt, új paramétereket definiálását implementálták. Ilyenek az R_{dl} profilhossz, az R_{dr} relatív profilhossz, az R_{pc} csúcscsúsz, az R_{mpc} profilcsúcsgörbület és R_{mve} profilvölgygörbület. A különböző szegmentációk révén azonos geometriai sajátosságokat többféle módon jellemezhetünk. Így a korábban ismert R_z és R_t paraméterek mellett megjelent az R_{zx} , R_c , R_{cx} és R_{10z} paraméter. Az R_{pk} és R_{vk} paraméter kiegészült az R_{pkx} és R_{vtx} paraméterekkel, míg az R_{ak1} és R_{ak2} anyag- és ürestérfogati paraméterek mellett megjelent az R_{vmp} és R_{vvv} paraméterpár. Az R_{dq} paramétert kiegészíti az R_{da} és R_{dt} paraméter, míg az R_p és R_v paramétereket kiegészítik az R_{pt} , R_{5p} , valamint az R_{vt} és R_{5v} paraméterek.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Dr. Horváth Sándor, A felületi hullámosság 2D-s és 3D-s jellemzése, a működési tulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálata és elemzése. Budapest. 2008
- [2] ISO 4287:1997, ISO hivatalos weboldal szabványkereső:
<https://www.iso.org/standard/10132.html> (2024.12.12)
- [3] ISO 21920 2:2021, ISO hivatalos weboldal szabványkereső:
<https://www.iso.org/standard/72226.html> (2025.02.10)
- [4] François Blateyron, Differences between ISO 21920-2 and ISO 4287, 2023, Paris,
https://www.researchgate.net/publication/369169160_Differences_between_ISO_21920-2_and_ISO_4287 (2025.02.16)
- [5] François Blateyron: The profile standards ISO 21920, 2006-2024 Digital Surf,
<https://guide.digitalsurf.com/en/guide.html> (2025.03.20)
- [6] François Blateyron, The profile standards ISO 21920 2006-2025 Digital Surf, France,
<https://guide.digitalsurf.com/en/guide-iso-21920-parameters.html> (2025.03.18)
- [7] A. Müller, M. Eifler, A. Jawaid and J. Seewig, Feature characterization for profile surface texture, Germany 2025,
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2051-672X/adaa07/pdf> (2025.03.22)
- [8] VDA 2006: Oberflächenbeschaffenheit, Regeln und Verfahren zur Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit, 2002

OT-3 optoelektronikai TTP

OT-3 optoelectronic TTP

Pálinkás Tibor, gépészmérnök

Óbudai Egyetem, BGK, Gépészeti és Technológiai Intézet

ptibor723@gmail.com

Összefoglalás — A cikk egy új, optoelektronikai működésű, házilag is előállítható tapintófej (TTP) kifejlesztését mutatja be, amely kiküszöböli a hagyományos érintkezős rendszerek bizonytalanságait. Az új konstrukció nem igényel precíziós optikai elemeket, érzékenysége 1 μm körüli, és a gépi vezérlő bármiféle átalakítása nélkül is kompatibilis a meglévő rendszerekkel.

Kulcsszavak: tapintófej, optoelektronika, TTP (Touch Trigger Probe), elmozdulás-érzékelés, fotodióda

Abstract — This paper presents the development of a novel, optoelectronic touch trigger probe (TTP) that eliminates the uncertainties of traditional contact-based systems. The new design avoids the need for high-precision optical components, offers a sensitivity around 1 μm , and ensures full compatibility with existing control systems without requiring hardware modifications.

Keywords: touch trigger probe, optoelectronics, TTP, displacement sensing, photodiode

1 ELŐZMÉNYEK, ÚJABB GYÁRI MEGOLDÁSOK

A *Bánki Közlemények 60 éves a Gyártástechnológia Tanszék* c. számában részletes, áttekintő cikk keretében mutattam be a főleg a koordináta-mérőgépeken és az NC/CNC szerszámgépeken máig elterjedten használt érintkezős *touch trigger probe* (TTP) tapintófejek megszületésének körülményeit, szerkezetét, működését ([1]). Kitértem az azóta napvilágot látott, általam legfontosabbnak ítélt újabb szerkezeti elvekre, ill. ezen elveket megvalósító néhány konkrét típusra, típuscsaládra. Végül részletesen ismertettem az általam kidolgozott és elkészített, piezolapkával érzékenyített rendszert. Az érdeklődők azonban bizonyára észrevették, hogy a konstrukciónak, minden előnye mellett van egy lényeges hátránya.

A TTP piezo+ elnevezésű rendszer ui. kétfázisú érzékelésen alapul. A nagyon – az akusztikus zavarok szempontjából talán túlságosan is – érzékeny piezolapka által kiváltott státuszjel hatására a mérőgép, szerszámgép digitális útmérőinek adatait azonnal eltárolja a vezérlőrendszer, de csak akkor érvényesíti, ha rövid időn belül a hagyományos TTP-re jellemző kontaktusbontás státusza is megérkezik. A gyári gépek mérőrendszere azonban erre nincs felkészítve, azokba bele kell nyúlni, át kell alakítani, egy átmeneti tárolóval is ki kell egészíteni. Sok esetben ez nem engedhető meg! A mai, magasan integrált rendszerekben sokszor nem is nagyon kivitelezhető. Olyan TTP kidolgozásába fogtam tehát, ami mentes az érintkezési bizonytalanságoktól, az érzékenysége 1 μm körüli, és a jelkondicionáló áramkörének a kimenete egy bontókontaktust szimulál,

tehát a fogadó berendezés átalakítása szükségtelen. Bár a [2]-ben felvettem egy egyszerű javaslatot az öntisztító kontaktusokra, végül mégis úgy gondoltam, hogy a tapintócsap érzékelőrendszeréből a villamos érintkezőket inkább száműzöm, annál is inkább, mert nem állnak rendelkezésemre volfrámgyölyök és -görgők.

Egy TTP konstrukciójának kardinális kérdése az érintkezőfelületek jósága, azaz az üzembiztos, reprodukálható átmeneti ellenállású érintkezés. Ennek kifogástalan biztosítása a gyártóknak is fejtörést okoz; pl. a [3]-ban olvashatunk a témáról. Végül úgy döntöttem, hogy olyan tapintófejet dolgozok ki, amelyben a golyós/görgős hatpontos tájolórendszernek a feladata kizárólag a mozgó rész nyugalmi helyzetének szabatos meghatározása lesz, az elmozdulást valamilyen analóg jelátalakítóval (vagy inkább jelátalakítókkal) érzékelem.

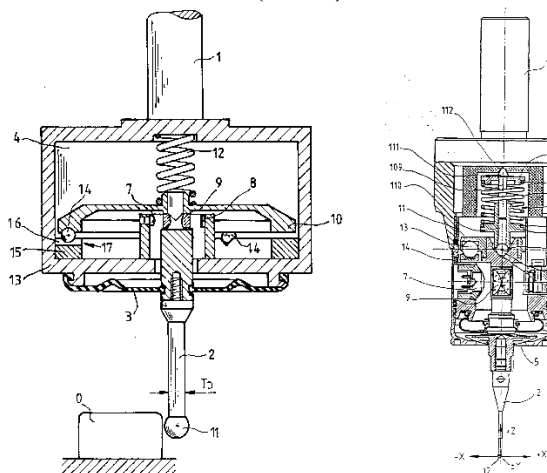
Eredetileg nyúlásmérőbélyeges átalakítóban gondolkodtam, amihez a Renishaw MP, ill. OMP sorozata adta az inspirációt, bár az én konstrukcióm másképpen nézett volna ki. Az [1]-ben az említett gyári tapintófejekkel kapcsolatban még így fogalmaztam: „A küllőkre egy-egy szilícium (piezorezisztív) nyúlásmérő bélyeget rögzítettek. Szándékosan nem a „ragasztottak” szót használtam, mert nem tudom, hogy milyen módon kötötték hozzá ezeket a speciális elemeket.” Időközben a neten ráakadtam a konstrukciót kissé jobban megvilágító, bár még mindig igen vázlatos grafikára (1. ábra). Ez bizony igazolja az előbbi óvatos fogalmazásomat: láthatóan nem hagyományos nyúlásmérőbélyegeket építettek be ezekbe a tapintókba! A küllőkön két-két – bizonyára szigetelő anyagból, talán szilícium-dioxidból – kialakított bakocskára látható, melyek közé rögzítődik a vékony, megfelelően dotált szilíciumból levő nyúlásérzékelő ellenállás pálcika. Egy *mikromechanikai konstrukcióról* van tehát szó, konkrétan ún. prizmatikus rúdról, amelynek elrendezése a rezisztív nyúlásmérés kezdeteit idézi. Akkoriban, a nyúlásmérőbélyegek elterjedése előtt, a mérendő alkatrészekre, szerkezeti elemekre szintén két merev bakot rögzítettek, amelyek közé kifeszítették az ellenálláshuzalt. A korai elrendezések persze hagyományos anyagokból, hagyományos konstrukciós elvek alapján készültek és a mikromechanikai elrendezéshez képest hatalmas méretűek voltak!



1. ábra: Mikromechanikai nyúlásmérő elem (Renishaw)

A mikromechanikai összeállítás házilag nem készíthető el, de a hagyományos, nyúlásmérőbélyeges konstrukcióval való helyettesítése is nehézségekbe ütközik. Az ilyen apró, hagyományos fémréteg-bélyegek nagyon nehezen és rendkívül drágán szerezhetők csak be, nem különben a rögzítésükhöz szükséges ragasztók! A bélyegek korrekt felragasztása is külön tudomány. Az előbbieknél elvileg költségkímélőbb és sokkal érzékenyebb szilíciumréteges nyúlásmérő bélyegek sem kaphatók, bár fellelhetők mindegyik olcsó digitális kismérlegben. Sajnos, az egyszer felragasztott nyúlásmérő bélyeg olyan, mint a postai bélyeg: nem újrahasznosítható.

Más utat kellett keresnem. A végső indítást a *Heidenhain* egy demonstrációs táblója adta. A táblón metszetrajz formájában bemutatott, optikai átalakítót tartalmazó, szerszámgépeken való alkalmazásra szánt TTP-jének, a TS-460 típusú gyártmánynak a hosszmetsete szerepelt. A nevezett tapintófej több más szempontból is érdekes (IR és/vagy rádiós státuszátvitel, önálló telepről való táplálás, levegősugaras tapintógömb-tisztítás, törésvédelemmel és a főorsótól való termikus elszigeteléssel ellátott felfüggesztés), de ezúttal koncentrálnunk csak a láthatóan nagyon egyszerű optikai elmozdulás-érzékelőjére! Az a bizonyos demonstrációs tábla nincs a birtokomban, viszont rövid keresés után találtam néhány szabadalmi leírást a neten (EP 0731333 A1, US 4763417 A, DE 19605349 A1, DE 59509004 D1, EP 0731333 B1, US 5806201 A; EP 0742422 B1, DE 19517215 C1), amelyek nagyon hasonló elvű rendszert írnak le. A hosszmetseteken egy-egy hagyományos, a tapintószárat hordozó, 6 pontos felfekvésű, rugós lezorítású mozgó rész figyelhető meg, amelyekbe leginkább a jobb diavetítők kondenzorához hasonló, két síkdomború lencséből álló lencserendszer van beépítve. Az egyiknél a két lencse között egy, az optikai tengelyig beérő éket is ábrázoltak (2. ábra).

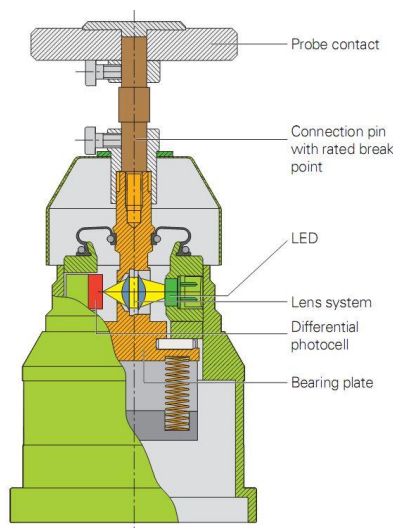


2. ábra: Optoelektronikai elvű TTP (Heidenhain szabadalmi leírásokból)

Mindkét konstrukcióban a mozgó résztől balra egy megvilágító egység, jobbra pedig egy kettős fotodióda helyezkedik el, amelyek a tapintóházhoz vannak rögzítve. A végül megvalósult gyártmány működését illusztrálандó, a gyártó rövid videókat is feltett a netre (pl. <https://www.youtube.com/watch?v=62iM9PR5TSM&list=PLTydzx7uqglO801it-Ilo3BAP7ipaHQn> ; <https://www.youtube.com/watch?v=ctg1pzMmaeg>).

Ezek szerint a megvilágító egység egy IR-LED-et (?) és egy kollimátorlencsét tartalmazó tubus lehet, amelyből nagyjából párhuzamos fénysugár lép ki. Ebből a mozgó rész optikája egy kis átmérőjű fényfoltot képez le a kettős fotodiódára. A fej nyugalmi helyzetében ezen fényfolt közepe a két diódát elválasztó vaksávra esik. Ha a tapintógömb a rajzok síkjában jobbra vagy balra elmozdul, akkor a fényfolt is (függőlegesen) elmozdul a fotodiódán, ami PSD-ként funkcionál – legalább is a magyarázó szöveg alapján. Legjobb tudomásom szerint PSD megnevezéshez olyan *osztatlan felületű*, négyzetes fotodióda-chip dukálna, amelynek mind a négy élénél van egy-egy kivezetése. A másodikiként említett videón az is feltűnt, hogy az elektrooptikai rendszer valamiféleképpen négyszögjelekkel operál, de a lényege megértéséhez a klip nem nyújt támpontot. (További furcsaság: az optika látható lencséjének a domború oldala néz a megvilágító tubus felé.)

A 3. ábra a Heidenhain TT-460 típusú, szerszámbemérő TTP-jének hosszmetsetét ábrázolja. A cég egyik katalógusából származó rajz szerint a képalkotó rendszer 2 darab síkpárhuzamos lencséből áll, amelyeket a sík oldalukkal fordítottak egymás felé, a LED-ből pedig kúpos fénynyaláb érkezik az optikához. A sárgával jelölt sugármenet azt sejteti, hogy a bal oldali lencse a kollimátor, a jobb oldali pedig az objektív. Mivel a két lencse egyetlen kétszerdomborúval is helyettesíthető, el tudom képzelni azt is, hogy a lézerpointerekéhez hasonló aszférikus lencsét építenek be. Találkoztam is olyan gyári ismertetővel, amely egyetlen lencsére utal: <http://heidenhaingb.com/new-touch-probes-combine-infrared-and-radio-transmission/> . Ebben a tekintetben tehát a videó nem teljesen reális, de lehet, hogy a metszetrajz sem.



3. ábra: A Heidenhain TT-460 TTP hosszmetsete

Bár a fényfolt elmozdulásának van a tapintószár-rajz síkjára merőleges kitérésére eső függőleges komponense

is, a rendszer érzékenysége ekkor lényegesebb kisebb. A videó egyértelműen bemutatja, hogy ezt a mérőfejet a szerszámgép főorsója mindig úgy fordítja be, hogy a munkadarab letapintása a tapintószár legérzékenyebb elmozdulási irányába essék. Ez egy CNC gépen nyilvánvalóan csak szoftver kérdése (a Heidenhain és más gyártó biztosít szoftvertámogatást ehhez is a saját szerszámgép-vezérléseiben), de egy hagyományos koordinátamérőgépen ez az üzemmód nemigen valósítható meg.

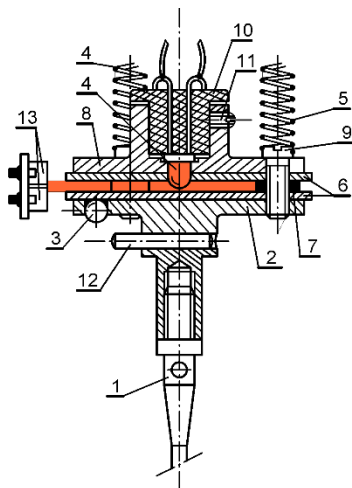
A szükséges optikai elemek beszerzése és korrekt beépítése, beállítása is problémát okozna az amatőr utánépítőnek, bár lézerdíódához való, polikarbonátból készült aszférikus kollimátorlencsék beszerezhetők. Ráadásul nagyfelületű kettős fotodióda sem volt nálunk e cikk írásának idején kereskedelmi forgalomban.

Sokat töprengtem azon, hogy miként lehetne a fenti gondokat áthidalni. Végül megszületett a jelen cikk tárgyát képező optikai TTP, aminek az irányfüggése nem rosszabb, mint ami a hagyományos *kinematic resistive probe* iránykarakteristikájából adódik, nem kellene hozzá lencsék és egyéb gyári optikai elemek és a kettős fotodióda hiányát is sikerült áthidalnom. Igaz, az új rendszer beállítása komoly türelmet igényel.

Az alábbiakban az elkészült kísérleti darab részletes ismertetése következik. Mint látni fogjuk, a prototípus számos részlete a kísérleti jellegre utal, ami leginkább a különálló, méretes, hagyományosan furatszerelt elemekből felépített elektronikai egységre jellemző. Egy ilyenben a mérések, átalakítások, fokozatcserek lényegesen egyszerűbben végrehajthatók, mintha „normális”, a tapintófejben elhelyezett, felületszerelt elemekből álló, zsúfolt szerelésű áramkörökben kellene ugyanezeket elvégezni.

2 AZ OT-3 OPTOELEKTRONIKAI TTP MŰKÖDÉSI ELVE, MECHANIKAI FELÉPÍTÉSE

Az én verziómban is IR-LED szerepel mint fényforrás, de nincs előtte kollimátorlencse. Azért egyetlen lencse van a rendszerben: a fényforrásként választott Kingbright L-7104F3C, 3 mm átmérőjű, víztiszta tokozású világító dióda közönséges T-1 jellegű tokjának félgömbölyű feje. Megjegyzem, hogy az utóbbi időkben gyártanak a homlokoldalon homorú kúpfelületet tartalmazó LED-eket is, amelyek kifejezetten sugárirányú fényszórásra vannak „kifejezve”.



4. ábra: Az OT-3 mozgó egységének hosszmetsete

A tapintófej mozgó egységének hosszmetsetét a 4. ábra mutatja. A rajzon az 1-es tapintószárát is hordozó egységet a hagyományos TTP-khez hasonló módon három görgőpár tájolja (3×2 darab, 2 mm átmérőjű csapágygörgő; a rajzon nem szerepelnek), ezeken támaszkodnak meg a 2 szárrögzítő alaptárcsába sajtolt Ø3 kerámia golyók (3). Hasonlókat a gyári tapintófejekben is előszeretettel alkalmaznak. A kereskedelembe – igaz, nem éppen olcsón – beszerezhetők. (Amúgy is be kellett szereznem, hiszen a tapintógömb ezúttal is egy ugyanilyen, ám gyémántfúróval kifúrt golyó.) Már ebből következik, hogy ez a TTP nem működhet kontaktusbontással, az elmozdulást kizárólag a LED fényének érzékelésével kell valahogyan megoldanunk. Az amúgy rendkívüli alakpontosságú kerámia golyók nagy előnye a kiváló felületi finomságuk és nagy keménységük. Az acélgörgőkön feltámaszkodó acélgolyóknak említeni szokták egy – szerintem csak elvi jelentőségű – hátrányát: ha felmágneseződnek és összetapadnak, akkor a „feltépésükhöz” erőtöbblet szükséges, ami a tapintószárát jobban deformálja, növelve a statikus hibát. Igaz, a gyári tapintók volfrámból készült golyó/görgőpárjainál ez nem probléma, de kerámia golyók esetén sem jöhet szóba.

Mint látjuk, ebben a konstrukcióban a 4 IR-LED a mozgó rész tengelyében helyezkedik el. Ezért nem a szokásos központi nyomórugós helyezést alkalmaztam, hanem három, egymáshoz képest 120 fokban elhelyezett kisebb nyomórugóra (5) bízta a feladatot. (Az egyszerűbb ábrázolás okán ebből csak kettő látszik.) Ez nem újdonság; a hivatkozott videókon láthatóan a Heidenhain tapintófeje is három nyomórugót tartalmaz, bár valószínűleg más okból. A mi rugóink zárómenetei szorosan illeszkednek a csavarfejekre.

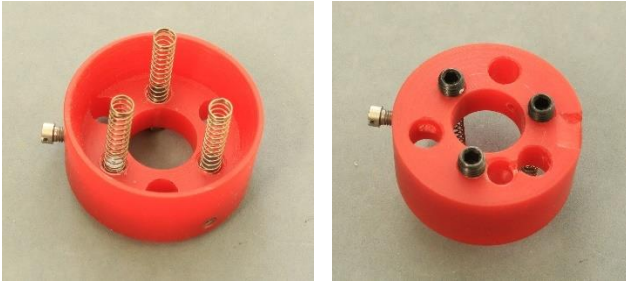
A mozgó egységbe két, korrózióálló acéllemezből kimunkált, tükröző felületű 6 tárcsát is beszereltem. A tükröző felületek egymás felé néznek, a távolságukat a prototípusban 3 db 1,5 mm hosszúságú 7 távtartó csövecské határozza meg. Nagyképűen siktükröknek is nevezhetném ezeket az elemeket, ám az igazság az, hogy a felületüket egyszerűen felcsiszoltam, polírpapírral felpolíroztam, majd fogpasztával tükrösítettem. A tükrökbe nézve bizony feltűnnek a siktól való eltéréseik, de az adott alkalmazásban ez szerencsére közömbös.

A LED fénye a felső tükrö tengelyében készített furaton lép be a részbe, fénye a tükröző felületeken sokszorososan visszaverődik – ez kicsit hasonló a fényvezető szálak belső fényterjedéséhez – és körben kilép, egy 1,5 mm-es, meglehetősen homogén fényeloszlású „fényhengert” alkotván. Ezt mértem, bár a homogén megvilágításnak sincs igazából jelentősége. A szendvicsszerkezetű szerelési egységet alul a szárbefogó tárcsa, fölül a 8 tárcsa fogja össze, a 3 db M2-es csavar (9) segítségével. A felső tárcsában a LED-et a 10 kétfuratú műanyag dugó rögzíti, a 11 hernyócsavarral megszorítva. A LED kivezetéseihez vékony, szuperhajlékony háromeres sodrat két éret forrasztottam. A harmadik ér a mozgó fémtest és a földpotenciálú tapintóház között létesít galvanikus kapcsolatot, megakadályozva, hogy a tapintószáron keresztül zavaró jelek érkezzenek a szerkezet belsejébe. Egyébként sem szerencsés, ha egy elektronikai vagy mechatronikai szerelvényben lebegő potenciálon levő fémalkatrészek találhatók.

A szárbefogó tárcsa nyúlványába besajtoltam a 12-es jelű, 2,5 mm átmérőjű keresztgörgőt. Ez a mozgó rész

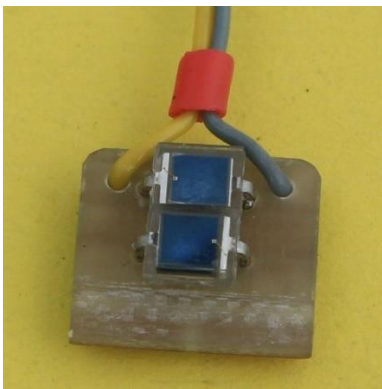
túlságosan nagy elfordulását korlátozza szárcsere esetén, de a normál mozgásában nem gátolja.

