

találhatók a tengeralattjárókkal és a hajókkal való közvetlen kommunikáció céljára is. Vajon a 40 kHz frekvenciájú ultrahang modulációja lehetővé teszi-e a zenei hangok megfelelő minőségű átvitelét? Már az egyszerű szinuszelekkel modulált adó megtervezésekor felmerült, hogy a myDAQ sávszélessége lehetővé tenné-e, hogy ezt a moduláció céljára használt szinuszfüggvényt egy olyan jelsorozatra cseréljük le, amelyet a myDAQ A/D konvertere állít elő, miközben az AUDIO IN bemenetén valamilyen zene vagy beszéd analóg jelét digitalizálja. A kísérlet meglepően jó eredményt szolgáltatott. Bár a mintavételi törvény értelmében a kísérlet sikerének elvi lehetősége fennállt, de hogy ez a gyakorlatban is ilyen szépen működik, azért okozott némi kellemes meglepetést. A kísérlethez kidolgozott VI blokkdiagramja a 6. ábrán látható.

A modulátor működése a következő: az átvinni kívánt jelforrás (például egy mp3 lejátszó vagy egy mobiltelefon) fülhallgató-csatlakozójáról egy 3,5 Jack kábellel vezessük a jelet a myDAQ Audio In bemenetéhez. Ezt a jelet egy DAQ assistant segítségével konfigurált A/D konverterrel digitalizáljuk. A digitalizálás

hoz használt mintavételi frekvenciát a vivővel történő szinkronizálás miatt állítsuk szintén 200 kHz-re, a bemenő feszültség szintjét pedig ± 100 mV-ra. Adás közben a modulált jel elnevezésű kijelző ablakában – a jelenség szemléletesebb bemutatása érdekében – valós időben jelenik meg a bemenő jel, a vivőfrekvencia és a modulált jel alakja. A vevő oldalon HCSR04 átalakításával nyert demodulátor-egységet egy kisebb erősítővel is rendelkező PC hangfalhoz kötve kifejezetten élvezhető minőségben hallgathatjuk az „adó” által sugárzott jeleket. Egy adás közbeni modulált jelről készült pillanatfelvétel látható a 7. ábrán. A kísérletet bemutató videó megtekinthető a Youtube videómegeosztón [5].

Irodalom

1. www.malnasuli.hu/oktatas/tavolsagmeres-hc-sr04-ultrahang-szenzorral
2. www.pcserviceselectronics.co.uk/arduino/Ultrasonic/electronics.php
3. <https://www.youtube.com/watch?v=yJnoDXV5SGc>
4. https://mega.nz/#!xkkAWKjBlvLxSuiUq39RwZpvY5s4Iq9LOstf-vkq_2nq_ocffe4
5. <https://www.youtube.com/watch?v=3AW1vxxNpDs>

SZÁMÍTÓGÉPES IDŐKÖZMÉRÉS A NAGYVÁRADI ADY ENDRE LÍCEUM FIZIKUMÁBAN

Bartos-Elekes István
Nagyvárad, Románia

Mottó: Pontosan mérni nagyon nehéz, talán nem is lehet, de egykönnyen nem adom fel!
(az utóbbi hatvan évem tapasztalataiból)

A tanári és a „maszek” kutatói pályafutásom alatt mindig érdekelt a nehézségi gyorsulás meghatározása, valamint az ebből eredő feladat: az időközök minél pontosabb megmérése. A '70-es évek közepén Marokkóban voltam vendégtanár. Hazafelé jövet a pisai ferde torony tövében fogadtam meg, hogy otthon én is meghatározom a nehézségi gyorsulást. Oly egyszerűnek tűnt a $h = gt^2/2$, hogy szinte helyben nyomkodni kezdtem a virtuális stopperemet. Otthon kísérlet kísérletet követett, de az időköz-méréssel kapcsolat-

ban egyre több és egyre nehezebben megoldható mérési feladat merült fel. Már régen nem csak a nehézségi gyorsulás meghatározása volt a probléma. Bajban voltam a nehezen beszerezhető kvarcokkal, a diszkrét elemekből sok munkával megépíthető számlálókkal, az eredmény kijelzésével és a mért adatok feljegyzésével. Olyasmire nem is gondolhattam, hogy két évtized múltán, az éjszakára magára hagyott kísérletben a mérőrendszerem rendkívüli pontossággal és μ s alatti felbontással mérje az uránérc statisztikus bomlásának időközzeit, reggel pedig három és félmilliónál is több mérési adat várjon. A számítógépek elterjedésekor „ingyen” kínálkozott egy túlcsoportosulás nélküli számláló és több kvarcalapú időzítő, így a kor szokásait elhagyva, nem egy külső mérőeszközzel, hanem egyenesen a számítógéppel (ZX81) kezdtem mérni. Az adatok valós időben kerülhettek azonnali feldolgozásra és „megválaszolásra”, azaz létrejött a számítógéppel való mérés-vezérlés. A számítógépek fejlődésével egy addig elérhetetlen lehetőség tűnt fel, a korábbiaknál több ezerszer finomabb felbontású



Bartos-Elekes István a nagyváradai Ady Endre Líceum nyugalmazott fizika- és informatikatanára, kísérleti berendezéseket tervező és építő fizikus-elektronikus. A kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetem Fizika Karán végzett 1968-ban. 1974–76 között vendégtanár Marokkóban. 1987-ben tudományok doktora címet szerzett. Egy szabadalma alapján (1989) számítógép-vezérelt Fizikumot épített a Líceumban saját fejlesztésű mérőkészülékeiből. 1991 óta szervezi a Schwartz-versenyt.



1. ábra. Analóg kronométerek – 1980 és 1981.

időegység, a mikroprocesszor órajele. Nemsokára megfejttem az Atomórával közvetlen kapcsolatban levő szimultán mérés-kalibrálással. Az elért ppm majd ppb és a hihetetlen ppt szintű mérési pontosság bőven megfelelt a Fizikum igényeinek. Már-már elbizonytalanodtam mottóm igazában. Ezekről a megoldásokról, kínládásokról és örömekről szól ez a kis bemutató, valamint a jóval bővebb prezentáció¹ a *Fizikai Szemle* webhelyén.

Analóg elektronikus kronométer

A pisai fogadalmamnak megfelelően, a valódi stopperórát is elhagyva, időközmérőt próbáltam építeni. A napórán kívül a startjel és a stopjel közötti időintervallum mérését (az ingaórától az atomóráig) valamilyen időfüggő periodikus jelenség ismétlődéseinek megszámlálása jelenti. A homokóra az alsó tartályba érkező homokszemeket „számlálja”. Én is hasonló módon számláltam meg a kondenzátorba jutott elektronokat. A töltés állandó árammal történt, a start- és a stopjelet fotodiódás fényesorompókkal oldottam meg. A kondenzátor feszültsége arányos a