A három rugót három darab M5-ös, csapos hernyócsavar támasztja meg, amelyek a tapintóházhoz rögzített, annak belső átmérőjéhez illeszkedő danamid „fazékba” fűrt menetekbe vannak becsavarva. Ezekkel a rugóerők szerelésekor egyenként beállíthatók. Mivel a rugók gyakorlatilag egyformák, a három csavart mindig azonos mélységre hajtjuk majd be addig, amíg a nullpont a tapintófej vízszintesbe döntésekor sem megy el. A részegység fotóját az 5. ábrán láthatjuk. A három szélső furaton haladnak át a fotoszenzorok vezetékai. A további bemunkálások a mozgásérzékelő (és a LED-foglalat) számára biztosítanak helyet; lásd később.



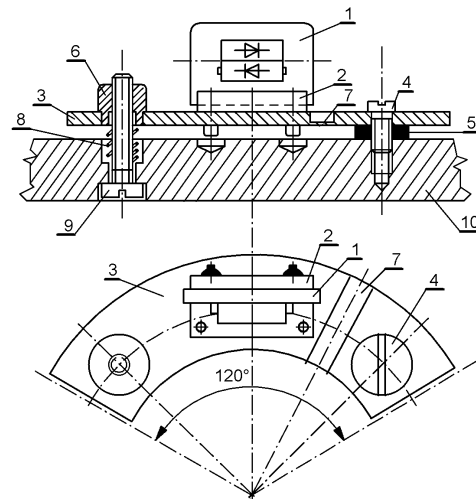
5. ábra: Háromrugós erőgenerátor műanyagtömbje

Az álló részben, a görgős üléses szerelési egységet is magában foglaló alsó tokfedél belső síkján egymáshoz képest 120° -os szögben, egy-egy finomállító mechanikára vannak felszerelve a 13-as fotodióda-párok úgy, hogy nyugalmi helyzetben a fényhenger egyformán világítja meg a párok mindkét elemét: az alsó chipnek a felső élével, a felsőnek az alsó élével párhuzamos sávját. Már utaltam rá, hogy kettős fotodiódát nem tudtam szerezni, bár természetesen létezik ilyen, pl. a japán Hamamatsu gyártmánykatalógusában találhatnánk megfelelőt, borsos áron. A megoldás: előállítom házilag! Persze, nem valami boszorkányos konyhaasztali csúcstechnológiára kell gondolni: vettem néhány BPW34 fotodiódát, melyek hevenyészett szorítókészülékbe befogott tokját az egyik szabad élük mentén esztergapatronba fogott köszörűkoronggal lemunkáltam úgy, hogy a köszörült sík felől nézve háromnál az anód volt jobb oldalon, háromnál pedig a katód. Ezzel a művelettel eléggé közel, akár $<0,2$ mm-re is kerülhet egymáshoz a két chip. A tokokat párosával kis nyákokra forrasztottam fel (6. ábra). A BPW34 érzékenységszámát 940 μm -es hullámhossz körül van, tehát jól illeszkedik a választott LED-hez.



6. ábra: Elmozdulásérzékelő fotodióda-pár

A szenzorpárok tengelyirányú helyzetét egyenként finoman be kell tudni állítani. Erre a 7. ábrán vázolt finomállító mechanika szolgál, ami elvileg ugyanúgy működik, mint annak idején a kazettás magnók fejbeállító rendszere. Az 1-es optopaneleket (amelyekbe a fotodióda-párok vannak beforrasztva) réses tartókba (2) ragasztottam, amelyeket a rendelkezésre álló férőhely okán közel 120 fokos körgyűrűcikk-szegmens alakú, $1,5$ mm-es korrózióálló acélból kimunkált alkatrészek (3) hordoznak. (Ezekhez 2-2 darab M1,4 csavarral vannak az AlMgSi-ből mart tartók hozzáerősítve.) A körgyűrűcikk egyik végénél a 4, M2,5 rögzítőcsavar található, 1 mm magasságú 5-ös távtartó gyűrűvel, a másik végén pedig a 6-os M2 besajtolható anya. A fix rögzítés közelében munkáltam ki a 7-es deformálandó zónát, ahol az anyagot 3 mm szélességben $0,3$ mm-re lemunkáltam. A 8-as erős nyomórugóval előfeszített 9-es állítócsavar a rugós csukló virtuális tengelye körül képes nagyon kis mértékben elfordítani a szegmenst, ezzel emelve vagy süllyesztve a rá szerelt optopanelt. Az M2 csavar menetemelkedése $0,4$ mm, a karviszonyokból adódóan a csavar egy fordulatára az optopanel valamivel kevesebb mint $\pm 0,2$ mm-t mozdul el.



7. ábra: A finomállító mechanika vázlata

A három görgőpárt tartó, a 10-es jelű alsó tokfedél közepére csavarozott görgős üléseszerelvény fotóját a 8. ábra mutatja. Jól látszik az a sugárirányú horony is, amibe a 4. ábra 12-es jelű csapja hatol be, kellően nagy játékkal. A mozgó rész alkatrészeit a 9. ábrán terítettük ki. Balra fekszik a két síktükör. Jobboldalt fenn a LED-szorító dugón egy, a 4. ábrán nem szereplő felcsavarozott lemezalkatrészt is megfigyelhetünk, ami a LED-hez menő sodrott vezetékármast (a testelővezeték is szerepel benne) biztosítja. Az összeszerelt mozgó részt a három nyomórugóval és egy becsavart tapintószárral a 10. ábrán láthatjuk. A 11. ábrán a finomállító mechanikák elemeit rendeztük el, míg a tapintófej komplett alsó szerelési egységét a 12. ábra mutatja.

A gumi védőharmonika – ugyanolyan, mint a *touch-trigger probe piezo*+-é volt – ezúttal nem csak a szennyeződések bejutását akadályozza meg, hanem a külső fényt is, ezért még a kísérleti darabnál sem hagyhattam el. Szerkezeti okokból most fordított helyzetben kellett beépíteni az alaptárcsába (13. ábra). Az alaptárcsa pereménél a 6 darab M2-es rögzítőcsavarja, a

védőharmonika körül pedig a három finomállító csavar látszik.

A szerkezetnek kétségtelen hátrányai a Heidenhain konstrukciójával szemben, hogy három fotodióda-pár kell hozzá, ill. a mozgó rész is tartalmaz elektronikai eszközt, ami flexibilis hozzáférést kíván meg.



8. ábra: Három görgőpáros ülészerelvény



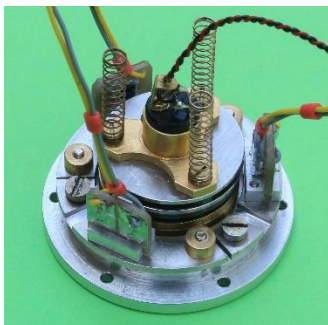
9. ábra: A „fényhengert” előállító elemek, összeszerelés előtt



10. ábra: Összeszerelt mozgó egység



11. ábra: A három finomállító mechanika a fotodióda-párokkal, beépítés előtt



12. ábra: A TTP aktív szerelvénye



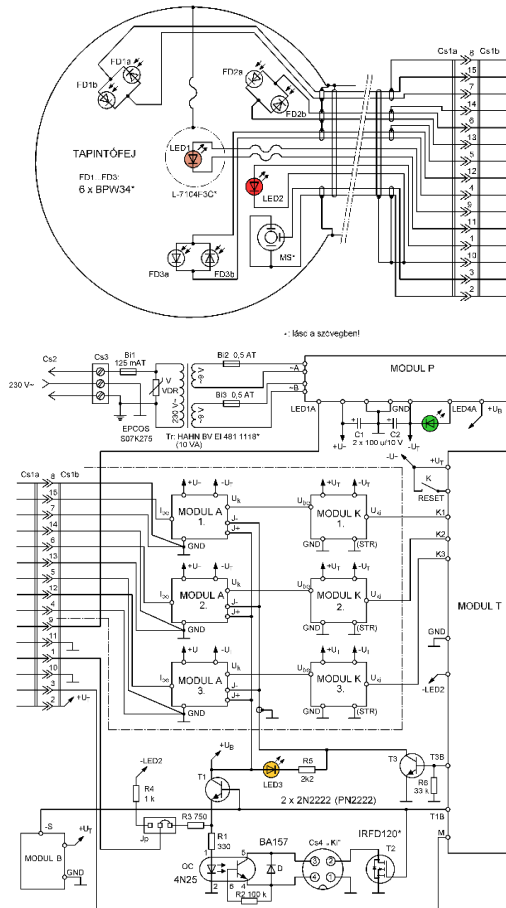
13. ábra: Szennyeződésektől védő, egyben fényzáró rugalmas védőharmonika

3 AZ OPTOELEKTRONIKAI TTP JELKONDITIONÁLÓ ÁRAMKÖRE

A kísérleti darabhoz kifejlesztett, modul rendszerű elektronikai egység meglehetősen bonyolult, mint ahogyan az a 14. ábra összefüggési kapcsolási rajzából sejthető. A moduláris felépítésnek a fejlesztési stádiumban van egy nagy előnye: az egyes modulok egymástól függetlenül, önállóan vizsgálhatók, módosíthatók. Ezt segíti elő, hogy az egyes modulokat hagyományos, furatszerelt alkatrészekből építettem fel. Ezzel szemben áll a nagy méret, ami egy fejlettebb, kiforrottabb konstrukcióban felületszerelt alkatrészekkel és például a MODUL T mikrovezérlővel történő helyettesítésével lényegesen redukálható lenne. Ezzel az áramkörök nagy része magában a tapintóházban is elhelyezhetővé válna, aminek egyéb – például a reakciósebesség növekedésében megnyilvánuló – előnyei is lennének. Egyelőre azonban a rendszer helyes működésének az ellenőrzése, az esetleg szükségessé váló módosítások egyszerűbb elvégezhetősége volt a célom, amihez a megvalósított, alapvetően demonstrációs elrendezés célravezetőbb.

Az összefüggési kapcsolási rajz bal oldalán magát a TTP-t, pontosabban az abba beépített, az elektronikához kapcsolódó eszközöket tüntettem fel. Középen van az infravörös LED1, körülötte a három antiparalel fotodióda-pár. A LED2 a TTP-knél szokásos beépített státuszjelző. Az MS miniatűr mozgásérzékelőről később lesz szó.

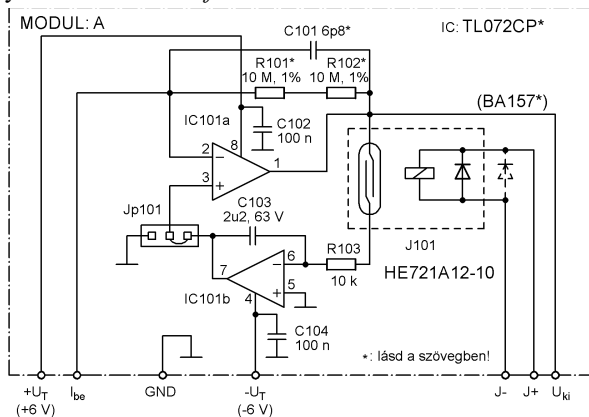
Az áramköri egységek tervezésénél arra törekedtem, hogy az alkatrészkészlet a lehetőség szerint a meglévő választékból kerüljön ki, de legalábbis könnyen és viszonylag olcsón legyen megvásárolható.



14. ábra: Az elektronikai rendszer összefüggési kapcsolási rajza

3.1 Fotoáram-erősítő (MODUL – A)

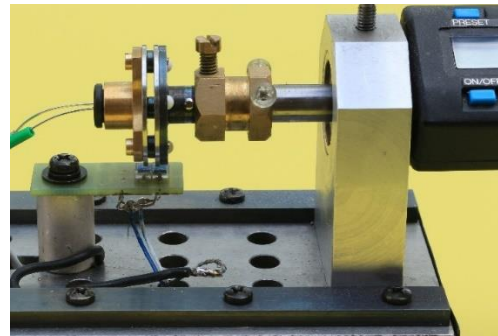
A modul kapcsolási rajza a 15. ábrán látható. Az IC101a a visszacsatoló ágában levő R101, R102, C101 komplexummal egy hagyományosnak tekinthető fotoáram-feszültség-átalakító, egy transzkonduktancia-erősítő. Az I_{be} bemenetére kapcsolt antiparalel fotodiódapár előfeszültség nélkül üzemel, azaz a másik kivezetéspárja a közös pontra kapcsolt. A szakirodalom az ilyen áramkört néha *photovoltaikus erősítőnek* is nevezi.



15. ábra: A fotoáram-erősítő kapcsolási rajza

Tudjuk, hogy a megvilágított $p-n$ átmenet (és így a fotodióda) rövidzárási árama a fotoárammal egyenlő, ami bizonyos határok között arányos a fénytelsítménnyel. Ebben a konkrét esetben a fényáramok előjelhelyes különbsége folyik be a fotoáram-erősítőbe. Ebből

következik, hogy ha a fénysáv megvilágítottsága homogén, akkor ez az egyszerű rendszer akár elmozdulás, vagy finomtapintónak kiképzett mechanikai elrendezés esetén méreteltérés meghatározására is alkalmas. Az elmozdulás-kimenőfeszültség-karakterisztika egy adott szimmetrikus elmozdulás-tartományban lineárisnak tekinthető. A 16. ábrán láthatjuk azt a kis mérőpadot, amelyben a tapintófej majdani mozgó egységét egy $1 \mu m$ felbontású digitális beépíthető mikrométer mérőcsapjára szereltem. Alatta fixen rögzítettem a fotodiódapárt tartalmazó kis panelt. Ezzel a szerkezettel vizsgálva az elektrooptikai rendszerről megállapítottam, hogy ennek a kísérleti összeállításnak az érzékenysége kb. $\pm 50 \text{ mV}/\mu m$, és a tápfeszültség által korlátozott, nagyjából $\pm 70 \mu m$ -es méréstartományban az elmozdulás-kimenőfeszültség-karakterisztika linearitáshibája 1% környékén van. A kimenőfeszültséget a MODUL A jelkimenetén mértem. A mérésnél természetesen a külső fényt ki kellett zárni. Ezt elérendő, egy fekete fotokartonból kialakított egyszerű burkolattal takartam a mérőteret (17. ábra).



16. ábra: Az optoelektronikai rendszer elmozdulás-jelfeszültség-karakterisztikájának felvétele



17. ábra: A mérési összeállítás fényvédő papírburkolata

Nem állhatom meg, hogy egy fotón be ne mutassam a műszergyűjteményem egyik ritka darabját, a fentiekhez hasonló elven működő, 1979-es gyártású digitális kijelzésű finomtapintó rendszert. A francia Microlec cég B.30 típusú kijelzőegységéhez több finomtapintó is tartozik, a képen csak az egyik szerepel (18. ábra). A tapintók egy felületszerelt kettős fotoérzékelőn, annak megvilágító egységén és a kettő között elmozduló, lineárisan változó szélességű résmaszk-páron kívül a két vastagréteg-lapkán elhelyezett jelkondicionáló áramkört is tartalmazzák. Az áramkörben már SO-8 tokozású IC és SOT-23 tokozású eszköz is felfedezhető!



18. ábra: Microlec B.30 optoelektronikai mérőkészülék az egyik finomtapintóval

Visszatérve a 15. ábrához feltűnik, hogy többek között egy további műveleti erősítő és egy reedrelé egészíti ki az áramkört. Arról van szó, hogy ha tapintófejünkől $1\ \mu\text{m}$ körüli érzékenységet várunk el, akkor a fénysáv elmozdulását tized mikron nagyságrendben kell tudnunk időben stabilan érzékelni! (Erre a cikk végén, a pontossági analízis kapcsán visszatérek.) Azonban a különböző hőtágulási tényezőjű alkatelemekből összeállított mechanika, a fotodiódapárok jellemzőinek egymástól eltérő hőfokfüggése, esetleges öregedése és más zavaró tényezők miatt a rendszer nullpontja idővel „elmászik”.

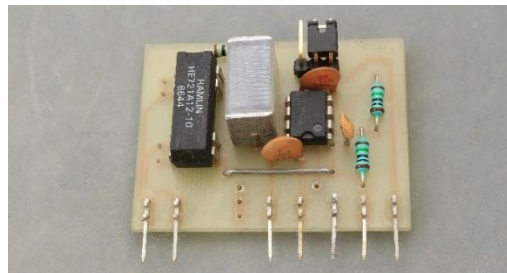
Megfigyelhetjük, hogy az IC101b, a C103 és az R103 egy integráló szabályozót alkothat. Tételezzük fel, hogy a tapintófej nyugalomban van, amikor is az U_{ki} ponton a jelfeszültség – amelynek ilyenkor 0-nak kellene lennie – mégsem nulla! Ha most a J101 kontaktuspárja rövid időre záródik, akkor a szabályozókör addig tolja el a megfelelő irányba az IC101a neminvertáló bemenetének a szintjét, amíg annak kimenete gyakorlatilag az IC101b offsetfeszültségének felel meg. Ez pedig a TL072 válogatásával akár $1\ \text{mV}$ alatt is lehet. A C103 közben feltöltődik a hibafeszültség inverzére, ami az IC101b invertáló bemenetén a kontaktus bontásának pillanatában is fennáll. A C103 töltése a relé nyitása után lassan elszívárog az önkisülése, de főleg a szabályozó erősítő (amúgy nanoamper nagyságrendű) nyugalmi (*bias*) bemeneti árama következtében. A megépített prototípusoknál a feszültség $1\ \text{mV}$ -nyi változásához kb. $1,5\ \text{min}$ kellett. Ha a jelfogót pl. $40\ \text{s}$ -ként működtetjük, akkor megfelelő hosszú idejű nullpontstabilitást érünk el.

E sorok olvasója nyilván relé helyett analóg kapcsolót javasolna, de ebbe a pozícióba nagyon kis (pikoamper nagyságrendű) szivárgási áramús típus kellene! Ilyet nem könnyű beszerezni, és az ára sem éppen barátságos. A megadott típusú vagy hasonló, $12\ \text{V}$ -os névleges működtetőfeszültségű, $1000\ \Omega$ tekercsellenállású, DIL-tokozású jelfogó könnyen és viszonylag olcsón megvásárolható, de sokunknak bizonyára akadnak ilyenek a fiókjában is. A kerékpárkomputerem érzékelője is reedpatron, ami előtt minden kerékfordulatnál elhalad a működtető mágnes, és ezzel a műszerrel felszerelt kerékpárral már több ezer kilométert tettem meg az érzékelő legkisebb üzemzavara nélkül. Ebben belegendolva be kell látnunk, hogy nyugalmi helyzetben a negyven másodpercenként megtörténő érintkezőzárás mellett igencsak hosszú élettartamra számíthatunk! Ráadásul a már elhasználtak tekintett zárt kontaktus átmeneti ellenállása is elhanyagolható a $10\ \text{k}\Omega$ -os R103 mellett, az

ebben az alkalmazásban igazán kritikus nyitott szivárgási ellenállása pedig nemigen csökken!

A jelfogó típusjelzésének végén szereplő „-10” beépített szabadonfutó diódát jelent. Ha csak „-00” végződéssel jelölt reléink vannak, akkor a beültetési rajzon szaggatottan ábrázolt diódát is be kell forrasztani. A javasolt BA157 (BA158, BA159) gyorskapcsoló helyett számos más típus is megfelel. Egy nem moduláris felépítésű végleges konstrukcióban a három különálló jelfogó egyetlen, három érintkezőpáros példánnyal is helyettesíthető volna.

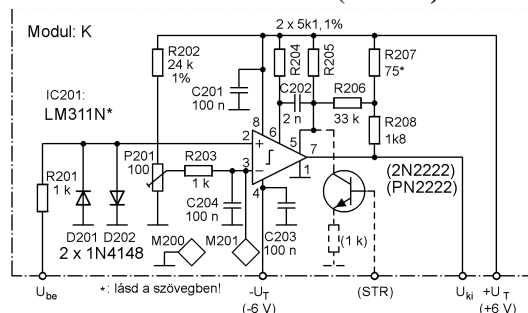
A Jp101-nek a beállítás során lesz szerepe; segítségével a szabályozókör ideiglenesen kiiktatható, és a főerősítő neminvertáló bemenete közvetlenül 0-ra köthető. A C101 optimális értékét ki kell kísérletezni; erről a 4.1. fejezetben lesz szó. Ebből a modulból természetesen 3 darabra van szükség. Az egyik modul fotóját a 19. ábra mutatja.



19. ábra: Az egyik fotoáram-erősítő modul fényképe

3.2 Komparátormodul (MODUL K)

Az erősítő kimenőjelét egy beállítható feszültségszinten komparálni kell, és a komparátor logikai jelével kell vezérelni a MODUL T egység K1, K2 és/vagy K3 bemenetét. A megvalósított modulokban komparálási szint $0 \dots 25\ \text{mV}$ között állítható be (20. ábra).



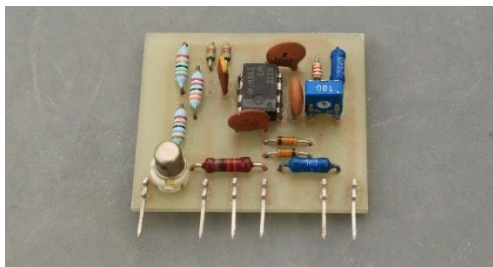
20. ábra: A komparátormodulok kapcsolási rajza

A feladatra kiválasztott LM311N gyors komparátor mindkét bemenetére külső jelet vezetünk: a neminvertálóra az R201-en át a fotoáram-erősítő kimenőjelét, az invertálóra a P201 csúszkájáról levehető referenciafeszültséget. Ezért a stabil működéshez elengedhetetlen hiszterézist létrehozó pozitív visszacsatolást sajátos módon valósítottam meg, az IC egyik applikációs segédletének (www.ti.com/lit/an/snoa860/snoa860.pdf) tanulmányozása után. Ahhoz, hogy a visszacsatolás stabil, és a mértéke közben tartható legyen, eltekintünk a szokásos, megaohmos nagyságrendű visszacsatoló ellenállástól. Ehelyett a nyitott kollektoros kimenet (7. láb) és a $+U_T$ közé kapcsolt munkaellenállást mintegy 20:1 osztásarányú feszültségosztóként képezzük ki (R207, R208) a visszacsatolást pedig az osztóponton az R205-tel

valósítjuk meg, az 5. lábra, azaz az egyik offsetkompenzáló bemenetre. Ezek az áramköri pontok ui. a chip bemeneti differenciálerősítőjét követő fokozat bemenetei.

A komparátor kimenete mindaddig alacsony szinten van, amíg a bemenőjel nem haladja meg a trimmerrel beállított referenciaszintet (persze, az IC offsethibáját is figyelembe véve). Amennyiben meghaladja, a kimenet a $+U_T$ közelébe vált, de fordított irányú bemeneti szintváltozáskor csak a hiszterézis által megszabott alsó küszöbszintnél vált vissza alaphelyzetbe. A hiszterézist a visszacsatolókör ellenállásai kb. 1...2 mV-ban határozzák meg, az R207 cseréjével lehet beállítani.

Szagatottan ábrázoltuk a *STROBE* (letiltó) áramköri részletet. Ha az NPN tranzisztort és az 1 k Ω -os ellenállást is beépítjük, akkor a tranzisztor bázisára vezetett TTL H szintű – valójában minimálisan +1,5 V-os – jellel a komparátor kimenete L szinten tartható, a bemenetek szintjétől függetlenül. Jelen rendszerünk ezt az áramköri részletet nem használja ki, de a fotó kedvéért beültettem a két alkatrészt (21. ábra), hiszen ez az érdekes kapcsolástechnikájú gyors komparátor egyéb alkalmazásokban is beválhat.



21. ábra: Az egyik komparátormodul fényképe

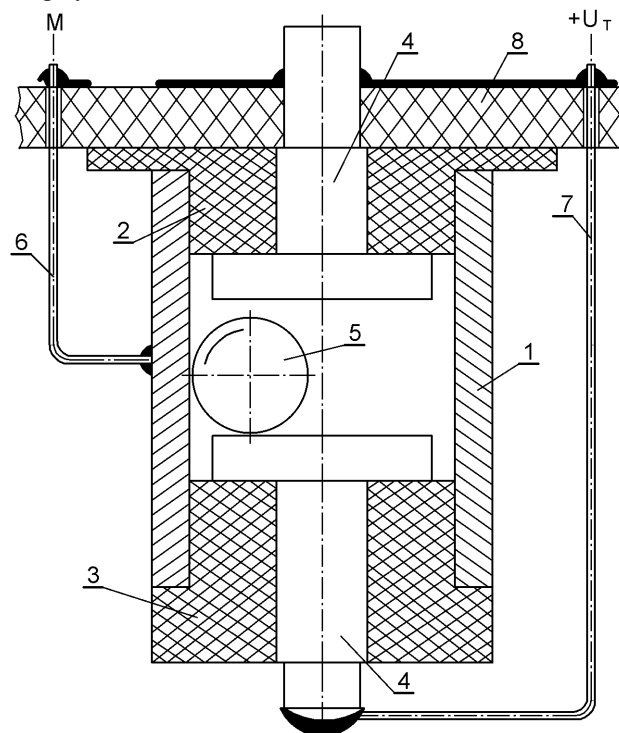
3.3 Ciklusidőzítő (MODUL T)

A fejlesztés során ez a modul okozta a legnagyobb fejtörést. Persze nem a bonyolultnak egyáltalán nem nevezhető kapcsolástechnikája miatt, hanem hogy egyáltalán mi legyen pontosan a feladata? Addig rendben van, hogy 40 s-ként adjon egy-egy rövid impulzust a relémeghajtó fokozatnak, csak hogy ez nem ilyen egyszerű! Addig, amíg a TTP nyugalmában van, tényleg csak ezt kell biztosítani. Igen ám, de ha véletlenül éppen tapintás közben, amikor a tapintószár kitér és a fotoérzékelő egyensúlya felborul, „jut eszébe” nullázni, felborul a működés is, és az ezt követő 40 s-ig nem lesz használható a tapintófej!

Az nyilvánvaló volt, hogy valahogyan tudtára kell adni, hogy mérni szeretnénk. A legegyszerűbb lenne egy nyomógommbal ellátni az elektronikát, amivel minden tapintás előtt resetelnék az időzítőt, közel egy biztonságos percet hagyva a mérésre – már ha nem feledkezik meg róla a kezelő. Lássuk be, hogy ez bizony nagyon primitív ötlet! A következő gondolatom a tapintóházon bevonatként alkalmazott érintésszenzor volt. Jó-jó, ez már kényelmes, de hát a legkritikább esetben mozgatják egy mérőgép szánjait a tapintófejet megmarkolva! Egy automata mérőgép vagy egy CNC szerszámgép mozgatása, beállítása pedig nem is kézzel történik.

3.3.1 Mozgásérzékelő házilag

Egyszer csak jött a megváltó gondolat: használjunk egy mozgásérzékelőt, pontosabban: gyorsulásérzékelőt! Igen ám, de egy 3D-s mikromechanikai gyorsulásszenzor nem éppen a „fiókban heverő” vagy „könnyen, olcsón megszerezhető” kategória... Végül egy nagyon egyszerű és kisméretű, a tapintófejen könnyen elhelyezhető szenzort dolgoztam ki (MS), amelynek hosszmetrátét a 22. ábra mutatja. Az eszköz 1-es jelű házáat egy Kontakta sokpólusú csatlakozó aranyozott tájolóhüvelyéből kimunkált, 5,8 mm hosszúságú cső képezi. A csővecske furata 3,6, a külső átmérője 4,5 mm. Ennek két végébe 1-1 plexiből esztergált dugót ragasztottunk be, az ábrán a 2-es és a 3-as, és amelyekbe előzőleg besajtoltuk a 4-es jelet viselő, aranyozott vállas csapokat. Ezek a csapok tintasugaras nyomtató kimerült tintapatronjából származnak; eredetileg is érintkezőként funkcionáltak. Az így képződött, $\varnothing 3,6 \times 1,8$ mm-es üregben szabadon mozoghat az 5-ös jelű alkatrész, amely egy 1,5 mm átmérőjű aranyozott golyó. Ilyet a kereskedelemben nemigen lehetett volna beszerezni. Véletlenül akadtam rá, egy Grayhill gyártmányú billenőkaros DIP-kapcsolósorban. Könnyen elképzelhető, hogy más gyártmányú kapcsolósorban is fellelhető ilyen, bár a golyós konstrukció korántsem általános.



22. ábra: A mozgásérzékelő hosszmetrátéte

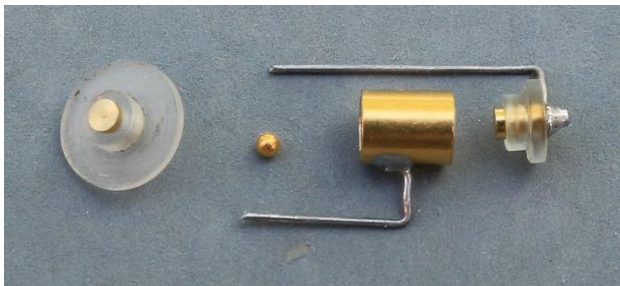
A mozgásérzékelő hossztengele beépítés után párhuzamos lesz a tapintó tengelyével, mert az esetek döntő többségében a TTP függőlegesen helyezkedik el, a mozgásérzékelő pedig a sugárirányú elmozdulásra a legérzékenyebb.

Alapvetően az a probléma ezzel a szerkezettel, hogy a golyó súlyából és a mozgás közbeni tömegerejéből adódó, a kontaktusfelületekre redukált erők olyan kicsik, hogy még korrozíómentes acélból készült csapágygolyó esetén sem kapunk megfelelő érintkezést, ezért elkerülhetetlenek az aranyozott érintkezőfelületek.

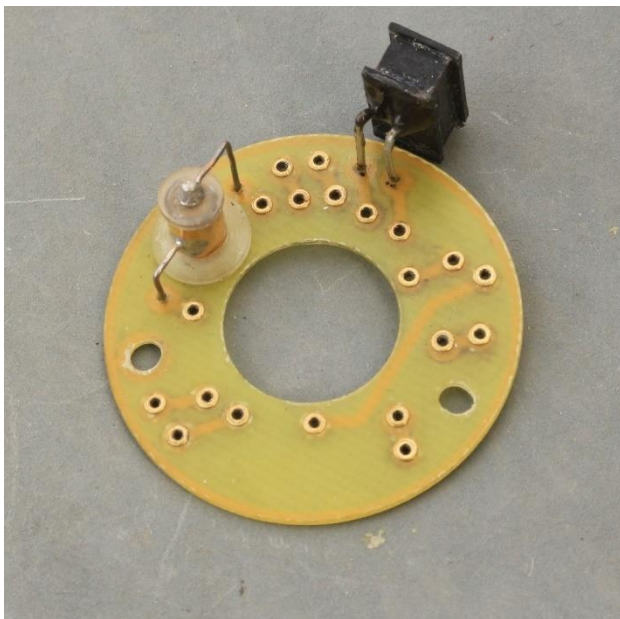
Megjegyzem, hogy a különböző külföldi kereskedők kínálatában szerepel viszonylag olcsó, bár a saját fejlesztésünél kissé nagyobb méretű érintkezőgolyós elmozdulásérzékelő, az SW-520D. Ez egy érdekes, 2 szabadon mozgó golyóval működő szerkezet, de a mi céljainkra valószínűleg nem alkalmas. Mint a megnevezése is – *Tilt Sensor* – utal rá, ez nem gyorsulás-, hanem dőlésérzékelő! Ugyanez mondható el a hasonló AT407, AT409, AT411 vagy az MS-100906 típusjelű *Rolling Ball Tilt Switch* elnevezésű eszközökről. Elképzelhető viszont, hogy az ezekben levő, minden bizonnyal aranyozott érintkezőgolyó felhasználható a mi mozgásérzékelőnkhez.

Egy másfajta elven működik a szintén érintkezős SW-18015P vagy az SW-18020P. Utóbbiak ugyan gyorsulásérzékelők, amikben egy változó menetemelkedésű csigargúró „nehéz” végének a kilendülése létesít kontaktust az érzékelőházhoz rögzített, és ezzel együtt a rugó tengelyében áthaladó merev érintkezőhuzallal, ám kizárólag sugárirányú elmozdulásra kapcsolnak. Az általam javasolt konstrukció gyakorlatilag minden irányban érzékenyebbnek tűnik, mint a nevezett termékek. Igaz, meghatározott nyugalmi helyzete nincs, de a TTP-ben ennek nincs is jelentősége.

A szenzor összeszerelése előtt az alkatrészeiről készített kép a 23. ábrán, a nyákgyűrű a szenzorral és a speciális kialakítású LED-foglalattal a 24. ábrán látható. Ez a nyákgyűrű egyben a tapintófej kábelrendezője.



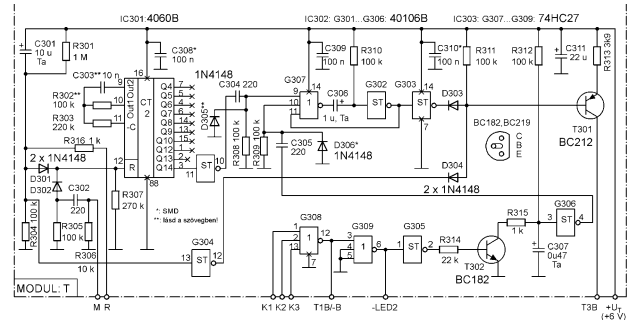
23. ábra: Mozcásérzékelő, összeszerelés előtt



24. ábra: A nyomtatott áramkörti gyűrűbe ültetett mozgásérzékelő

3.3.2 A ciklusidőzítő modul működése

A ciklusidőzítő modul (25. ábra) működésének tárgyalása során többször hivatkozom az alaplap alkatrészeinek az összefüggési kapcsolási rajzon szereplő pozíciójára.



áramgenerátor ennyi ideig aktiválódik. Megjegyzem, hogy ha kikapcsolás után pár másodperccel újra bekapcsoljuk a tápot, a közben eltelt idő alatt az R301 nem tudja teljesen kisütni a C301-et, így a *reset* impulzus jóval keskenyebb is lehet, igaz, az első nullkompenzációhoz 300 ms is elegendő.

A komparátorok kimenetét a G308 NEM-VAGY-kapu fogadja. Nyugalmi helyzetben – amikor mindhárom komparátor kimenete alacsony szintű – a kapu kimenete **H**-n van. Ekkor a T2, n-csatornás növekményes FET kinyit, jól szimulálva egy hagyományos TTP zárt kontaktusrendszerét. Ha a jelkondicionáló GND-je galvanikusan közösíthető a fogadó gépével, akkor az A kimenettel aktiválhatjuk a fogadó rendszer mérőfejbemenetét.

A T1 emitterkövető emitterpotenciálja is magas szintű. Ilyenkor az OC optocsatoló IR LED-jén az R1 által beállított, mintegy 11 mA-es áram folyik, ezzel a fototranzisztorra telítésbe kerül. Utóbbi egy galvanikusan független kapcsolót szimulál (B, C kimeneti pont).

A korai TTP-be, ill. újabban a TTP-k felfogóegységébe egy piros státuszjelző LED is be van építve. Ez általában nyugalmi helyzetben világít: a hagyományos, kapcsolós TTP-kben egyszerűen sorba van kötve a kontaktusrendszerrel. A kapcsolásunkban ezt a feladatot a LED2 látja el, ami a Jp ábrázolt állásban az R3 által előfeszítve működik. Ha valaki fordított fázisú kijelzést szeretne, azaz a LED2 akkor jelezzen, amikor tapintás történik, a Jp rövidzárhídját áthelyezheti. Ekkor a világító diódába az R4-en keresztül folyik áram, a G309 inverter funkciójú kapu kimenetéről.

Mérés előtt a TTP-t elmozdítjuk, mérés, sorozattapintás közben gyakran változtatjuk a helyzetét, miáltal a mozgásérzékelő szinte folyamatosan prezentálja a sztochasztikus kontaktuszárás/-nyitás jeleit. Amikor a golyó éppen zárja a $+U_T$ -R306-GND áramkört, a diódás VAGY-kapu másik bemenetén az R305, C302 egy-egy pozitív tüskét küld a *Reset* lábra, mindannyiszor újraindítva az időzítést.

A modul *Reset* bemenetét magas szintre húzva, az R316-on keresztül az IC301 resetelődik és a relévezérlő kimenet is aktiválódik. Erre a pontra kívülről a K „rejtett” hátlapi kapcsoló csatlakozik. Ezzel bármikor tetszőleges időtartamú kézi resetelés kapcsolható be, ami kényelmessé teszi a szervizelést és tesztelési célokat is szolgál.

A G305-G306 áramköri környezete egy hagyományos, a mechanikai kontaktusokhoz használatos pergésmentesítő áramkört tartalmaz, csak hogy itt a kontaktust a T302 tranzisztor helyettesíti.

A tapintószár nyugalmi helyzetében tehát a G308 kimenete **H**, a G309-é **L**, a G305-é iamét **H** szintű. A T302 ilyenkor telítésben van, invertál, így a kollektora alacsony szintű (az R312/R315 elvileg 101:1 feszültségosztás-aránya ehhez bőségesen elegendő). Közben a G306 kimenete ismét csak **H**, a C307 pedig kisüti állapotban van.

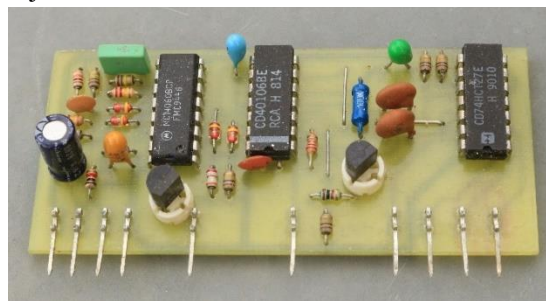
A tapintószár kimozdításakor a T302 lezár, a C307 az R312-n keresztül $+U_T$ -re töltődik, a G306 kimenete pár milliszekundum elteltével **L**-re vált. Amint a munkadarab felületétől eltávolodik a mérőgömb, ismét helyreáll az alapállapot: a T302 az R315-ön keresztül kisüti a C307-et (közben ismét eltelik néhány milliszekundum), az IC303 4. kimeneti pontján egy **L**→**H** impulzusél generálódik. Ez a C305, R309 differenciálótág kimenetén, azaz a G307 10.

pontján egy keskeny pozitív tüimpulzust generál, ami indítja a monoflopot. A következmény: minden tapintási ciklus végén egy-egy nullszint-helyreállítás megy végbe a fotoáram-erősítőkben!

Mint látjuk, a tapintás során a monoflop indítása némi késleltetéssel történik. A mérések szerint a prototípusnál valamelyik Kx bemenet első felfutó impulzusétől számított 26 ms elteltével vált a G306 kimenete. A visszaváltási késleltetés véletlenszerű; attól függ, hogy a tapintó mozgó részének a pergése éppen meddig tart. Az [1]-ben rámutattunk, hogy milyen fontos a státuszjel minél kisebb késleltetéssel való átvitele. Szerencsére a fent tárgyalt pergésmentesítő áramkör nem a státuszjel jelútjában van, így magát a mérést nem lassítja. A késleltetései a tapintó mozgatásához szükséges időhöz képest pedig jelentéktelenek. A szerepe végül is az, hogy kizárólag akkor prezentáljon *egyetlen, korrekt indítóimpulzust* a monoflop számára, amikor a mozgó rész már nyugalomban van.

A gyári jelkondicionáló rendszerek olyan felépítésűek, hogy a tapintások során mindig az első kontaktusbontásra reagálnak, a továbbiakat figyelmen kívül hagyják (hiszen a hagyományos TTP is szépen prellég), ezért a jelkimenetet ezúttal nem pergésmentesítettem.

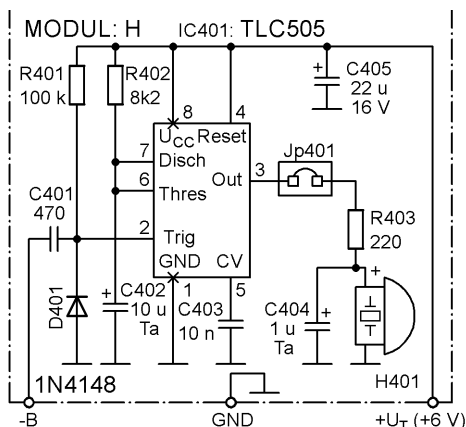
Az elkészült ciklusidőzítő fényképét a 26. ábrán láthatjuk.



26. ábra: A ciklusidőzítő fényképe

3.4 Hangjelző modul (MODUL B)

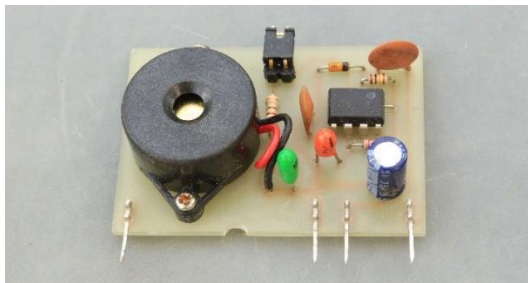
A koordinátamérőgépek és a szerszámgépekhez illeszthető gyári TTP-k jelkondicionálói érintéskor rövid sípoló hangjelzést adnak. A hangjelző modul (kapcsolási rajz: 27. ábra) feladata ennek előállítás, ha netán olyan berendezéshez csatlakoztatjuk tapintófejünket, ami nem generál ilyen hangot. Az egyszerű áramkör alapja az IC401, az R402, C402 időzítő tag által kb. 0,1 s-ra beállított kvázistabil idejű monoflop. Az IC bemenetét a C401, R401 differenciáló taggal „dinamikusá” alakítottuk, így a monostabil egy-egy tetszőleges szélességű négyszögjel lefutó élére aktiválódik. A kimenetére kapcsolt aktív (DC-ről működő) piezozümmér ilyenkor 100 ms időtartamú sípoló hangot ad. Ha erre nincs szükség, a Jp hüvelyhídjának eltávolításával a hangjelzést kiiktathatjuk. A modul -B pontját természetesen a MODUL T T1B kimenetéről vezéreljük.



27. ábra: A hangjelző modul kapcsolási rajza

Az elkészült modul (28. ábra) beállítást nem igényel. Az ellenőrzése egyszerű: ha a táp rákapcsolása után a -B bemenetet egy pillanatra GND-re kötjük, a sípjelzés megszólal. Minden következő próba előtt a C401-et ki kell sütni!

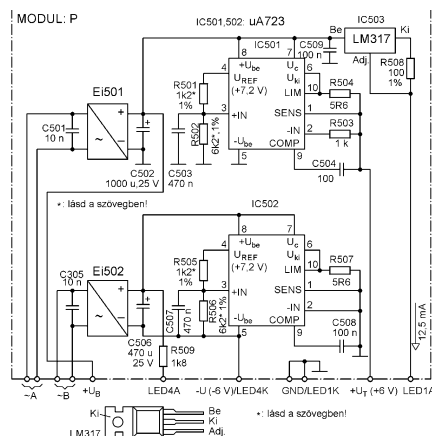
Az egyszerű áramkör a tapintó mozgó részének visszatérésekor keletkező kimeneti tranziens hatására is generálhat jelzést. Ennek elkerülésére az [1] 24. ábráján szereplő komplex pergésmentesítő rendszert kellene beiktatni a MODUL T T1B pontja és a kimeneti fokozat közé. A mintapéldányból kihagytuk, de a MODUL T-t kiváltó mikrokontrollerben szoftverrel és a CLC-ekkel szimulálható volna ez is.



28. ábra: A hangjelző modul fényképe

3.5 Tápstabilizátor modul (MODUL P)

A tápfeszültségek megválasztásánál első sorban a meglévő kis 10 VA-es, névlegesen 2×9 V szekunder feszültségű transzformátorból (HAHN BV EI 481 1118) indultam ki. Ennek a szekundereihez illesztett Graetz-hidakat követő pufferelőkön üresjáratban 14 V DC mérhető. A szekunderek névleges terhelhetősége egyenként 450 mA, amit a mi rendszerünk fogyasztása meg sem közelít. A legnagyobb fogyasztónk a három, párhuzamosan kapcsolt jelfogó és az ezekre csatlakoztatott R5, LED3, de ezek együttes áramfelvétele is csupán 40 mA körüli, a névleges 12 V-ról. A többi áramköri részlet és a jelfogók együttes terhelése valóban 12 V körüli csökkenti a pufferfeszültséget, ami persze ilyenkor már kb. $2 V_{cs-cs}$ hullámossággal jellemezhető. Ez a terhelés is csak viszonylag ritkán és rövid időtartamokra érvényesül, amit egy kellően nagy kapacitású pufferelők jórészt ki is tud egyenlíteni. A relék az adatlap szerint már 8 V-tal gerjesztve meghúznak, és 1 V-ra csökkentett tekercsfeszültségnél engednek csak el!



29. ábra: A tápstabilizátor modul kapcsolási rajza

Az előzetes kísérletek során úgy tűnt, hogy a MODUL T tökéletes működéséhez a +6 V-os tápfeszültség már megfelelő, amit a MODUL B is kedvel. *A legényegesebb szempont az, hogy a T2 kimeneti FET 6 V-os logikai szinttel már biztonságosan kivezélreható.* A két analóg modul tápellátásához negatív tápfeszültség is szükséges, így végül egy ± 6 V-os stabilizátorrendszer mellett döntöttem. Az otthoni alkatrészekészletemben még akadt néhány fémtokozású 723-as, így ezeken alapuló szimmetrikus tápegységet építettem, a gyári ajánlások szerint (29. ábra). A pozitív ágba az R503 driftkompenzáló ellenállást is betervezttem, mert a MODUL K referenciaosztója is a $+U_T$ -ből táplálkozik, ezért érdemes mindent elkövetni ennek stabilitásáért. A 723-asok minimális bemenőfeszültsége 9,5 V. Szerencsére a pufferfeszültség a maximális terhelés alatt sem esik le ennyire.

A LED1 gerjesztéséhez az amatőrökben elterjedt, egyszerű és mégis meglehetősen stabil áramgenerátor-kétpólust választottam (IC503, R508). Az adott IR-LED adatlapja szerint a rá megengedett tartós áram 20 mA, de az R508-cal ennek mintegy a felét, 12,5 mA-t állítottam be – egy $100 \Omega/1\%$ -os ellenállás akadt ugyanis a kezembe –, megelőzve a LED paramétereinek időbeni megváltozását, azaz az eszköz „öregedését”. Az áramgenerátor a pozitív pufferfeszültségre csatlakozik. Ezt a pontot ki is vezettem ($+U_B$); a feszültségét a MODUL A-k J+ lábára küldjük.

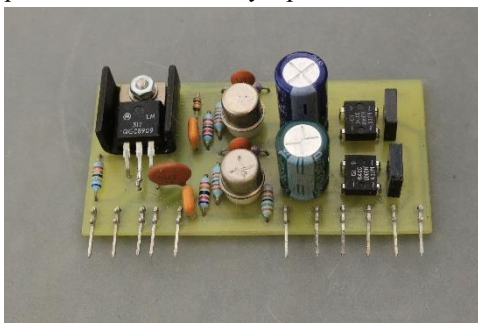
Az érzékenység (azaz a fotoáram-erősítők $1 \mu\text{m}$ -es elmozduláshoz tartozó kimenőfeszültség-változás a nullpont közelében, amit a 3.1. pontban $\pm 50 \text{ mV}/\mu\text{m}$ -ben állapítottunk meg) sok összetevőtől függ. Függvénye például az IR-LED példány és a fotodiódák paramétereinek, a tükrök felületi minőségének, fotodiódaszerezvényeknek a tükrökpár peremétől mért távolságának, a LED-befogó fészekkialakításának és nem utolsósorban a LED gerjesztőáramának. Ez utóbbit a legkönnyebb változtatni: ha a mért érzékenység nagyobb, mint $60 \text{ mV}/\mu\text{m}$, akkor az R508 növelésével csökkentjük az áramgenerátor kimenőáramát! Természetesen a három csatorna érzékenysége is eltérhet egymástól. A fenti megállapítás az átlagerzékenységre értendő. Amennyiben az érzékenység lényegesen nagyobb, pl. 100 mV (a mintapéldánynál ez volt a helyzet), akkor az R101 vagy az R102 helyére huzaláthidalást teszünk, azaz a fotoáram-erősítők visszacsatoló ellenállása csak $10 \text{ M}\Omega$ lesz.

A negatív tápfeszültség terhelése csekély (a prototípusnál 15,5 mA-t mértem), a stabilitása sem kritikus. Csak megszokásból stabilizáltam ezt is egy 723-mal, e helyett egy 78L06, sőt egy 78L05 is megteszi. A 723-as alapú tápágak az R504-nek és az R507-nek köszönhetően már $I_{lim} = 0,65/5,6 = 0,116$ A-es kimenőáramnál leszabályoznak.

Ha a negatív tápágra 79L05 v. 79L06 típusú negatív feszültségű stabilizátort teszünk, akkor az egyik Graetzhidat is megspórolhatjuk.

A LED4-et abból a megfontolásból kötöttem be a kisebb terhelésű negatív tápágra, hogy a készülék feszültség alatti állapotát akkor is jelezze, ha a tapintófej nincs csatlakoztatva. Bár a kísérleti verzióban ez kétségkívül praktikus, műszakilag korrektebb lenne a LED1-gyel sorba kapcsolni, azaz az áramgenerátor kimenőhúrkába iktatni. Egy végleges konstrukcióban így csak a csatlakoztatott tapintófej esetén jelezne, ráadásul az elektronika összefogyasztása tovább csökkenne.

A tápstabilizátor modul fényképét a 30. ábrán láthatjuk.



30. ábra: A tápstabilizátor modul fényképe

3.6 Alaplap

Az összesen 9 db modult, a hálózati transzformátort és az összefüggési kapcsolási rajzon szereplő többi, nem a modulokon található alkatetemet, valamint a csatlakozókhoz, előlapi kezelőszervekhez és LED-ekhez menő vezetékeket az alaplapba forrasztjuk be. Ezek közül a hálózati transzformátor körüli alkatrészekről még nem volt szó. A két 0,5 A-es biztosító, melyeket a trafó adatlapja javasol, a szekundereket védi a terhelés tartós zárata esetére. A primer tekercsel egy 275 V-nál letörő VDR-t kapcsoltam párhuzamosan. Manapság a hálózatra számos gyors áramirányítót, kapcsolóüzemű tápegységet csatlakoztatnak, amelyek hatalmas transziens feszültségtűskéket is produkálhatnak. Zivataros időben a légköri sztatikus elektromosság is veszélyes lehet. Véleményem szerint a kompaktfénycsővek, LED-lámpák korai haláláért is elsősorban a felsorolt hatások felelősek, hiszen a legtöbb kereskedelmi termék semmiféle transziensvédelmet nem tartalmaz. A VDR az elektronikára veszélyes impulzusokat eliminálja, miközben nagy áramcsúcsok alakulnak ki rajta. A Bil az esetleges túldisszipálás ellen védi meg az eszközt, és persze védi a 230 V-os hálózatot is a VDR letörésekor előálló zárlat esetére.

3.6.1 Dobozolás

A szerelt alappanel kényelmesen elfér a kereskedelembe kapható 150×150×60 mm-es alumínium műszerdobozban (típusa: M29, ill. M29/G). A doboz belsejéről készült fotó a 31. ábrán látható. A fotoáram-erősítő – komparátor-párok feltűnő sorszámozást kaptak.



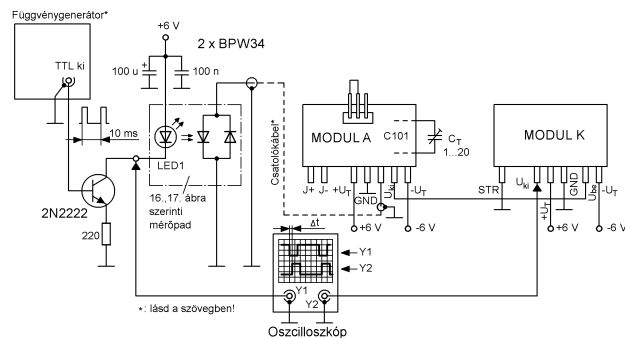
31. ábra: Elektronikadoboz, burkolat nélkül

Felhívom a figyelmet arra, hogy a fotoáram-erősítők rendkívül zavarérzékenyek, így a megfelelő árnyékolásuk alapvető fontosságú. Megfelelő működés csak zárt műszerdoboz esetén várható. A tapintófejben a mozgásérzékelő kábelét egészen a szenzor talppontjáig árnyékolni kell! Ez újabb indok arra, hogy az erősítőket legjobb volna a tapintóházba szerelni.

4 BEÁLLÍTÁS

4.1 A fotoáram-erősítők átvitelének beállítása, a rendszer jelkésleltetésének megmérése

A méréshez a 32. ábra szerinti összeállítást használtam. Függvénygenerátorként egy EMG 12574 műszert használtam, amelyen 100 Hz-es, 80% kitöltési tényezőjű négyszögjelet programoztam be, ezt a TTL kimenetéről vezettem el. A már megismert mikrométeres mérőpadba befogott TTP mozgó egységben levő LED1-et a 2N2222-ből és a 220 Ω -os ellenállásból álló áramgenerátor hajtja meg nagyjából 12...15 mA-es áramimpulzusokkal. Hogy a tényleges üzemi viszonyokat minél jobban szimuláljam, a mérőpadba telepített fotodióda-pár és a MODUL A közé ugyanakkora kapacitású árnyékoló kábelcsoportot kötöttem, mint amekkora kapacitása a végleges kábelretek van. Ekkor derült ki számomra, hogy a műszertechnikában általánosan alkalmazott kéteres teflonszigetelésű (fehér, tekercselt szalagburkolatú, kék-fehér érpárú, meglehetősen merev) árnyékoló kábelnek milyen nagy a kapacitása: az egyik eret az árnyékolással összekötve és a két ér között mérve, az kb. 500 pF/m-nek bizonyult! Végül egy nagyjából 20 cm-es darabot vágtam le a méréshez.



32. ábra: A jelkésleltetés mérési összeállítása

Ezzel szemben az elektronikai dobozhoz dugaszolt, szerelt DVI kábel három fotoáram-csatornájának teljes kapacitása egyenként kb. 100 pF, a huzalrendező nyákgyűrű csatlakozópontjaitól a fotoáram-erősítők bemenetéig értve. (Természetesen a kábelkapacitás mérésekor sem a fotodióda-párok, sem az erősítőmodulok nem voltak csatlakoztatva.) A $+U_T$ és a $-U_T$ tápfeszültséget kétcsatornás labortáp szolgáltatta. A jelalakok vizsgálatához egy kétcsatornás digitális oszcilloszkópot használtam, az ábrán külön nem feltüntetett 10 M Ω -os mérőfejekkel. A MODUL K 10 mV-os felső komparálási szintre volt állítva.

A fotoáram-erősítő nullkompenzálását a mérés során a Jp101-gyel kiiktattam. A C101 helyére ideiglenesen 1,5...15 pF-os trimmerkondenzátort téve, és a szkóppal a MODUL A kimenetét figyelve, a mikrométerrel kb. 20 mV-os amplitúdójú kimenőjelet beállítva, a trimmert a kiforgatott helyzetéből addig állítottam, amíg a felfutó él felső túllövése megszűnt, az él kissé lekerekedett. Ezután a kiforrasztott trimmert megmértem, majd a végleges kerámiakondenzátort ültettem be a helyére. A mintapéldányban mindhárom csatornához C101 = 6,8 pF-os példány felelt meg.

A szkópot végül az ábra szerint csatlakoztattam. A Δt késleltetés az áramgenerátor kimenete és a komparátor kimenete között a fenti mérési körülmények mellett kevesebbnek bizonyult, mint 50 μs . Emlékeztetőül: az [5]-ben bemutatott IR státuszátvitelű normál TTP átviteli láncja is nagyjából erre volt képes. Ha egy profibb konstrukcióban az erősítők is a tapintófejen, a fotoérzékelők közvetlen közelében volnának, akkor az átviteli késleltetés valamelyest csökkenne, bár a két antiparalel kapcsolt, előfeszítetlen BPW34 eredő rétegapacitása is számottevő, kb. 140 pF! Megjegyzem, hogy a hárombemenetű kapu és a két kimeneti fokozat nem szerepel a mérési láncban, mert azok saját, összesen legfeljebb néhányszor 10 ns-os késleltetése elhanyagolható.

4.2 Az érzékelőrendszer végleges beállítása, ellenőrzése

Ez a tevékenység bizony türelmet igénylő, babra munka! A finomállító mechanikákat felszereljük és állítócsavarokkal középpállásba helyezzük. (A három gyűrűszegmens összefüggő síkban fekdjön.) A mozgó részt a helyére tesszük, de tapintószárral nem szereljük fel. E helyett alátétekkel és egy nyomórúgóval felszerelt M3-as csavarral húzzuk be a helyére. A golyók biztos, határozott felfekvését a rugóerő biztosítja. A szerelt tokfedelet a tapintóházhhoz csavaroztam, hogy a külső fényeket kizárjam, ill. a megfelelő elektromos árnyékolás is biztosítva legyen.

A nyákra szerelt fotodióda-párokat egyenként állítottam be, miután a 29. ábra szerinti mérőáramkörbe kötöttem be az éppen vizsgálat alatt állót. A MODUL K most érdektelen, és a szkópot is egycsatornás módba állítottam. A generátort ezúttal DC módra kapcsoltam, miáltal TTL kimenetén permanens DC szint jelent meg. A fotoérzékelő paneljét a helyére illesztettem, és a szkóp Y1 csatornájának 2 V/osztás függőleges érzékenysége mellett megfigyeltem az eltérés irányát, ami – lévén a panelt alul kicsit hosszabbra hagytam – negatív irányú kell hogy legyen. Természetesen ilyenkor az érzékelőrendszert a külső fényektől el kell zárni! Aztán a helyéről kivéve leeresztetem a nyák alsó éléből egy kicsit, majd visszaillesztettem. A műveletet mindaddig ismételtém.

amíg a szkóp fénysugara a nullvonalat jól megközelítette. Ha a korábbiól ismert $50 \text{ mV}/\mu\text{m}$ érzékenységgel számolunk, akkor 1 V -os eltérés $20 \mu\text{m}$ -es nullhibának felel meg, ami a rendszer végleges összeszerelése után a finomállító mechanikával könnyedén korrigálható lesz.

Ezután a panelt az itt is bevált, gyorsan kötő Metal Epoxi Glue műgyantával véglegesen rögzítettem. Ez a beállítás kissé hosszadalmas folyamat az alsó tokfedél állandó ki/beszerezés miatt, amit ráadásul a további két fotoérzékelővel is meg kell ismételni. Félhomályos helyzetben könnyebben, gyorsabban célt érünk, viszont ehhez éles szem kell...

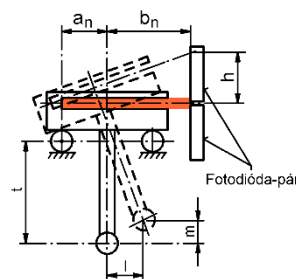
Bár mind az alkatrészek elkészítésénél, mind az összeszerelésük során az elérhető legnagyobb pontosságra törekszünk, a fotodióda-párok lapkái közötti eltérő távolság, az álló- és mozgó rész elkészítési és szerelési pontatlanságai jelentős eltérést okozhatnak a három csatorna eredő átviteli tényezői között. Ezek egyrészt a fotoáram-erősítők valamelyik visszacsatoló ellenállásának cseréjével, másrészt a komparátorok küszöbszintjének átállításával kompenzálhatók.

Végleges összeszerelés közben a görgős ülékpárokat vonjuk be vékonyan műszerolajjal!

5 VÁRHATÓ ÉRZÉKENYSÉG

A következőkben a statikus érzékenységet próbálom meghatározni a mechanika geometriai viszonyaiból levezetve, miközben számos egyszerűsítő feltétellel élek. Figyelembe vehetjük ugyanis, hogy bár a tapintás során a tapintógömb akár millimétereket is elmozdulhat, a tényleges érzékelőstátusz kiadása az érintést követő mikronos nagyságrendű elmozdulás közben megtörténik, a további mozgás számunkra közömbös.

Az 33. ábrán a mozgó rész kinematikai vázlata látható, erősen eltorzított arányokkal. Az l mértékű kitérítés oldalirányban történik, a szaggatottan ábrázolt helyzetbe. Úgy tekinthetjük, hogy a mozgó rész a bal oldali golyó középpontja körül fordul el. A valóságban a golyó közben gördül és csúszik is a görgők között. Még bonyolultabbak a viszonyok, ha két golyót összekötő tengely mentén történik az elfordulás. Éppen a tapintógömb mikronos nagyságrendű elmozdulását tekintve, ezekkel nem érdemes foglalkoznunk. Szintén elhanyagoljuk a tapintógömbnek a rendszer szögelfordulásából következő parányi m elmozdulását.



33. ábra: A mozgó egység kinematikai vázlatja

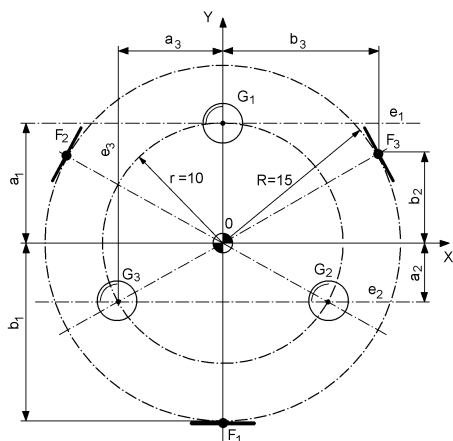
Az elfordulás következtében a két fotodiódát eredetileg egyenlő mértékben megvilágító fénysáv h mértékben fölfelé elmozdul, előidézve a nullánál nagyobb eredő fotoáramot.

Leegyszerűsítve a viszonyokat egy szögelmélővel számolhatunk, amelynek karjai az $a_n + b_n$ és a t , a szögelmélő pedig az l elmozdulást transzformálja át h -ba:

$$h = (a_n + b_n)/t.$$

Az 34. ábra az érzékelőrendszer geometriai viszonyait mutatja, felülnézetben. Az O ponton megy át a tapintószárnak a rajz síkjára merőleges tengelye. A G_1 , G_2 , G_3 pont az r sugarú körön elhelyezkedő támasztógolyók középpontja, az F_1 , F_2 , F_3 pedig az R sugarú kör mentén érintőlegesen felszerelt fotoérzékelőchipek síkjának középpontja. A fenti pontok két, közös súlypontú egyenlő oldalú háromszög csúcspontjai. Az érzékelőt az X -, Y -tengelyekkel jelzett koordináta-rendszerbe helyeztük, melynek origója az O ; ezen halad át a Z -tengely (tehát a tapintószár tengelye).

A tapintógömb kitérítéskor fellépő elfordulásokat három evidens forgástengely mentén vizsgáljuk. Ezek az X -tengellyel párhuzamos e_1 , ill. e_2 , valamint az Y -tengellyel párhuzamos e_3 . Előljáróban leszögezhetjük, hogy a tapintó érzékenysége $+Z$ irányú elmozdításra a legnagyobb, hiszen ez változtatás nélkül adódik át a mozgó részre. Feltételezve az $50 \text{ mV}/\mu\text{m}$ -es átviteli tényezőt és a komparátorok 10 mV -os felső kapcsolási küszöbszintjét, $+Z$ irányban a „megszólalási küszöb” $0,2 \mu\text{m}$. (Tudjuk, hogy $-Z$ irányban ez a rendszer nem működik.)



34. ábra: Az érzékelőrendszer geometriai viszonyai

Az egyenlő oldalú háromszögekre vonatkozó közismert elemi geometriai azonosságokból (az O pont a magasságvonalakat $1/3 - 2/3$ szakaszra osztja, a háromszögek oldalai pedig az $a = 2m/\sqrt{3}$ képlettel határozhatók meg), adódnak az 1. táblázatban feltüntetett számított távolságok.

1. táblázat

Tengely e_n , mm	a_n mm	b_n mm	$a_n + b_n$ mm
e_1	10	15	25
e_2	5	7,5	12,5
e_3	8,7	13	21,7

Ezeket egytizedes jegyre kerekítettem, az R megadásánál pedig figyelembe vettem azt, hogy a BPW34 chipje pár tized milliméterre van a tok homloklapfelületétől. Az említett elkészítési/szerelési pontatlanságok ennél nagyobb számolási pontosságot nem indokolnak. Nyilvánvaló, hogy a koordináta-rendszert 120 fokként elforgatva ugyanilyen érzékenységi adatokat kapunk, azaz a rendszernek összesen 9 evidens tengelye van.

A fentiek, ill. a szögemelő képlete alapján a következő következtetéseket vonhatjuk le:

- a különböző támadási irányokban jelentős eltérés adódik a tapintórendszer sugárirányú érzékenysége tekintetében. Legérzékenyebb az e_1 -tengelyre merőleges kitérítésre, éppen feleakkora érzékenységet mutat az e_2 -re merőleges irányban,
- a két irány közötti támadási szögeknél a fenti két érzékenység közötti bármely értéket produkálhatja, pl. az e_3 körüli elfordulás esetén adódót is,
- minél rövidebb tapintószárat használunk, annál nagyobb az érzékenység (és tegyük hozzá, annál nagyobb a merevség és annál jobb a dinamikus viselkedési jellemzők).

Ezek a jellegzetességek hasonlóak a hagyományos, kontaktusbontásos TTP-hez.

Ha a legrosszabb esetben is $1 \mu\text{m}$ -es érzékenységet tehát $h = 0,2 \mu\text{m}$ -t várunk el, akkor a képlet átrendezése után számolható maximális t tapintószár-hossz:

$$t_{\max} = (a_2 + b_2) \cdot l/h = 12,5 \cdot 10,2 = 62,5 \text{ mm}.$$

A ténylegesen használt tapintószárak ennél általában jóval rövidebbek, így elvileg nem probléma a szubmikronos oldalirányú érzékenység elérése. Mindez csupán a gondos, precíz kivitelezésen múlik!

A korrektség okán megemlítem, hogy ennél a mérőfejnél egy egyedi jelenség is tapasztalható: a nullázási ciklusok között a fotoáram-erősítők nullszintje vándorol, ami az érzékenység kismérvű ciklikus változását okozza.

A kísérleti optoelektronikai TTP-vel egyelőre idáig jutottam, de a sugárirányú érzékenység jelentős ingadozása a jelfeldolgozó áramkörök továbbgondolást kívánja. Az olyan, szintén három analóg jelátalakítót tartalmazó nyúlásmérőbéllyeges tapintófejek, mint az [1]-ben is bemutatott OMP400, a hivatkozott írás 7. ábrája szerinti, rendkívül kiegyensúlyozott irányfüggését mutatja. Jelen TTP-nknél ehhez a három fotoáram-erősítő kimenőjelének megfelelő OPA-alapú hálózattal történő további jelfeldolgozására volna szükség. A konstrukciót továbbgondolók bátran kísérletezzenek vele!

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Pálincás, T. (2024). Sok minden a TTP-ről, Touch-Trigger Probe Piezo+; *Bánki Közlemények*, 6(3), 60 éves Gyártástechnológia Tanszék (szerk.: dr. Drégelyi-Kiss Ágota), pp. 36-49.
- [2] Pálincás, T. (2017). Öntisztító TTP, *Rádiótechnika* 2017/4., p. 118.
- [3] Pálincás, T. (2017). A precíziós érintkezőpár, *Rádiótechnika* 2017/10., p. 334.
- [4] Pálincás, T. (2018). Rajzolat a nyáklemezen, *Rádiótechnika* 2018/6., pp. 185-197.
- [5] Pálincás, T. (2016). Érintkezős tapintófej, infravörös státuszátvitellel 3., *Rádiótechnika* 2016/3., pp. 92-94.

Fecskendőpumpás infúzióadagolók térfogatáram kalibrálása infúzióadagoló mérőkészülékkel

The flow calibration procedure of syringe pumps with infusion device analysers

Zombory Péter

Országos Korányi Pulmonológiai Intézet, Budapest, Magyarország

zyzka74@gmail.com

Összefoglalás — Magyarországon a mindennapi gyakorlat azt mutatja, hogy az egészségügyben használt orvostechnikai eszközök különböző vizsgálatainál, illetve méréseinél nem jellemző, hogy a mért értékekhez meghatározásra kerüljön a mérési bizonytalanság. A tanulmányban konkrét példán keresztül bemutatásra kerül egy fecskendőpumpás infúzióadagoló mérőkészülékkel végzett térfogatáram mérésekor milyen bizonytalansági tényezők vehetők figyelembe, és hogyan lehet meghatározni a mért érték kiterjesztett mérési bizonytalanságát.

Kulcsszavak: kalibrálás, infúzióadagoló, orvostechnikai eszköz, bizonytalanság, infúzióadagoló-mérő

Abstract — Everyday practice in Hungary shows that it is not typical for various examinations and measurements of medical devices used in the healthcare sector to be accompanied by a value of measurement uncertainty. In this study, A specific example is used to illustrate which uncertainty factors can be taken into account and how the expanded measurement uncertainty of the measured value can be determined in case of measuring the volume flow rate of a syringe pump infusion dosing device.

Keywords: calibration, syringe pump, medical device, uncertainty, infusion device analyzer, IDA

1 BEVEZETÉS

Manapság a különböző mérőműszerek kalibrálása az ipar különböző területein széles körben elterjedt eljárásnak számít. A cégen kívüli kalibrálások esetében sokszor NAH által akkreditált kalibráló laborokat bíznak meg, míg a cégen belül végzet kalibrálásokat gyakran metrológiai szakember közreműködésével intézik. Vagyis a kalibrálási eljárásokat többnyire metrológiában járatos szakemberek dolgozzák ki, valamint szakemberek végzik el.

Az egészségügyben használatos mérőfunkcióval rendelkező műszerek esetében hazánkban ez még nem terjedt el, ezt támasztja alá az a tény is, hogy Magyarországon nincs akkreditált kalibráló laboratórium, amely rendelkezne orvostechnikai eszköz kalibrálásának akkreditációjával.

A bonyolultabb orvostechnikai eszközök esetében ugyan vannak különböző, bizonyos időközönként előírt ellenőrző mérések (QC), amelyet szoktak „kalibrálásnak”, vagy „hitelesítésnek” is nevezni, bár ezek a mérések nem

felelnek meg definíció szerinti [1] kalibrálásnak, illetve hitelesítésnek. Továbbá egyes orvostechnikai eszközök esetében, a 4/2009. (III. 17.) EüM rendelet előírja az időszakos felülvizsgálatokat, amelyek nem csak kvalitatív vizsgálatokat, hanem méréseket is tartalmaznak. Ezekről, az orvostechnikai eszközökön végzett mérésekről általában elmondható, hogy nem kötelező, és ebből adódóan nem is szokás megadni sem a mérési jegyzőkönyvekben, sem a mérési eljárásokban a mérési bizonytalanságot. Pedig a mért értékek értelmezhetősége szempontjából, valamint a különböző mérések összehasonlíthatóságának érdekében alapvető fontosságú lenne, hogy tudjuk, a mérőműszer által mutatott mért érték mekkora bizonytalansági sávjában mekkora valószínűséggel található a mérendő fizikai paraméter valódi értéke.

A továbbiakban bemutatásra kerül, hogy egy orvostechnikai eszközfajta, a fecskendőpumpás infúzióadagolók esetében a térfogatáram kalibrálása során milyen bizonytalansági tényezőkkel lehet számolni, és ezeket miként lehet felhasználni a végső kiterjesztett mérési bizonytalanság meghatározásához.

2 AZ INFÚZIÓADAGOLÁS ALAPJAI

Infúzióadagoláskor cél az, hogy hidratálás, ionháztartás fenntartása, táplálás, vagy gyógyszerek szervezetbe juttatása céljából, előre megadott térfogatárammal az ember vérkeringésébe juttassanak vízben oldott anyagokat. Többfajta működési elvű gépi infúzióadagoló létezik, ezek közül az egyik a fecskendőpumpás infúzióadagoló, másnéven perfuzor. A fecskendőpumpás gépi infúzióadagoló esetén a készülékbe egy folyadékkal feltöltött fecskendőt kell behelyezni. A fecskendő dugattyúját a készülék, az előre beállított paraméterek alapján nyomja, és a folyadékot egy, a fecskendőhöz csatlakoztatott csövön keresztül a páciens véráramába juttatja.

Gépi infúzióadagolók kalibrálásakor elsődleges referencia-mérési eljárásként a gravimetrikus mérési módszert szokták alkalmazni. Ezen mérési elv szerint a gépi infúzióadagoló adott ideig a desztillált vizet egy tartályba adagolja, majd megméri a tartályban lévő víz tömegét. A víz tömegéből és a víz sűrűségéből számolható

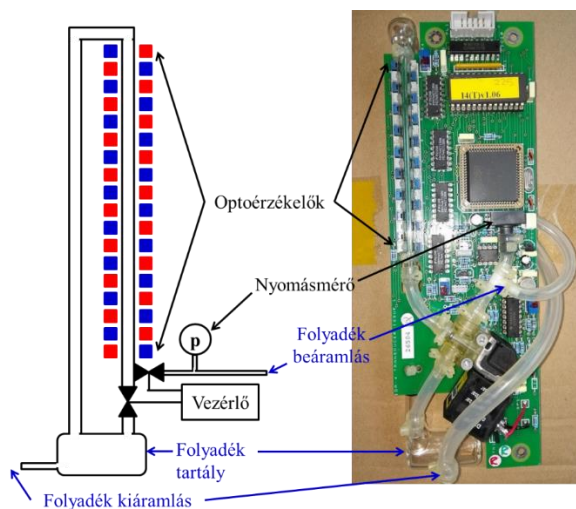
a térfogat, majd a víz térfogatának és az adagolási időnek a hányadosa megadja a térfogatáramot.



1. ábra: Fecskendőpumpás infúzióadagoló

Másodlagos referenciamérési eljárásként összehasonlítás elvén működő kalibrálást szoktak alkalmazni, vagyis amikor az infúzióadagolón beállított térfogatáram értéket összehasonlítják a kalibrátor által mutatott értékkel.

A most bemutatott példában használt kalibrátor, egy Fluke gyártmányú, IDA-4 típusú infúzióadagoló mérő készülék (Infusion Device Analyser - IDA). A készülékben egy bűretta található, amelybe az infúzióadagoló adagolja a vizet. A bűretta oldalán adott távolságonként optoérzékelők sorakoznak, amelyek érzékelik a folyadékoszlop meniszkuszát. A készülék méri az egyes érzékelők által adott jelek közti időt, vagyis, hogy az adott térfogatot mennyi idő alatt érte el a készülék. A térfogat és idő hányadosából számolt térfogatáram értéket jelzi ki a készülék.



2. ábra: Az IDA-4 infúzióadagoló mérőrendszerének elvi vázlata és fizikai megvalósítása

3 MÉRÉSI BIZONYTALANSÁG SZÁMÍTÁSA

A mérési bizonytalanság konkrét számításánál – amely majd felhasználásra kerül a kalibrálási eljárásban megadott kiterjesztett mérési bizonytalanság meghatározásánál – csak 50 ml-es fecskendő, és csak az adott infúzióadagoló esetén maximális 99,9 ml/h adagolási sebesség adatai lettek felhasználva. Ennek a példának nem célja minden fecskendőméret, illetve több térfogatáram-érték mellett megadni a pontos bizonytalanságértékeket. Az ismertett számítási módszerek alapján a fenti paraméterek változása esetén már egyszerűen kiszámíthatók az adott paraméterekhez tartozó pontos bizonytalanság érték.

A fecskendőpumpás infúzióadagoló kalibrálásánál az alábbi bemeneti mennyiségek becslését és értékelését végezzük el:

- *A-típusú* bizonytalanság kiértékelése: észlelésen (mérésen), és a valószínűség-eloszlás gyakoriságon alapul. Mérési sorozatok (kalibrálandó készülék, etalon) esetén a sorozat korrigált tapasztalati szórás meghatározása után az átlag tapasztalati szórásának becslésével határozzuk meg a standard bizonytalanságot.

- *B-típusú* bizonytalanság meghatározása: az észlelési sorozat statisztikai értékelésétől eltérő módszerrel, a rendelkezésre álló információ alapján tudományos megítélással történik.

A mérés modellje:

$$H = (Q_m + \delta Q_m + \delta Q_{kal} + \delta Q_{ferde}) - (Q_{infu} + \delta Q_{R_infu} + \delta Q_d + \delta Q_{t_fecs} + \delta Q_{t_viz} + \delta Q_{\varphi} + \delta Q_{c_szelep} + \delta Q_{c_hidro} + \delta Q_{c_vizmin})$$

H – A mérési hiba értéke,

Q_m – A kalibrátor által mért átlag térfogatáram értéke,

Q_{infu} – Az infúzióadagolón beállított térfogatáram értéke.

A korrekciós tényezők megnevezése:

1. δQ_m – A kalibrálandó eszköz ismétlőképességéből származó bizonytalansági összetevő.
2. δQ_{kal} – Az IDA-4 kalibrátor kalibrálási bizonyítványából származó bizonytalansági összetevő.
3. δQ_{ferde} – A kalibrátor nem vízszintes elhelyezésből származó bizonytalansági összetevő.
4. δQ_{R_infu} – Az infúzióadagoló digitális kijelzés felbontásából adódó bizonytalansági összetevő.
5. δQ_d – Gyártáskor a fecskendő névleges átmérőjétől való eltéréséből származó bizonytalansági összetevő.
6. δQ_{t_fecs} – Környezeti hőmérsékletingadozás miatt bekövetkezett fecskendőátmérő-változásból származó bizonytalansági összetevő.
7. δQ_{t_viz} – Környezeti hőmérsékletingadozás miatt bekövetkezett víz hőtágulásából származó bizonytalansági összetevő.
8. δQ_{φ} – Környezeti páratartalomtól eredő bizonytalansági összetevő.
9. δQ_{c_szelep} – A szerelék rugalmasságából és a szelep elzáródásakor keletkező nyomásváltozásból eredő bizonytalansági összetevő.
10. δQ_{c_hidro} – A szerelék rugalmasságából és a bűrettában létrejövő hidrosztatikai nyomásból származó eredő bizonytalansági összetevő.
11. δQ_{c_vizmin} – A méréshez használt víz összetételétől, vagyis a sűrűség változásából származó bizonytalansági összetevő.

A bizonytalansági összetevőket okozó fizikai hatásokat valószínűségi változókkal képezzük le. Ezen valószínűségi változókat sűrűségfüggvényükkel, várható értékkel, valamint szórással jellemezhetjük. A bemeneti változó becsléssel meghatározott mérési bizonytalanságát szórás becslésével határozzuk meg, és standard

bizonytalanságnak nevezzük. A várható értékeket (a véletlen hatások miatt) 0-nak feltételezzük, vagyis csak a mérési bizonytalanságot növelik.

3.1 Standard mérési bizonytalanságok meghatározása

3.1.1 A kalibrálandó eszköz ismétlőképességéből származó bizonytalanság

A mérés befejeztével a kalibrátor által kinyomtatott mérési adatok rögzítésre kerülnek egy Excel-táblázatba. A táblázatba beírt adatok, a mérési ciklusonként rögzített térfogatáram csúsztatott átlag értékek. A csúsztatott átlag értékekből az Excel számolótáblája visszszámolja mérésenkénti csúsztatott átlagból a mindenkori mérési ciklus térfogatáram-értékét. Az A-típusú becslés során a térfogatáram-értékekből a számítótábla kiszámolja a szórást, valamint a standard bizonytalanságot.

Az alábbi képlettel határozzuk meg a csúsztatott átlag eredményéből a mérésenkénti eredményt:

$$Q_i = \left(\bar{Q}_i - \frac{\sum_{j=1}^{i-1} Q_j}{i-1} \right) \cdot i,$$

ahol Q_i az i -edik mérési ciklus mérési eredménye, $\bar{Q}_i$ az i -edik mérési ciklus kalibrátor által kinyomtatott csúsztatott átlag eredménye, i a mérési ciklusok sorszáma.

A mérési ciklusonkénti térfogatáram értékekből a SZÓRÁSA() függvénnyel kiszámoljuk a korrigált tapasztalati szórást. A korrigált tapasztalati szórás képlete:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}},$$

ahol s a korrigált tapasztalati szórás; Q_i az adott mérési ciklus térfogatáram; $\bar{Q}$ a mért térfogatáram átlaga; i futóindex, a mérési ciklus száma, n az összes mérési ciklus száma.

A kalibrálandó eszköz ismétlőképességéből származó standard bizonytalanság meghatározása:

$$u(Q_m) = \bar{s} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Példa

Az infúzióadagolón a maximális 99,9 ml/h térfogatáram van beállítva. Egy mérés általában 200 mérési ciklusból áll, vagyis: $n=200$. Az Excel által kiszámított szórás: $s = 4,64616$ ml/h.

$$u(Q_m) = \bar{s} = \frac{4,64616}{\sqrt{200}} = 0,32853 \text{ [ml/h]}.$$

3.1.2 Az IDA-4 kalibrátor kalibrálási bizonyítványából származó bizonytalanság

A kalibrátor kalibrálási bizonyítványában szereplő kiterjesztett mérési bizonytalanság, $U=1,20$ ml/h. A kalibrálási bizonyítványban $k=2$ kiterjesztési bizonytalanság szerepel, ezért a standard bizonytalanság eloszlását normálisnak feltételezzük és az értéke:

$$u(Q_{kal}) = \frac{U}{k} = \frac{1,20}{2} = 0,60 \text{ [ml/h]}.$$

3.1.3 Az infúzióadagoló digitális kijelzés felbontásából adódó bizonytalanság

Az infúzióadagoló digitális kijelzésének felbontása, $R_{Infu} = 0,1$ ml/h. Egyenletes eloszlást feltételezve, a bizonytalanság:

$$u(Q_{R_{Infu}}) = \frac{R_{Infu}}{2\sqrt{3}} = \frac{0,1}{2\sqrt{3}} = 0,02887 \text{ [ml/h]}.$$

3.1.4 Gyártáskor a fecskendő névleges átmérőjétől való eltéréséből származó bizonytalanság

A fecskendőpumpás infúzióadagoló egyenletesen tolja a fecskendő dugattyúját egy előre meghatározott sebességgel. Ha változik a fecskendőhenger belső átmérője, változik a folyadék térfogatárama is, azonos beállítások mellett.

A fecskendőpumpás infúzióadagoló kalibrálásakor nem használunk egyedileg kalibrált fecskendőt, hanem az általánosan használt fecskendőkkel történik a kalibrálás. A fecskendő gyártóknak az ISO 7886-2:1996 szabvány szerinti tűréssekkel kell gyártaniuk a fecskendőket.

Az ISO 7886-2:1996 [2] szabvány előírja a különböző térfogatú fecskendők belső átmérőjének névleges értéktől való megengedett legnagyobb eltérését (1. táblázat).

1. ISO 7886-2:1996 szabvány szerinti fecskendők, névleges belső átmérőjének tűrése

Névleges térfogat ml	Névleges belső átmérő tűrése ±%
10	1
20	1
30	0,5
50	0,5

Meg kell határozni, hogy a fecskendő belső átmérőjének változása mekkora bizonytalanságot okoz a térfogatáramlásban.

A bizonytalanság az alábbi értékektől függ:

- Fecskendő névleges térfogata
- Fecskendő belső átmérőjének névleges értéke
- Beállított térfogatáram névleges értéke

50 ml-es fecskendő belső átmérőjének hibája, $h_d = \pm 0,5\%$. Átmérő változása a hibasáv felszélességére vonatkoztatva:

$$\Delta d = d \cdot \frac{h_d}{100}.$$

Egyenletes eloszlást feltételezve, az átmérő bizonytalansága $u(d) = \frac{\Delta d}{\sqrt{3}}$.

A fecskendő henger térfogatának képlete:

$$V = \frac{d^2}{4} \cdot \pi \cdot h,$$

ahol V a fecskendő henger térfogata; d a fecskendőhenger átmérője; h a fecskendőhenger magassága (50 ml-ig).

A térfogatáram $Q = \frac{V}{t}$, ahol Q a térfogatáram; V a térfogat, t az idő.

A fecskendő henger térfogatának képletét behelyettesítve a térfogatáram egyenletébe:

$$Q = \frac{h \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4}}{t} = \frac{h \cdot \pi \cdot d^2}{4t}.$$

A h -t megkaphatjuk fecskendő henger térfogatának képletét átrendezve:

$$h = \frac{V}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}}.$$

A t értékét megkaphatjuk a térfogatáram képletet átrendezve:

$$t = \frac{V}{Q}.$$

A fecskendő belső átmérőjének változása által a térfogatáramlásban okozott bizonytalanság:

$$u(Q_d) = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial d}\right)^2 \cdot u^2(d)} = \sqrt{\left(\frac{h \cdot \pi \cdot 2d}{4t}\right)^2 \cdot u^2(d)},$$

ahol V a térfogat, vagyis a fecskendő névleges értéke [ml]; d a fecskendő belső átmérőjének névleges értéke [cm]; Q a beállított térfogatáram névleges értéke [ml/h]; h a fecskendő henger magassága az aljától a maximális névleges osztásig [cm]; t az idő [h]; $u(d)$ a fecskendő henger átmérőjének bizonytalansága, ami a gyártás során előforduló hibából adódik [cm].

Példa

Kalibrálásnál az 50 ml-es Braun Perfusor fecskendőt használva, aminek a névleges belső átmérőjére 28,1 mm [3], és 99,9 ml/h adagolási sebességet beállítva a térfogatáram bizonytalanság számítása:

$$u(d) = \frac{\Delta d}{\sqrt{3}} = \frac{d \cdot \frac{h_d}{100}}{\sqrt{3}} = \frac{2,81 \cdot \frac{0,5}{100}}{\sqrt{3}} = 0,00811177 \text{ [cm]},$$

$$u(Q_d) = \sqrt{\left(\frac{h \cdot \pi \cdot 2d}{4t}\right)^2 \cdot u^2(d)} = \sqrt{\left(\frac{8,062 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 2,81}{4 \cdot 0,5005}\right)^2 \cdot 0,0006182^2} = 0,5768 \text{ ml/h}.$$

3.1.5 Környezeti hőmérsékletingadozás miatt bekövetkezett fecskendőátmérő-változásból származó bizonytalanság

A labor hőmérséklete $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ tartományban ingadozhat. Temperálás céljából a kalibrálás előtt a kalibrátort, a kalibrálandó infúziópumpát, szerelékeket és a méréshez használt vizet is az ajánlásoknak megfelelően legalább 12 órát a laborban kell tárolni [4]. Ezért a víz és a fecskendő hőmérséklete is biztos, hogy $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ -os tartományon belül lesznek. Általában a fecskendőméret névleges értékét 20°C -ra szokták megadni. Vagyis, a hőmérséklet változásával változik a fecskendő mérete is.

A fecskendő méreteinek változásai közül, csak a fecskendőhenger belső átmérőjének változása van hatással

a térfogatáramra. A fecskendők henger része, valamint a dugattyú szár, polipropilénből készülnek [5,6].

A polipropilén lineáris hőtágulási együtthatója 20°C -on $\alpha_{pol} = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ [7]. Ebből kiszámítható a fecskendő henger belső átmérője 18, illetve 22°C -on. Ezen két érték között egyenletes eloszlást feltételezve kiszámítható a térfogatáram bizonytalansága.

A hőmérsékletváltozás értéke $\Delta T = \pm 2^\circ\text{C}$. A fecskendő belső átmérőjének változása a hőmérséklet tartomány félszélességére:

$$\Delta d_{h\delta} = d_0 \cdot \alpha_{pol} \cdot \Delta t,$$

ahol $\Delta d_{h\delta}$ a fecskendő belső átmérőjének változása, hőmérsékletváltozás hatására; α_{pol} a fecskendő hőtágulási együtthatója; Δt a hőmérséklet változása.

Egyenletes eloszlást feltételezve, az átmérő bizonytalansága:

$$u(d_{h\delta}) = \frac{\Delta d}{\sqrt{3}}.$$

A környezeti hőmérsékletingadozása következtében, a fecskendő belső átmérőjének változása miatt, egyenletes dugattyú sebesség mellett, a térfogatáramlásban okozott bizonytalanság:

$$u(Q_{t_fecs}) = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial d}\right)^2 \cdot u^2(d_{h\delta})} = \sqrt{\left(\frac{h \cdot \pi \cdot 2d}{4t}\right)^2 \cdot u^2(d_{h\delta})}.$$

ahol V a térfogat, vagyis a fecskendő névleges értéke [ml]; d a fecskendő belső átmérőjének névleges értéke [cm]; Q a beállított térfogatáram névleges értéke [ml/h]; h a fecskendőhenger magassága az aljától a maximális névleges osztásig [cm]; t az idő [h]; $u(d_{h\delta})$ a hőmérsékletváltozásból eredő fecskendőhenger átmérőjének bizonytalansága [cm].

Kalibrálásnál az 50 ml-es Braun Perfusor fecskendőt használva, aminek a névleges belső átmérője 28,1 mm, és 99,9 ml/h adagolási sebességet beállítva a térfogatáram bizonytalanságának kiszámítása:

Példa

$$\Delta d_{h\delta} = d_0 \cdot \alpha_{pol} \cdot \Delta t = 2,81 \cdot 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot 2 = 0,0006182 \text{ [cm]},$$

$$u(d_{h\delta}) = \frac{\Delta d}{\sqrt{3}} = \frac{0,0006182}{\sqrt{3}} = 0,00035692 \text{ [cm]},$$

$$u(Q_{t_fecs}) = \sqrt{\left(\frac{h \cdot \pi \cdot 2d}{4t}\right)^2 \cdot u^2(d_{h\delta})} = \sqrt{\left(\frac{8,062 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 2,81}{4 \cdot 0,5005}\right)^2 \cdot 0,00035692^2} = 0,02538 \text{ ml/h}.$$

3.1.6 Környezeti hőmérsékletingadozás miatt bekövetkezett víz hőtágulásából származó bizonytalanság

A hőmérsékletváltozás hatására változik a víz térfogata, valamint a sűrűsége is. A mérés elvéből következik, hogy térfogatmérés bizonytalansága független a folyadék sűrűségétől, amennyiben az a mérés során állandó.

A kalibrálási eljárás szerint, a labor hőmérséklete $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ tartományban ingadozhat. Vagyis a mérés kezdetén ezen a tartományon belül kell lennie a labor hőmérsékletének. A mérés ideje alatt ugyan pár tized fokot változhat a környezet hőmérséklete, de a kalibrátor, a szerelések és a víz hőtehetlensége miatt a víz hőmérséklete sokkal kisebb mértékben változhat. Ez a nagyon kismértékű víz-hőmérsékletváltozás elhanyagolhatóan kicsi térfogatáram bizonytalanságot eredményez, ezért nem vesszük figyelembe.

Vagyis a környezeti hőmérsékletingadozás miatt bekövetkezett víz hőtágulásából származó térfogatáram bizonytalansága:

$$u(Q_{t_v\acute{e}z}) = 0\text{ ml/h.}$$

3.1.7 Környezeti páratartalomból eredő bizonytalanság

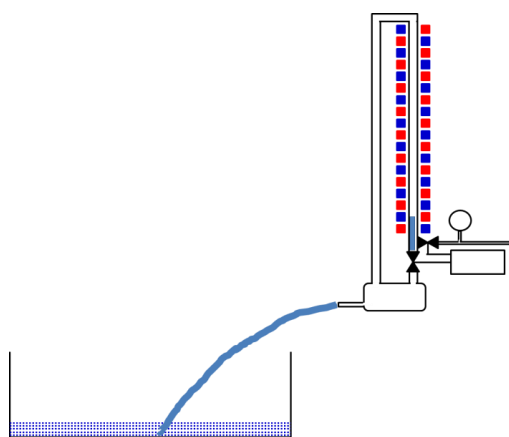
A környezeti relatív páratartalom hatással van a víz párolgási sebességére, és a mérés során párolgással elvesztett folyadékmennyiség hatással lehet a mért térfogatáram értékre.

A megfelelő mérési összeállítással, és kalibrálási eljárás betartásával a mérőbűrettában lévő folyadékoszlop felett mindig 100 %-os páratartalmú levegő alakítható ki, függetlenül a környezeti relatív páratartalomtól, így a párolgásból eredő folyadékvesztés kiküszöbölhető.

Ezért a környezeti páratartalomból eredő térfogatáram bizonytalanságot nullának tekintjük, vagyis:

$$u(Q_{\varphi}) = 0\text{ ml/h.}$$

A 3. ábrán látható, hogy a kalibrátor vízzel való feltöltése után a folyadék kivezető cső vége állandóan vízben van, ezért a mérőbűretta folyadékoszlop feletti levegője egy idő után telítetté válik, és kialakul a 100 %-os páratartalom.



3. ábra: A mérési összeállítás a kifolyásnál

3.1.8 A szerelék rugalmasságából, és a szelep elzáródásakor keletkező nyomásváltozásból eredő bizonytalanság

A folyadék viszkozitása és a súrlódások miatt a víz áramlásakor az egyes csőszakaszok átmérőjével arányosan nyomás keletkezik a fecskendőben és az összekötő csőben. Az összekötő cső és a fecskendő is rugalmas, ezért a nyomás hatására kitágulnak, és megnő a térfogatuk, vagyis ez a plusz térfogatnyi folyadék nem jut

a mérőbűrettába, ezáltal változik a mért térfogatáram. A szerelék rugalmasságának nagyon fontos szerepe van a valóságos infúzióadagolásnál, mert a vénás vérnyomás változása, a kanül véralvadék miatti beszűkülése, vagy párhuzamos infúzióadagolás során fellépő jelenségek során jelentősen változhat a beadni kívánt gyógyszer mennyisége. Viszont kalibrálás során a térfogatáramlás mérés esetében elhanyagolhatóan kicsi a jelentősége.

Állandó áramlást feltételezve, a fecskendőre és a szerelékre ható nyomás állandó, vagyis a rugalmasságból eredő térfogatváltozás nulla.

Az IDA-4 kalibrátor esetében, a mérési metodikából adódóan az áramlás nem egyenletes, mivel a mérőbűrettát bizonyos időközönként ki kell üríteni, és a kiürítés idejére a kalibrátor lezárja a fecskendő felőli áramlás útját. Mérés során a mágnesszelep zárása és nyitása hallható is. A bűretta kiürítési folyamata szubjektív becsléssel meghatározva kb. 1 s ideig tart. Vagyis a pumpa folyamatosan adagol, és az elzárás közbeni egy másodperc alatt adagolt térfogat, a rugalmas szerelékben tárolódik. Ez a többlettérfogat, maximális 100 ml/h adagolás esetén (1 másodperc alatt), kb. 0,028 ml. Az elzárás megszűnése után a nyomás lecsökken az eredeti szintre, a rugalmas szerelék visszanyeri eredeti alakját és a többlettérfogat beáramlik a bűrettába. Időszakos felülvizsgálatok során az okklúziós nyomáson (elzáródási nyomás, max. 150 kPa) megmért többlettérfogat esetén az tapasztalható, hogy a szerelék maximum 4-5 másodpercen belül visszanyeri eredeti alakját. Mivel az IDA-4 kalibrátor áramlásmérésekor egy mérési ciklus legalább 10 másodpercig tart, feltételezhető, hogy ez alatt az idő alatt lezajlanak az elzáródásból adódó átmeneti jelenségek. Ezért az áramlás megzavarása nincs hatással a mért térfogatáramra, vagyis:

$$u(Q_{c_szelep}) = 0\text{ ml/h.}$$

3.1.9 A szerelék rugalmasságából és a bűrettában létrejövő hidrosztatikai nyomásból származó eredő bizonytalanság

Mérés során a mérőbűrettában a folyadékoszlop nyomása nyomóerőt fejt ki a szerelékre, ami így kitágul. A mérőbűretta pontos méretei nem ismertek, de fénykép alapján kb. 9-10 cm-re becslem a mérési tartomány hosszát, ahol az optoérzékelők találhatók. 10 cm-es folyadékoszlopot feltételezve a hidrosztatikai nyomás értéke kb. 1 kPa. A szerelék rugalmasságára vonatkozólag nincsenek pontos adatok. Az ISO 7886-2:1996 [2] szabvány azt határozza meg 50 ml-es fecskendőre, hogy 7 kPa nyomáson maximum 0,4 ml térfogatot tágulhat. A European Society of Intensive Care Medicine (ESICM) [8] *Infusion Pumps* című e-learning anyagában az található, hogy a fecskendő rugalmasságából származó térfogatnövekedés a domináns az összekötő csővel szemben. Ezek alapján megbecsülhető, hogy a bűrettában 10 cm vízoszlop nyomása kb. 0,06 ml térfogatnyi tágulatot okoz a szerelékben.

Egy másik becslést alkalmazva a HLT07 MeDD [9] kiadvány 19. oldalán található egy táblázat, amely szerint egy átlagos fecskendőnek másfél méteres csővel együtt a rugalmassága 1,54 ml/bar, vagyis 0,0154 ml/kPa. Ezek

alapján a 10 cm vízoszlop nyomása kb. 0,02 ml térfogatnyi tágulást okoz a szerelékben.

Figyelembe kell venni azt is, hogy a bűretta kiürítése után a folyadék oszlop nyomása által okozott többlettérfogat a következő mérési ciklusban kiürül, és több mérési ciklus alatt az egyes mérési ciklusokban mért térfogatáramok hibája kiátlagolódik.

A mérési eredményben csak az okozhat hibát, hogy a mérés leállításakor nem lehet tudni a bűrettában lévő folyadékoszlop magasságát.

A hiba becsléséhez, a legrosszabb esetet feltételezem, vagyis amikor a maximális hidrosztatikai nyomás 0,06 ml térfogatnyi tágulást okoz. A szerelék térfogatnövekedése csökkenti a mért térfogatáramot, vagyis a hiba negatív lesz. A térfogat áram hibája:

$$H_{Qc_hidro} = -0,06 \text{ ml/h.}$$

Ezt a hibát a végeredményre vonatkoztatva:

$$H_{Ec_hidro} = \frac{H_{Qc_hidro}}{n},$$

ahol, n a mérési ciklusok száma. 200 mérési ciklus esetén ez a hiba:

$$H_{Ec_hidro} = \frac{-0,06}{200} = -0,0003 \text{ [ml/h].}$$

Azért, hogy a további számításokat jelentősen egyszerűsíteni lehessen, az egyoldalú hibát kiterjesztem a másik oldalra is, amivel túlbecslem a hibát. Vagyis a továbbiakban a hiba:

$$H_{Ec_hidro} = \pm \frac{0,06}{200} = \pm 0,0003 \text{ [ml/h].}$$

Egyenletes eloszlást feltételezve a bizonytalanság:

$$u(Q_{c_hidro}) = \frac{H_{Ec_hidro}}{\sqrt{3}} = \frac{0,0003}{\sqrt{3}} = 0,00017 \text{ [ml/h].}$$

Vagyis a szerelék rugalmasságából, és a bűrettában létrejövő hidrosztatikai nyomásból származó térfogatáram bizonytalanság:

$$u(Q_{c_hidro}) = 0,00017 \text{ ml/h.}$$

3.1.10 A kalibrátor nemvízszintes elhelyezésből származó bizonytalanság

Az IDA-4 kalibrátor megdöntésével a mérőbűrettában lévő víz meniszkusza megváltozik, amely hatással lehet a mért értékre.

A kalibrátort a kalibrálási eljárás szerint, stabil vízszintes felületre kell helyezni. A vízszintestől való kismértékű eltérés (ami szemmel nem érzékelhető), nincs hatással a mérésre, mert a mérés során a térfogatot mérő optoérzékelők a folyadék meniszkuszát mindig ugyanott fogják érzékelni, függetlenül attól, hogy a folyadék felszíne milyen szöget zár be a bűretta falával. A kalibrálási eljárást betartva, a mérés ideje alatt a folyadék meniszkuszának állása nem változik a bűretta falához képest. Ezért a kalibrátor nem vízszintes elhelyezésből származó térfogatáram bizonytalanságát nullának becsültem:

$$u(Q_{ferde}) = 0 \text{ ml/h.}$$

3.1.11 A méréshez használt víz összetételétől, vagyis sűrűség változásából származó bizonytalanság

A méréshez desztillált vagy ioncserélt vizet kell használni. A különböző összetételű, valamint a különböző vezetőképességű vizeknek más és más a térfogatuk és a sűrűségük.

A mérési elv szerint, amennyiben a mérés alatt nem változik meg a víz térfogata, vagyis a sűrűsége, a víz sűrűsége nem befolyásolja a mért térfogatáramot. Vagyis a méréshez használt különböző ioncserélt vagy desztillált vizek minősége nem befolyásolja a térfogatáram bizonytalanságát, vagyis:

$$u(Q_{vizmin}) = 0 \text{ ml/h}$$

3.2 Mérési bizonytalanság meghatározása

Feltételezzük, hogy bizonytalansági összetevők függetlenek és nincs közöttük korreláció.

A B-típusú értékeléssel megkapott standard bizonytalanságok eredője, 1 érzékenységi együtthatókkal, illetve feltételezve, hogy azok egymástól függetlenek, :

$$u_c = \sqrt{(\delta Q_m)^2 + (\delta Q_{kal})^2 + (\delta Q_{Rinfu})^2 + (\delta Q_d)^2 + (\delta Q_{t_fecs})^2 + (\delta Q_{c_hidro})^2};$$

$$u_c = \sqrt{0,32853^2 + 0,60^2 + 0,02887^2 + 0,5768^2 + 0,02538^2 + 0,00017^2} = 0,896 \text{ [ml/h]}$$

A kiterjesztett mérési bizonytalanság:

$$U = k \cdot u_c.$$

Feltételezzük, hogy az u eredő mérési bizonytalanság egyenletes eloszlású, ezért a kiterjesztési tényezőt effektív szabadságfokból határozzuk meg. Az u_c eredő mérési bizonytalanság effektív szabadságfokát a Welch–Satterthwaite-képlettel határozzuk meg. A Welch–Satterthwaite-képlet általános alakja:

$$v_{\text{eff}} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u^4(y_i)}{v_i}}.$$

Mivel B-típusú becslések alapján meghatározott bizonytalanságok esetén a v_i szabadságfok ∞ -nek tekinthető, ezért esetünkben így néz ki a képlet:

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_e^4}{u^4(Q_m)},$$

ahol v_{eff} effektív szabadsági fok, u_e az eredő mérési bizonytalanság, $u(Q_m)$ a kalibrálandó eszköz ismétlőképességéből származó bizonytalanság, illetve v_m a mérési sorozat szabadságfoka. A képletbe behelyettesítve 200 elemű mérés esetén:

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_e^4}{u^4(Q_m)} = \frac{0,896^4}{\frac{0,32853^4}{199}} = 10991.$$

Ehhez az effektív szabadságfokhoz tartozó k kiterjesztési tényező értéke 95 %-os megbízhatósági szinten $k = 2$.

Vagyis a kiterjesztett mérési bizonytalanság:

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot 0,896 = 1,8 \text{ [ml/h]}$$

2. táblázat: Mérési bizonytalanság jegyzék

Jel.	Bemenő mennyiség	Bemenő mennyiség Becslés [ml/h]	Tip	Standard bizonytalanság [ml/h]	Eloszlás	Érz. együttható [ml/h]	Eredő bizonytalanság [ml/h]
Q_{infu}	Infúzió adagolón beállított térfogatáram	99,9	-	-	-	-	-
Q_m	Mért érték	99,80	A	0,32853	Norm.	1	0,32853
δQ_{kal}	Kalibrátor kal. bizonyítványából származó biz. összetevő	0	B	0,6	Norm.	1	0,6
δQ_{Rinfu}	Infúzióadagoló kijelzés felbontásából adódó bizonytalansági összetevő	0	B	0,02887	Egyen.	1	0,02887
δQ_{at}	Gyártáskor a fecskendő névleges átmérőjétől való eltéréséből származó bizonytalansági összetevő	0	B	0,5768	Egyen.	1	0,5768
δQ_{fec}	Környezeti hőmérsékletingadozás miatt bekövetkezett fecskendő átmérő változásból származó bizonytalansági összetevő	0	B	0,02538	Egyen.	1	0,02538
$\delta Q_{\text{sz, hido}}$	A szerelék rugalmasságából, és a bürettpontban létrejövő hidrosztatikai nyomásból származó eredő bizonytalansági összetevő	0	B	0,00017	Egyen.	1	0,00017
Ue	Eredő standard mérési bizonytalanság						0,896
U	Kiterjesztett mérési bizonytalanság						1,79

4 KONKLÚZIÓ

A tanulmányban bemutatott bizonytalanságok meghatározásánál két fajta elvi megközelítés közül is lehetett volna választani. Az egyik, amikor a környezeti feltételeket, és a méréshez felhasznált szerelvényeket, mint például fecskendőt, pontosan megmérjük, és ebből számoljuk a bizonytalanságokat. Ez több gyakorlati problémát is felvet. Például a fecskendők belső átmérőjét nem lehet egyszerűen megmérni, mert a hengerpalást tetején van egy perem, amely szűkületet képez, hogy kihúzáskor a dugattyú megakadjon a végén. A pontos méréshez drága és bonyolult mérőműszerek lennének szükségesek. Mivel a műanyag fecskendőt csak egyszeri használatra tervezték, és a méretei mechanikai kopásokból és egyéb torzulásokból eredően gyorsan változhatnak, ezért a mechanikai méretek ellenőrzését gyakran kéne elvégezni. Ha pedig kalibrálásunként új fecskendőt használnánk, akkor minden kalibrálás előtt le kéne mérni a méreteket.

Ezért én a kórházi laborok igényeihez igazodva, inkább a másik megközelítést választottam. Vagyis a fecskendő paramétereit a szabványi határértékeken belülnek feltételeztem, és a környezeti hőmérsékletre is egy tartományt határoztam meg, amelyen belül kell tartani a labor hőmérsékletét, így biztosítva, hogy a felhasznált anyagok és szerelvények hőmérséklete is definiált legyen. A mérési bizonytalanságokat pedig ezen tartományokra határoztam meg.

A mérések során egy metodikai hibára is fény derült, amely a mérőműszer mérési elvéből származik. Erről a hibáról a 3.1.8. pontban, „A szerelék rugalmasságából, és a szelep elzáródásakor keletkező nyomásváltozásból eredő bizonytalanság” számolásánál említék. A hibát az a jelenség okozza, hogy az áramlás nem egyenletes, mert a mérőbüretttát bizonyos időközönként ki kell üríteni, és a kiürítés idejére a kalibrátor lezárja a fecskendő felőli áramlás útját. Mivel a régebbi, fecskendőpumpás infúzióadagolók maximum 100 ml/h-val tudtak adagolni, ez nem okoz problémát, mert a hiba kicsi. A B-típusú becslés során az ebből adódó bizonytalanságot elhanyagolhatóan kicsinek becsültem. De ez a teszter alkalmas nagyobb térfogatáramok mérésére is, a

használati utasítása alapján, akár 1000 ml/h térfogatáramra is [10]. A mai fecskendőpumpás infúzióadagolók, illetve a volumetrikus pumpák több száz ml/h-s térfogatáram adagolására is képesek. Ekkora térfogatáramok mellett a metodikai hiba jelentősen megnőhet, ami már nem hanyagolható el.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretném kifejezni hálámat Zakár Istvánnak, a Medihead Kft. műszaki vezetőjének, hogy szabad hozzáférést biztosított a cég laborjában a különböző mérőműszerekhez és infúzióadagolókhöz. Továbbá köszönöm a hosszadalmas szakmai beszélgetéseket, valamint építő jellegű kritikáit, amelyek segítettek munkámat.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] VIM3 Nemzetközi Metrológiai Értelmező Szótár – Alapvető fogalmak, kapcsolódó szakkifejezések (2018)
- [2] MSZ EN ISO 7886-2:2000 Steril, egyszer használatos injekciós fecskendők. 2. rész: Energiával működtetett fecskendőpumpával használható fecskendők
- [3] Syringe Drivers: incorrect selection of syringe type from the syringe menu may result in significant errors in drug delivery - Anaesth Intensive Care 2014; 42: 467–472
- [4] Metrology in Health: Good Practices Guide, Part II, Chapter III, 20. old.
- [5] <https://www.bbraun.com/en/products/b/original-perfusorsyringe50ml.html>
- [6] <https://www.sigmaaldrich.com/labware/labware-products.html?TablePage=17216053>
- [7] Molgroup, Polipropilén Termék Katalógus: https://mol.hu/images/mol_hu/pdf/vallalati_ugyfelek/polimer-termekek/termekek/pp-polipropilenek/termekcatalogus_pp_2018.pdf
- [8] <https://academy.esicm.org/course/view.php?id=210>
- [9] HLT07 MeDD: Metrology for drug delivery (<https://drugmetrology.com/>)
- [10] Fluke Biomedical, IDA-4 Plus Infusion Pump Analyser, Operators Manual

A metrológia szerepe az AI által támogatott digitális biomarker-kutatásban és -fejlesztésben

The role of metrology in AI-enabled digital biomarker research and development

Pálhalmi János

DataSenseLabs Kft. <https://datasenselabs.net/>, Budapest
janos.palhalmi@datasenselabs.net

Összefoglalás — A tanulmány a metrológia szerepéről elemzi a digitális biomarker kutatás-fejlesztésében, különösen a mesterséges intelligencia és nagy nyelvi modellek integrációja kapcsán. Rámutat arra, hogy a digitális biomarkerek technológiai fejlődése ellenére hiányoznak az egységes szabványok és értékelési protokollok, ami hátráltatja a klinikai alkalmazhatóságot. A metrológiai szemlélet alkalmazása segítheti a validálást, a nyomkövethetőséget és a szabványosítást, így támogatva a digitális biomarkerek ipari hasznosítását és egészségügyi elfogadottságát.

Kulcsszavak: digitális biomarkerek, mesterséges intelligencia, validálás, adatminőség, egészségügyi technológia

Abstract — The article explores the role of metrology in the research and development of digital biomarkers, particularly in the context of artificial intelligence and large language model integration. It highlights the lack of standardized evaluation frameworks as a major barrier to the clinical adoption of digital biomarkers. By introducing a metrology-driven approach, the study proposes systematic methods to ensure traceability, validation, and standardization, thereby fostering trust, interoperability, and industrial scalability of AI-enabled digital biomarker solutions in healthcare.

Keywords: digital biomarkers, artificial intelligence, validation, data quality, healthcare technology

1 BEVEZETÉS

A digitális biomarkerek (DBM) kutatás-fejlesztése – objektíven mért fiziológiai, viselkedési, biofizikai, általánosan biológiai adatok, amelyeket digitális eszközökkel és műszerekkel gyűjtenek és elemeznek – izgalmas határterületté vált az egészségügyi és bioinformatikai innováció terén. A tudományos, klinikai és kereskedelmi *stakeholder*-ek növekvő érdeklődése ellenére a terület fejlődését továbbra is hátráltatják a szétagolt szabványok, az inkonzisztens terminológiák és az egységes értékelési protokollok hiánya. Ez éles ellentétben áll a jól strukturált szabályozási és módszertani keretrendszerrel, melyet a hagyományos klinikai vizsgálatok területén hoztak létre, (szabályozó testületek pl. FDA és az EMA [1, 2]) ahol a molekuláris biomarkerek (pl. vérből mérhető markerek) egyértelműen

definiáltak, mind fogalmkörük, mind az értékelési és érvényesítési módszertanuk tekintetében.

A „digitális biomarker” kifejezésnek jelenleg még nincs koherens és széles körben elfogadott meghatározása. Míg bizonyos esetekben a DBM-eket a hagyományos biomarkerek digitális helyettesítőinek tekintik, mások a szenzorokból származó bizonyos mintázatokra jellemző azonosításra vagy kategorizálásra alkalmas értékeket is ide sorolják, standardizált értékelési vagy érvényesítési definíciók nélkül [3]. Ez a zűrzavar következtelenségeket eredményezhet a tudományos irodalomban, új technológiák bevezetésben és az értékesítési stratégiákban, ami akadályokat gördíthet a reprodukálhatóság, az interoperabilitás elé.

Ebben az innovációs értelemben pozitívan dinamikus, de egyben kaotikus környezetben a metrológia – a mérésstudomány – rendszerszintű megoldást kínál a K+F-folyamatok szabványosítására és harmonizálására a DBM fejlesztésében. A metrológiai szemlélet az alapkutatás és az ipari fejlesztés közötti hídként funkcionálva optimalizálhatja a költséghatékonyságot, a nyomkövethetőséget és a műszaki megvalósíthatóságot a K+F-ciklus mind a négy fázisával való együttműködésben [4]. A metrológiai módszertani megközelítések és protokollok szerepe szabványügyi szinten megalapozott a hagyományos egészségügyi területeken, például a laboratóriumi diagnosztikában és a képalkotásban, de a még csak kialakulóban lévő DBM-területhez való adaptációja számos új lehetőséget rejt magában.

A DBM-innováció során gyakran figyelmen kívül hagyott kulcsfontosságú elem a klinikai vizsgálatok előtti vagy a technológia-specifikus fejlesztéssel kapcsolatos megvalósíthatósági értékelés. A metrológiai szemléletű kísérlettervezéssel támogatott megvalósíthatósági értékeléssel megalapozott pre-klinikai K+F-keretrendszer nem csak a zavaró-befolyásoló tényezők azonosítására és a mérési bizonytalanságok számszerűsítésére alkalmas, hanem támogatja az erőforrás-optimalizálást és megalapozza mind az alapkutatási, mind az ipari fejlesztői és a hasznosítási oldal közötti bizalmat [5, 6, 7].

A mesterséges intelligencia (AI) és a nagy nyelvi modellek (LLM) integrálása a DBM K+F-be még szigorúbb metrológiai felügyeletet tesz szükségessé. Noha ezek a technológiák óriási lehetőségeket hordoznak a K+F szabványosítási megosztottságának áthidalására a protokollgenerálás és a valós idejű adatfeldolgozás, dokumentálás automatizálásával [8], kimeneteiket műszakilag validálni, kalibrálni és metrológiai protokollokon keresztül szabványosítani kell, hogy biztosítható legyen az interdiszciplináris szakértői bizalom, az átláthatóság és a reprodukálhatóság az egészségügyi alkalmazások területén [9].

Ebben a tudományos véleményjellegű rövid áttekintésben a teljesség igénye nélkül kerülnek bemutatásra olyan sarkpontok, melyek rávilágítanak a klasszikus metrológiai szemlélet szükségességére egy teljesen újszerű, interdiszciplináris K+F-környezetben. Bemutatásra kerül továbbá, hogy a klasszikus metrológiai megközelítés miként katalizálhatja az AI-alapú DBM-ek kísérleti prototípusokból klinikailag is hasznosítható végfejlesztéssé átalakulását.

2 MÓDSZEREK

A vonatkozó tudományos irodalomelemzés, a szabványértékelés, az ipari szabványok és az üzleti forrásokból származó technológiai áttekintések eredményeinek rövid, véleményjellegű kivonatai kerültek összesítésre. A PubMed, a Scopus és a Google Scholar adatbázisokban történt lekérdezésekhez használt kulcsszavak például „Digitális biomarkerek”, „Metrológia”, „Értékelés”, „Validálás”, „AI az egészségügyben”, „AI szabványok” és „Klinikai vizsgálati szabványok”. A jelenlegi szabályozási ökoszisztéma értékeléséhez az FDA, az EMA, az IMDRF, az ITU, az ISO és az IEEE szabványozási dokumentumai és tanulmányai kerültek felhasználásra.

Mint véleményjellegű rövid áttekintés, a kézirat nem új kísérleti vagy elemzési adatokat mutat be, hanem a jelenlegi ismereteket és szakértői meglátásokat szintetizálja. Az interpretációk és a javasolt keretrendszerek a szerző kritikai elemzését tükrözik a meglévő irodalomról, szabványokról és technológiai gyakorlatokról, céljuk pedig az interdiszciplináris párbeszéd ösztönzése és a jövőbeli kutatási irányok felvázolása.

2.1 Adatforrások

A vélemény formálás során különös figyelmet kaptak a DBM-fejlesztői, -tesztelési és -validációs adatbázisok:

- Open mHealth, szenzoradat-standardizációhoz [10]
- PhysioNet, validált fiziológiai jeladatbázisokhoz [11]
- Digital Biomarker Discovery Project (DBDP) [12]

2.2 Sztenderdek és protokollok

- IEEE 11073 and P2413 (IoT sztenderdek)

- ISO/IEC 17025 (tesztelő laboratóriumok kompetenciája)
- ISO 14155 (orvostechikai eszközök klinikai vizsgálata)
- Az EMA minősítési dokumentumok, segédanyagok [18]

3 EREDMÉNYEK ÉS TÁRGYALÁS

3.1 Fragmentált szabványok

A DBM széles körű elterjedésének elsődleges akadálya a protokolltervezés, az adatfeldolgozás és a validációs módszerek harmonizációjának hiánya. Ellentétben a molekuláris biomarkerekkel, melyek a nemzetközileg elfogadott bioanalitikai módszerek irányelvei alapján kerülnek fejlesztésre, tesztelésre, validálásra [13], a DBM-ek gyakran technológiai szempontból esetspecifikus, szellemi-tulajdonjogi szempontból pedig egyedi környezetben kerülnek fejlesztésre. A harmonizáció elősegítésére az EURAMET olyan egészségügyi metrológiai keretrendszerek bevezetését kezdeményezi - a vonatkozó mérésbizonytalanság-elemzés, a referenciaprotokollok nyomonkövethetősége, valamint az eszközök és mérési, számítási módszerek közötti összehasonlíthatóság érdekében -, mely keretrendszerbe foglalhatja mind az AI-támogatott, mind a klasszikus számítástudományi alapokon nyugvó DBM K+F-folyamatokat [14].

3.2 Metrológiai értékelés által történő preklinikai validálás

A DBM-fejlesztés jellemzően az adatgyűjtésre és az AI-támogatott vagy klasszikus modellezésre összpontosít, gyakran figyelmen kívül hagyva a bemeneti adatfolyamok szigorú műszaki, informatikai és minőségkontroll szintű validációját. A mérési módszerek és számítási algoritmusok értékelése jellemzően statisztikai teljesítménymutatókra fókuszáló megközelítéssel történik, nem pedig szenzor-specifikus precíziós kiértékelésekkel, kalibrációs rutinokkal vagy bizonytalanságbecslési keretrendszerekkel [15].

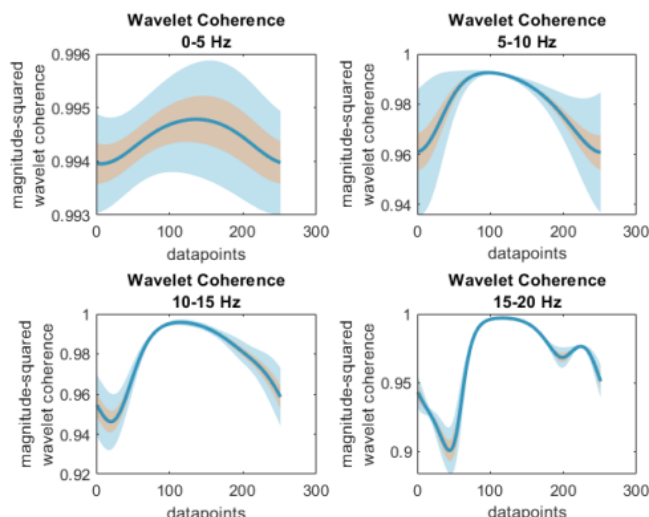
A metrológia szerepe itt a legkritikusabb: segít azonosítani a mérési vagy számítási folyamatból adódó torzításokat, a mintavételi problémákat, a nemcsak műszaki, hanem akár biológiai háttérzajból származó jeltorzulásokat és az algoritmikus inkonzisztenciákat – mindezt még a klinikai tesztelési, validációs munkafolyamatok előtt. A preklinikai metrológiai értékelésnek a DBM K+F-munkafolyamatok kötelező szakaszává kellene válnia ahhoz, hogy az alapkutatói és ipari hasznosítási folyamat megfelelően optimalizálható legyen.

3.3 Az adatbázisépítés és adatminőség problémája az AI-támogatott DBM K+F területén

A mesterséges intelligencia által támogatott algoritmusok több rétege képes feldolgozni akár strukturálatlan, szenzorokból származó nyers adatokat, akár előfeldolgozott, származtatott adatokat, melyekből egészségügyi indikátorok kerülnek definiálásra. Egy ilyen komplex munkafolyamatban keletkező eredmény megbízhatóságának interdiszciplináris elfogadottsága csak akkor alakulhat ki, ha a fejlesztés, tesztelés, értékelés, érvényesítés iteratív folyamatának támogatására specifikus adatbázisokat hozunk létre. Az adatbázisstervezés és adatbázis generáló keretrendszer kialakítására a metrológia robusztus eszközöket kínál, melyek implementálhatóak mind a szimulációs és laboratóriumi mérési folyamatok szintjén [19].

Akár szimulációval létrehozott, akár szakértői vélemény alapján annotált mérési adatbázisról van szó, a „kevesebb az több” elv alkalmazása lehetővé teszi, hogy célorientált, felhasználási terület szerint tervezett és adatminőség-kontrollmetrikával asszociált adatokkal tanított algoritmusok teljesítménymutatói felülmúlják az akár nagyságrendekkel nagyobb, de minőségben alacsonyabb értéket képviselő adatbázisokkal tanított algoritmusok képességeit. Egy lehetséges adat- és jelminőségkontroll módszer a bioszignál metrológiai eljárás, amely a fiziológiai, biológiai jelek heterogén környezetben történő mérésének, osztályozásának és integrálásának kihívásaival foglalkozik [6], és biztosítja a digitális biomarker-számításhoz használt adatok alapvető integritását. A megfelelő adatbázisépítési stratégia és az azt támogató adat-jelminőség-kontroll eljárás DBM-munkafolyamatokba való beépítése megerősíti a nyomomonkövetőségi láncot, így növeli az AI-támogatott algoritmusok által létrehozott egészségügyi indikátorok, markerek elfogadottságát, megbízhatóságát.

A viselhető elektronikai és „okos” egészségügyi szenzor- és algoritmusfejlesztések területén gyakran használt periodikus kardiovaszkuláris biojelek számos esetben nem kerülnek adat- és jelminőségi vizsgálat alá. Az így keletkező mérési bizonytalansági komponens hatása nehezen számszerűsíthető és csökkenti a bizalmat mind a társadalom, mind a professzionális felhasználók (orvos, egészségügyi szakemberek) felé. Egyik lehetséges megoldás az összehasonlító bioszignál metrológiai eljárással képzett, frekvencia specifikus Wavelet koherenciaanalízis [6], mellyel lehetőség van az adott kardio-vaszkuláris biojel (EKG, PPG, stb.) esetleges minőségi problémáiból származó mérési bizonytalanság hullám- (frekvencia-)specifikus számszerűsítésére, mely támpontot jelent az akár AI-támogatott, akár klasszikus jelfeldolgozási és jelkomponens-detekciós algoritmusok megbízhatósági intervallumainak definiálása terén (1. ábra).



1. ábra: Wavelet koherenciaanalízis [6]

A nagy nyelvi modelleket egyre gyakrabban használják az adatharmonizáció, a protokolltervezés és az irodalomszintézis segítésére a DBM-kutatásban. Bár eredményesek, kimeneteikben hajlamosak a hallucinációkra, a kontextuális eltérések generálására és a valódi összefüggések feltárásának hiányára. A metrológiai validációs szemlélettel alkotott keretrendszerek és adatbázisok alkalmazása segítheti célorientált alkalmazásukat a vonatkozó egészségügyi munkafolyamatokban [16].

3.4 Iparosítás: a felfedező DBM-ektől a szabályozott eszközökig

A metrológiai módszerek, protokollok DBM K+F-munkafolyamatokba való integrálása lehetővé teszi a K+F életciklus-minőségellenőrzését, nyomomonkövetőséget biztosítva az érzékelő kalibrálásától az algoritmusos kimenetvalidáláson át a szabályozásnak való megfelelésig. A metrológia által vezérelt gondolkodásmód egyesíti az akadémiai innovációt az ipari robusztussággal és a szabványosítási törekvésekkel, mely serkentheti a harmonizációt az EU AI-direktívái és az orvosi eszközökre vonatkozó szoftverfejlesztési keretrendszerekkel [17].

4 KONKLÚZIÓ

A DBM K+F fordulóponthoz érkezett: az AI-támogatott technológiák forradalmi lehetőségeket kínálnak, de egyben kockázatot is jelenthetnek. A metrológia-vezérelt eljárásokat a DBM K+F központi pilléreként szükséges újrapozicionálni, mely nemcsak a műszaki-informatikai megvalósíthatóságot támogatja, hanem az érdekelt felek bizalmát is megerősíti, valamint felgyorsítja az innováció befogadását és támogatja a fenntartható értékteremtést a digitális egészségügyben.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Coravos, A. et al. (2019). Digital biomarkers for health monitoring. NPJ Digital Medicine.. <https://www.nature.com/articles/s41746-019-0090-4>
- [2] FDA (2018). Bioanalytical Method Validation Guidance. <https://www.fda.gov/media/70858/download>
- [3] Powell, D. (2024). Walk, talk, think, see and feel: harnessing the power of digital biomarkers in healthcare. NPJ Digital Medicine. <https://www.nature.com/articles/s41746-024-01023-w>
- [4] Wilkinson, M. D. et al. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Scientific Data. <https://www.nature.com/articles/sdata201618>
- [5] DiMe Society (2023). The Playbook: Digital Clinical Measures. <https://playbook.dimesociety.org/>
- [6] Pálhalmi, J. et al. (2019). A Statistical Metrology Approach to Compare the Quality of Optical Pulse Wave Signals. Computing in Cardiology , Vol 46. DOI: 10.22489/CinC.2019.165 <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/optical-integration-without-compromises.pdf>
- [7] Tretter, M. et al. (2025). AI-produced certainties in health care: current and future challenges. AI and Ethics. Springer Nature. <https://link.springer.com/article/10.1007/s43681-023-00374-6>
- [8] Bommasani, R. et al. (2022). On the Opportunities and Risks of Foundation Models. arXiv <https://arxiv.org/pdf/2108.07258>
- [9] Chen, S.-Y. et al. (2024). Perceptions of ChatGPT in healthcare: usefulness, trust, and risk. Frontiers in Public Health. <https://www.frontiersin.org/journals/public-health/articles/10.3389/fpubh.2024.1457131/full>
- [10] Open mHealth. <https://www.openmhealth.org/>
- [11] PhysioNet. <https://physionet.org/>
- [12] <https://www.dbdp.org/>
- [13] FDA Guidance on Clinical Trials. <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents>
- [14] EURAMET EMN for Health. <https://www.euramet.org/metrology-for-societys-challenges/metrology-for-health>
- [15] Mathews, S. C. et al. (2019). Digital health: a path to validation. NPJ Digital Medicine. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6550273/>
- [16] Large Language Models for Medical Applications. Frontiers in Medicine. 2025. <https://www.frontiersin.org/research-topics/64598/large-language-models-for-medical-applications>
- [17] IMDRF SaMD Definitions. <https://www.imdrf.org/documents/software-medical-device-samd-key-definitions>
- [18] European Medicines Agency: <https://www.ema.europa.eu/en/human-regulatory-overview/research-development/scientific-advice-protocol-assistance/opinions-letters-support-qualification-novel-methodologies-medicine-development>
- [19] Pálhalmi, J. et al. (2024). AI-Powered Microscopy Platform for Airborne Biothreat Detection. Springer Nature. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-62083-6_10

Az Óbudai Egyetem ötven éve az érdességmérésben

Fifty years of Óbuda University in surface roughness measurement

Czifra Árpád

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország
czifra.arpad@bgk.uni-obuda.hu

Összefoglalás — A felületi érdességmérés története mindössze néhány évtizedes múltra tekint vissza. Ennek az időszaknak az elmúlt 50 évében az Óbudai Egyetem jogelődje, a mai Bánki Donát Gépész és Biztonsági Mérnöki Kar („Bánki”) aktív szerepet vállalt. Az itt folyó mérések, kutatások megalapozták annak a szakmai műhelynek a létrejöttét, ami számos ipari szakembert, PhD fokozattal rendelkező kutatót, valamint hazai és nemzetközi szinten is elismert szakmai eredményt produkált. Jelen munka áttekinti és összefoglalja azokat a mérőföldköveket, amik a nemzetközi életben és a Bánkin meghatározó mérőföldkövei voltak ezen szakterület fejlődésének.

Kulcsszavak: felületi érdesség, hullámosság, mikrogemtria, mikrotopográfia, felületi sajátosságok

Abstract — The history of surface roughness measurement dates back only a few decades. In the past 50 years of this period, the legal predecessor of Óbuda University, the current Bánki Donát Faculty of Mechanical and Safety Engineering (“Bánki”), has played an active role. The measurements and research conducted here laid the foundation for the establishment of a professional workshop that has produced numerous industrial specialists, researchers with PhD degrees, and professional results recognized both domestically and internationally. This work reviews and summarizes the key milestones in the development of this field both internationally and at Bánki.

Keywords: surface roughness, waviness, microtopography, microgeometry, surface features

1 BEVEZETÉS

A felületi érdességmérés a metrológia területén belül a geometriai méretek meghatározásának témaköréhez tartozik. Az ISO 14638 [1] szabvány az érdességmérést a GPS (Geometrical Product Specification – Geometriai Termékspecifikációk) modell szerves részeként kezeli.

A felületek érdességének, hullámosságának vizsgálata szorosan kapcsolódik a gyártási és működési folyamatokhoz. A felületi érdesség egyben jellemzője a gyártási folyamat felületalakító-képességének, másrészt meghatározója a felületen lejátszódó tribológiai jelenségeknek. Ezért a felületi érdességmérés fejlődése is szorosan összefügg ezeknek a szakterületeknek a fejlődésével, és szorosan kapcsolódik azokhoz az igényekhez, amit a gyártástechnológia és a tribológia

indukál. Az 1. ábra áttekinti azokat a működési területeket – fontossági sorrendbe is állítva őket –, ahol a felületminőség valamilyen formában meghatározza a lezajló folyamatokat.



1. ábra: A felületminőség szerepe a különböző műszaki folyamatokban

Éppen a fenti szakterületek rendkívül dinamikus és folyamatos fejlődése igényli és eredményezi azt, hogy a felületi érdességmérésről is mint dinamikusan fejlődő szakterületről beszéljünk, ahol még a vonatkozó szabványok tekintetében is megfigyelhető, hogy a korábban használt, jól bevált paraméterek mellett egészen újszerű módszerek jelennek meg.

A mérőműszerek fejlődésével pedig a klasszikus mikrométeres nagyságrendű egyenetlenségek vizsgálata mellett megjelennek a szubmikro és nanométer nagyságrendű mérések.

Jelen munka röviden bemutatja a szakterület nemzetközi fejlődésének főbb állomásait, azokat a mérőföldköveket, amik meghatározták és jellemezték a mérés technika ezen területének történetét, valamint felméri azokat a jelenlegi irányokat, amik a szakterület jövőbeni fejlődését jellemezhetik.

A nemzetközi fejlődés mellett külön hangsúlyt szeretnénk szentelni annak a hazai fejlődésnek, aminek egyik vezető kutatóhelye a mai Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kara, avagy a „Bánki”.

2 AZ ÉRDESSÉGMÉRÉS NEMZETKÖZI FEJLŐDÉSE

A metszetpintós érdességmérés elvét Abbot és Firestone dolgozta ki a Michigani Egyetemen [3]. A kidolgozott elvet követve 1939-ben a Taylor Hobson cég bemutatta a berendezés kereskedelmi változatát Talysurf I néven az angliai Leicesterben. A cég optikai lencsék gyártásával foglalkozott és ezek felületi minőségének ellenőrzésére készítette a berendezést, de az hamar olyan

érdeklődésre tett szert, hogy az 1940-es években a vállalat már ennek a mérőműszernek a forgalmazásával is foglalkozott (ld. 2. ábra). A vállalat napjainkban is vezető szerepet tölt be az érdességmérő berendezések területén.



2. ábra: Talysurf 2-es modell az 1940-es évekből [4]

Ezután igen gyorsan megjelentek Németországban és Angliában az első analóg berendezések, melyek képesek voltak átlagos érdességi értéket számolni, valamint 2CR szűrés segítségével szétválasztani az érdességet és a hullámosságot [5].

1954-ben megkezdte működését az ISO (Nemzetközi Szabványügyi Szervezet) TC 57 bizottsága „Metrology and properties of surfaces” néven. Ez a bizottság 1996-ban beolvadt az ISO/TC 213-ba, mely a GPS szabványok gondozását, felülvizsgálatát, megújítását végzi azóta is. A bizottság által megalkotott első érdességmérési szabvány 1966-ban jelent meg, ISO/R 468-1966 „Felületi érdesség” címmel. A szabvány bevezetőjében hazánkat is megtaláljuk a jóváhagyó testületi tagok között (3. ábra).

This first Draft ISO Recommendation (No. 221) was circulated to all the ISO Member Bodies for enquiry in September 1958. As the results of this consultation were not considered satisfactory, the Technical Committee presented a second Draft ISO Recommendation, which was circulated to all the Member Bodies in April 1962 and which was approved by the following Member Bodies:

Austria	Greece	Poland
Belgium	Hungary	Republic of South Africa
Brazil	India	Romania
Bulgaria	Israel	Switzerland
Burma	Italy	U.S.A.
Czechoslovakia	Mexico	U.S.S.R.
Denmark	New Zealand	Yugoslavia

3. ábra: Részlet az ISO/R 468-1966 szabványból [6]

Az érdességmérés következő mérföldköve Greenwood és Williamson nevéhez fűződik. Munkásságuk az érdes felületek érintkezési viszonyainak feltárására fókuszált. Ismertté és széles körben használttá vált modelljüket [7] 1966-ban publikálták. Ezzel egy időben fejlesztették ki „mikro-kartográf” névre elkeresztelt berendezésüket, ami képes volt 3D-s mikrotopográfia rögzítésére egymás mellett felvett érdességi profilokból. Bár ez a technológia már a '60-as években megjelent, nagy erőforrás igénye

miatt valódi fejlődése csak a számítástechnika rohamos fejlődésével, az 1980-as évektől kezdődött meg.

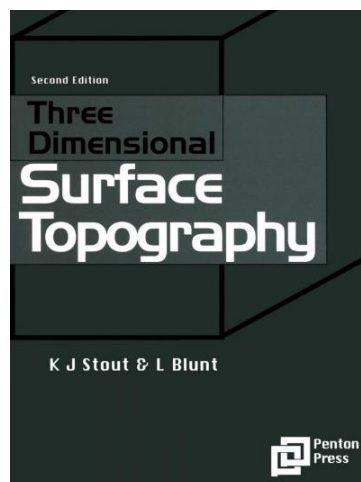
A nemzetközi szakmai közösségben felmerült az igény arra, hogy tapasztalataikat, szakudásukat megosszák, megismertessék egymással. A felületi érdességméréssel foglalkozó szakemberek első önálló konferenciája Oxfordban: *Properties and Metrology of Engineering Surfaces* címen 1968-ban került megrendezésre. A második alkalomra egészen 1978-ig kellett várni, onnantól kezdve 3 évente szerveződik ez a konferenciasorozat, melynek a világ számos országa, többek között Franciaország, Japán, Lengyelország, Svédország, USA, Németország vagy éppen Tajvan vagy Marokkó biztosított már helyszínt. A témakörök az érdességmérés műszerteknikája, a mért értékek kiértékelés-technikája és a felületi érdességmérés alkalmazástechnikája köré szerveződnek.

1. táblázat: A mérés-, kiértékelés-, és alkalmazástechnika aránya a *The Properties and Metrology of Engineering Surfaces* konferenciákon [8, 9]

	1988	2004
Méréstechnika	25 %	20 %
Kiértékelés-technika	42 %	37 %
Alkalmazástechnika	33 %	43 %

Az 1. táblázat az 1988-ban és 2004-ben megrendezett konferenciapublikációkban mutatja a három terület arányát. Az adatok mutatják, hogy miként tolódott el a hangsúly műszer- és kiértékelés-technikáról az alkalmazástechnika irányába.

A XX. század végét a 3D-s, topográfiai technika fejlesztése dominálta. 1994-ben megjelent az EUR 15178 EN európai ajánlás a felületek 3D-s kiértékelésre vonatkozóan. Ez felgyorsította az egyébként is dinamikus fejlődő szakterület kutatásait. 1998-ban beindult a SURFSTAND nevű európai program, mely az európai egyetemek, kutatóhelyek együttműködését, a felületi érdességgel foglalkozó kutatások összehangolását célozta. Ennek eredményeit foglalta össze az ún. „zöld könyv” [10], ami megalapozta a 2008-ban megjelent első 3D-s érdességméréssel és kiértékeléssel foglalkozó nemzetközi szabvány, az ISO 25178 [11] megjelenését.



4. ábra: A „zöld könyv” borítólapja [10]

A szakmai közösség *Surface Topography: Metrology and Properties* címen 2013-ban indított folyóiratot, ami

kizárólag a felületi érdességmérés területéhez szorosan kapcsoló publikációkat fogad. A szűkített szakterületi meghatározással és az igen magas, 2500 EUR fölötti publikációs költséggel működő folyóirat népszerűségét jelzi, hogy mindezek ellenére az elmúlt 2 év impakt faktora 2.0, és a folyóirat összes hivatkozási száma 1770.

Összefoglalva elmondhatjuk, hogy a felületi érdességmérés 2D-s, érdességi profil alapú mikrogeometriai vizsgálata az 1930-as évekkel indult, fejlődése az 1950-es, '60-as években vált intenzívvé, míg a 3D-s, mikrotopográfiai vizsgálatok az 1960-as években kezdődtek, de a szakterület dinamikus fejlődése csak az 1990-es évekre tehető.

3 AZ ÉRDESSÉGMÉRÉS FEJLŐDÉSE A BÁNKIN

Az érdességmérés nemzetközi fejlődésének intenzitása az 1970-es években érte el intézményünket. Az érdességmérési vizsgálatok kezdetét az 1975-ben beszerzett, szovjet gyártmányú KALIBR-211 típusú analóg érdességmérő jelentette (ld. 5. ábra).



5. ábra: A KALIBR 211 érdességmérő a Bánkin

A berendezést Palásti Kovács Béla és csapata forgácsolt felületek érdességének vizsgálatára használta. Első publikációjuk 1978-ban jelent meg magyar nyelven [12].

A kutatások elsősorban forgácsolt felületek minősítésére, a forgácsolási folyamat és a felületi érdesség összefüggéseinek feltárására vonatkoztak. A „bánkis csapat”, felismerve a kiértékelés-technika korlátait, számos, a szűrőtechnikával és a felületek jellemzésével összefüggő kutatást is megkezdett ebben az időben.

A műszerezettség bővítése, fejlesztése 1982-ben indult meg, amikor karunk kapcsolatba került a göttingeni (Németország) székhelyű Mahr céggel. A cég azóta is a német érdességmérési technika vezető képviselője. A szoros partnerkapcsolat a cég és egyetemünk között mind a mai napig stabilitást nyújt a kutatási területnek. Az 1982-es kapcsolatfelvétel első realizálódása a Mahr S6P érdességmérő berendezés beszerzése volt (ld. 6. ábra). Ez még analóg módon, ugyanakkor széles tapintóválasztékkal és a kor ipari igényeit minden szempontból kielégítő kiértékelő rendszerrel rendelkezett.



6. ábra: A Mahr S6P berendezés vezérlőegysége a Bánkin

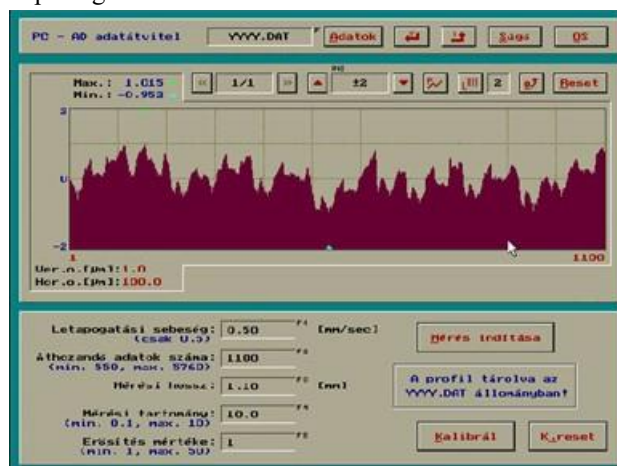
Az intenzív kutatások első nemzetközi megjelenésére a rendszerváltás utáni időszakban került sor. Horváth Sándor és Palásti Kovács Béla mutatta be a bánkis műhely kutatási eredményeit német nyelven [13].

Az 1990-es éveket dinamikus fejlődés jellemezte. A forgácsoláskutatásban szükséges mérések intenzitását segítette az 1996-ban beszerzett Mahr Perthometer C3A/C40 kisberendezés (ld. 7. ábra). A műszer lehetővé tette a hatékony és gyors érdességmérést közvetlenül a megmunkálás helyén, a gépműhelyben.



7. ábra: A Mahr Perthometer C3A/C40 berendezés

A kiértékelés-technika fejlesztése terén megindult erőfeszítések eredménye is ebben az időszakban nyert gyakorlati formát. Az 1998-ban elkészült 2D-s profilok kiértékelését szolgáló szoftver a maga korában kiemelkedő képességekkel rendelkezett.



8. ábra: Bánkis fejlesztésű kiértékelő rendszer

A digitális kiértékelés-technika eszközeit használva számos szűrési lehetőséggel, széleskörű paraméterválasztékkal és olyan extra funkciókkal rendelkezett, mint például az autokorrelációs kiértékelés. A rendszer képességeit jól illusztrálja, hogy az

autokorrelációs függvény és annak jellemző paraméterei csak 23 évvel később, 2021-ben kerültek be a ma aktuális érdességi szabványba. A szoftver grafikus képességeit mutatja be a 8. ábra.

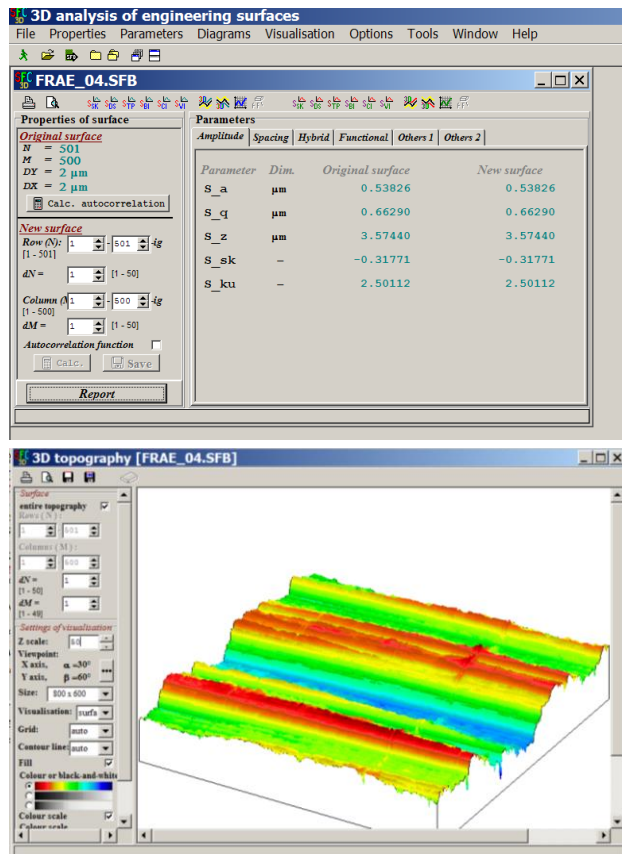
1999-ben a műszerpark megújult/kiegészült a kor igényeinek megfelelő, számítógépes vezérlésű, nagy pontosságú kutatóműszerrel a Mahr Perthometer Concept érdességmérővel. A beszerzett tapintókészlet gyakorlatilag az összes akkor létező tapintófajtát tartalmazta, így a berendezés képes volt mély furatok, fogaskerek fogfelületének, kis sugarú henger és gömb jellegű alkatrészeknek a mérésére. A speciális tapintók lehetőséget biztosítottak forgácsoló szerszámok élérdességének mérésére. A csúszkás tapintók 2 µm-es lekerekítési sugara az akkori (és mai) szabványos előírások legfinomabb felületek mérésére vonatkozó követelményét is teljesítette. A rákövetkező években a hagyományos forgácsolt fémfelületek mérése mellett repülőgép-alkatrészek, papír-, műanyag-, sőt gyümölcsfelületek mérése is megvalósult a műszerrel különböző kutatások keretében. A speciális tapintókészlet olyan egyedi ipari feladatok kivitelezését is lehetővé tette, mint vasúti fékekben megtalálható mozgatóorsók menetprofil-érdességének mérése, golyósorsók futópálya-érdességének mérése, vagy csapágyfutópályák érdességi és hullámossági vizsgálata.



9. ábra: Mahr Perthometer Concept érdességmérő a Bánkin

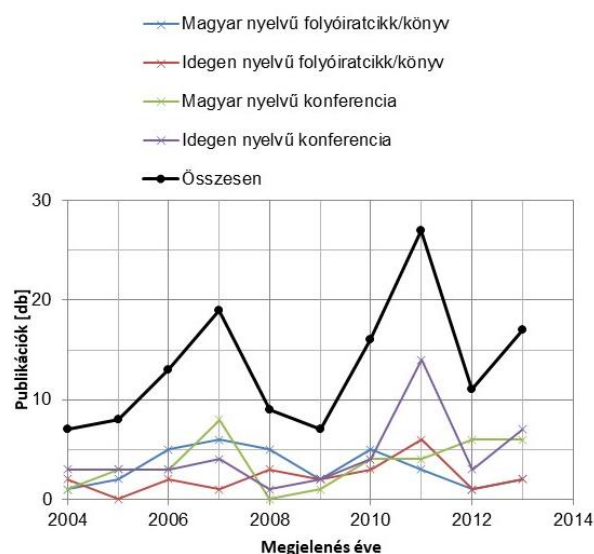
A XXI. századba lépve – követve az 1990-es évek nemzetközi trendjeit – a Bánkin is megindultak a 3D-s topográfiai mérésre és kiértékelésre irányuló kutatások.

A Mahr Perthometer Concept kutatóműszer kiegészült a keresztirányú mozgásokat biztosító mozgatóasztallal, ami 3D-s topográfiai mérését is lehetővé tette. Ezzel párhuzamosan 2000-ben elkészült a kutatócsoport (Palásti Kovács Béla, Horváth Sándor, Kovács Kálmán, Wiesel Csaba) által az akkori 3D-s érdességmérés minden fellelhető paraméterét és kiértékelési lehetőségét magába foglaló Surf3D szoftver. A rendszer képességeit jól jellemzi, hogy több mint 30 topográfiai paraméter kiértékelésére volt képes, melyek közül több még ma is kurióznak számít a topográfiai érdességmérés terén, és a szabvány vagy az ipari szoftverek számára ismeretlen. A szoftver olyan mélyreható elemzésekhez biztosított háttérrel, mint a mintavételi lépésköz hatásának vizsgálata, vagy a 3D-s autokorrelációs kiértékelés. Képes volt a kopási folyamatok „matematikai szimulációjára” oly módon, hogy a felületeket „csonkolta”, azaz eltávolította egy adott szint felett az érdességet, majd azt síkfelülettel pótolta. A szoftver később angol nyelvű modullal is bővült. Grafikus képességeit mutatja a 10. ábra.



10. ábra: A Surf3D kezelőfelülete (fent) és topográfiai megjelenítési modulja (lent)

Az intenzív kutatómunka eredményei a 2005-2015 időszakban értek be. Több PhD értekezés (Czifra Árpád, Farkas Gabriella, Horváth Sándor, Barányi István, Horváth Richárd) készült el, számos hazai és nemzetközi publikáció látott napvilágot (ld. 11. ábra).



11. ábra: ÓE-BGK felületminőség kompetenciaterrületén született publikációi 2004-2013 között

Ebben az időszakban a Bánki már több hazai és nemzetközi együttműködés része volt. Szoros kapcsolat alakult ki a BME (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem) és a SZIE (Szent István

Egyetem; ma MATE: Magyar Agrár és Élettudományi Egyetem) kutatóműhelyeivel. A forgácsoláskutatás mellett megjelentek a tribológiai vonatkozású vizsgálatok és a Bánki mint a felületminőség kompetenciaterület gondozója jelent meg ezekben az együttműködésekben. A felületvizsgálatok szélesebb körét biztosította a Kar anyagvizsgáló laborjainak műszerállománya: sztereomikroszkópos vizsgálatok, elektronmikroszkópos mérések, keménységmérések, mikro-keménységi vizsgálatok.

Az eredmények mellett ebben az időszakban megérkeztek a hazai és nemzetközi elismerések is. 2005-ben a Gépipari Tudományos Egyesület jutalmazta Műszaki Irodalmi Díjjal a kutatócsoport munkáját [14], elismerve a hazai szaknyelv ápolásában elért eredményeinket, melyet 2018-ban egy újabb Műszaki Irodalmi Díjjal erősített meg [15].

2009-ben a felületi érdességméréssel foglalkozó szakemberek 12. nemzetközi konferenciáján, a XII. *Metrology and Properties of Engineering Surfaces* rendezvényen, Rzeszówban a *Best Poster Award* elismerésben részesült kutatócsoportunk munkája (ld. 12. ábra).



12. ábra: A MetProp2009 Best Poster Award díja

A 2005-2015 közötti időszakban a műszerpark fejlesztése is kiteljesedett. A 2006-ban beszerzett Mahr gyártmányú MahrSurf PS1 hordozható kisműszer gyors és hatékony műhellyműszerként állt rendelkezésre a kor igényeinek megfelelő kiértékelés-technikával, adatgyűjtési és csatlakozási lehetőségekkel (ld. 13. ábra).



13. ábra: MahrSurf PS1 műszer a Bánkin

A középkategóriás, ipari mérőlaboratóriumi műszereket a Mitutoyo cég 2009-ben beszerzett SJ 301 típusú műszere képviselte. A könnyen kezelhető, állványos, stabil kis műszert a TDK-zó hallgatók is előszeretettel használták, használják. Több szakdolgozat, TDK-munka, ipari megrendeléshez szükséges mérések elvégzését tette lehetővé.



14. ábra: Mitutoyo SJ 301 mérőlabori érdességmérő műszer

A kutatásokat a Mahrtól 2012-ben beszerzett GD 120-as vontatóegysége és a hozzá kapcsolódó XCR és XT szoftvercsomag segítette. Ennek hazánkban elsőként része volt a VDI akkori ajánlását követő domináns hullámhossz-kiértékelő modul is. Ezek a paraméterek a legújabb, 2021-es érdességi ISO-szabványba (ISO 21920) is bekerültek.



15. ábra: Mahr GD 120-as vontatóegység az állványon a Bánki érdességmérő laborjában

A kutatásokat a mérés technikai lehetőségek mellett a kiértékelési lehetőségek folyamatos fejlesztése jellemezte. 2005-ben készült el a felületi érdességcsúcsok és karcok azonosítását és jellemzését lehetővé tevő szoftver, az SfbView. Ez az eszköz már olyan felületi jellemzőket azonosított, mint az érdességcsúcsok vagy -völgyek görbülete. Ezek a jellemzők a 2008-as topográfiai szabványban is helyet kaptak. A 2009-ben kifejlesztett PSDforSurfaces szoftver a mikrotopográfia teljesítménysűrűség-spektrumának kiértékelését tette lehetővé. A 2010-es években a kiértékelés-technikai módszerek mellett megjelentek a kutatócsoport kiterjesztette tevékenységét a szimulációs eljárások irányába is. A kidolgozott módszer abráziós kopási folyamatok érdes felületeinek előrejelzését célozta.

4 FEJLŐDÉSI IRÁNYOK A FELÜLETI ÉRDESSÉGMÉRÉSBEN

A hazai és nemzetközi kutatások a felületi érdességmérés terén több irányban jellemezhetők.

Az egyik fontos terület az alkalmazástechnika fejlődése. Itt a legnagyobb kihívás a működéshez optimalizált felületi minőség meghatározása és annak legyártása. Az ehhez kapcsolódó kutatások keresik azokat a felületi jellemzőket, amivel a működési, tribológiai folyamat legjobban leírható (ld. [16-18]). Másrészt fontos, hogy képesek legyünk

ezeknek a felületeknek a legyártására. A hagyományos gyártástechnológia eljárásokban megjelenő fejlesztések és az új technológiák egyaránt kihívást jelentenek ezen a téren (ld. [19, 20]). A gyártástechnológiai paraméterek és a felületi érdesség jellemzői közötti kapcsolat vizsgálata intenzív kutatási terület napjainkban. A jövőbeni kutatások egyik fontos területe, hogy a mérés- és kiértékelés-technika nyújtotta lehetőségek megjelenjenek az alkalmazások területén. A tribológia és a gyártástechnológia területén dolgozó szakemberek és kutatók felismerik, hogy néhány hagyományosan alkalmazott paraméter használata nem elégséges a felületek komplex leírásához, ennek következtében egyre tudatosabban fordulnak a ma már szabvány által is biztosított széleskörű kiértékelési lehetőségekhez, ezáltal komplex módon írják le a felületeket (ld.: [21, 22]).

Ezzel együtt a kiértékelés-technika területén újabb és újabb módszerek látnak napvilágot, amik a felületek egyre részletesebb jellemzését teszik lehetővé. A 2021-ben megjelent ISO 21920 szabvány már a paraméterek besorolásában is érvényesíti azt a szemléletváltást, ami az elmúlt éveket jellemezte ezen a területen. A paramétereket mező (*field*) és sajátosság (*feature*) kategóriákba sorolja. Ez a felosztás hűen tükrözi azt a két irányvonalat, amerre a felületek (2D-s profilok és 3D-s topográfiai) kiértékelése fejlődik. A teljes mérési adathalmazra épülő, „globális” eljárások közé tartoznak a fraktál alapú kiértékelések [23], az autokorrelációs és a *wavelet*-transzformációs analízisek [17]. Ezek célja olyan, az egész felületet jellemző, sőt azon túlmutató ún. teljes spektrumú (*full-range*) vizsgálatok biztosítása, ami átfogóan képes jellemezni a felületet. Sok esetben ezek emelt szintű matematikai ismeretek alkalmazását és a kiértékelési eljárásokba történő beépítést igénylik. A másik domináns irány a felület geometriai sajátosságaira fókuszáló módszertan [24].

A fejlesztések a műszertechnika területén is folyamatosak. Az új technológiák, például a CT (computer tomográfia) alkalmazása az érdességmérésben folyamatos kihívást jelent. Hasonló kihívás a berendezések alkalmassá tétele speciális, főként nagy pontosságú, precíziós mérések végzésére [25].

5 KÖVETKEZTETÉSEK

A felületi érdességmérés az 1930-as évek óta jelentős fejlődésen ment keresztül. Az átlagos érdességet (R_a) és érdesség magasságot (R_z) számoló tapintós profilométerek világából napjainkra a nanométeres nagyságrendű érdességet mérni képes atomi erő-mikroszkópok és optikai elven működő berendezések által biztosított 3D-s topográfiai felületi sajátosságokkal, autokorrelációs függvényekkel vagy éppen fraktálokkal történő jellemzéséig jutottunk.

A Bánki ennek a dinamikus fejlődésnek az aktív részese volt az elmúlt ötven évben. A forgácsolt felületek és forgácsolószerszámok geometriáját jellemző, valamint a súrlódó felületek tribológiáját meghatározó felületi vizsgálatok mellett komoly kiértékelés-technikai fejlesztések zajlottak és zajlanak ma is a karon. A kutatási területeknek egyaránt része a paraméterek gyakorlati alkalmazhatóságának vizsgálata, az összetett paraméterkombinációkon, autokorrelációs viselkedésen, vagy éppen fraktálokon nyugvó kiértékelés-technika fejlesztése. Mindezek eredményeként az érdességmérés egyik legjelentősebb hazai műhelye működik karunkon.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] ISO 14638 (2015): Geometrical product specifications (GPS). Matrix model
- [2] Whitehouse, D. J. (1994). *Handbook of surface metrology*, Inside of Physics Publ., Bristol
- [3] Dowson, D. (1979). *History of tribology*, Longman Inc., New York
- [4] Andy Dingley - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18797600>
- [5] Stout, Sullivan, Dong, Mainsah, Luo, Mathia, Zahouni (1993). *The development of methods for characterisation of roughness in three dimensions*, Printing Section, University of Birmingham Edgbaston, Birmingham
- [6] ISO R468 (1966): Surface roughness
- [7] Greenwood, J.A. and Williamson, J.P. (1966). Contact of nominally flat surfaces. *Proceedings of the royal society of London. Series A. Mathematical and Physical sciences*, 295(1442), pp.300-319.
- [8] Stout, K. J., Vorbuerger, T. V. (1988). Metrology and properties of engineering surfaces, *Proceedings of 4th International Conference*, National Bureau of Standards, Washington DC
- [9] Rosén, B. G., Thomas, T. R. (2004). Metrology and properties of engineering surfaces, *Proceedings of 9th International Conference*, Halmstad University, Halmstad
- [10] Stout, K. J., Blunt, L. (2000). *Three-Dimensional Surface Topography*, Penton Press, London, UK
- [11] ISO/DIS 25178-2 (2008). Geometrical product specifications, Surface texture: Terms, definitions and surface texture parameters
- [12] Palásti Kovács, B., Csiszár, G. (1978). A felületi mikrogeometria jellegzetességeinek változása keményfém váltólapkás szerszámmal végzett simító esztergáláskor, *IV. Szerszám és Szerszámanyag Kollokvium*, Miskolc, pp. 1-12
- [13] Horváth, S.; Palásti Kovács, B. (1993). Forschungsergebnisse der Oberflächengeometrie in Ungarn., 4. Internationales DAAAM Symposium, Brno, pp. 119-120
- [14] Czifra, Á., Váradi, K., Palásti Kovács, B. (2004). A felületi mikrotopográfia karcainak vizsgálata szeletelő módszerrel, *Gép* 2004/10-11 p. 40-43.
- [15] Czifra Á., Horváth S. (2017). Műszaki felületek osztályozása mikrotopográfiai paraméterek alapján, *GÉP* 2017/3, 68., p. 23-27.
- [16] Zainab, A., Bognár, G. (2024). Investigation of the Impact of Surface Roughness, on a Ship's Drag (Hull Resistance), *Acta Polytechnica Hungarica* 21 : 2 pp. 7-32. , p. 26
- [17] Edjeou W., Cerezo V., Zahouani H., Do M.-T. (2023) Contribution of multiscale analysis to the understanding of friction evolution of aggregates surfaces, *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* 11 014006
- [18] Barányi I. (2020). Characterization of Tribological Behaviour of Surface Topographies by Roughness Measurement at the Beginning of the Wear Process, *Acta Technica Jaurensis* 13 : 2 pp. 151-160.
- [19] Mikó, B. (2023). Comparison of the Surface Roughness and its Geometric Model in Case of Z-level Milling, *Acta Mechanica Slovaca* 27 : 2 pp. 32-41.
- [20] Bartkowiak, T., Gapiński, B., Wiczorowski, M., Mietliński, P., Brown, C. A. (2023). Capturing and characterizing geometric complexities of metal additively manufactured parts using x-ray micro-computed tomography and multiscale curvature analyses, *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* 11 014002
- [21] Czifra, Á.; Barányi, I. (2020). Sdq-Sdr Topological Map of Surface Topographies, *Frontiers in Mechanical Engineering* 6 pp. 1-9.
- [22] Horváth, R., Czifra, Á., Drégelyi-Kiss, Á. (2015). Effect of conventional and non-conventional tool geometries to skewness and kurtosis of surface roughness in case of fine turning of aluminium alloys with diamond tools, *Int J Adv Manuf Technol* 78, pp. 297-304
- [23] Czifra, Á., Ancza E. (2024). Micro- and Nano-Roughness Separation Based on Fractal Analysis, *MATERIALS* 17 : 2 p. 292
- [24] Reddy, V. V., Krishna, A. V., Schultheiss, F., Rosén, B. G. (2017). Surface topography characterization of brass alloys: lead brass (CuZn39Pb3) and lead free brass (CuZn21Si3P), *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* 5 025001
- [25] Mustafa, A., Muhamedsalih, H., Tang, D., Kumar, P., Jiang, J. & Blunt, L. (2025). Investigation of focus variation microscopy immunity to vibrations, *Precision Engineering*, 93, p. 87-98.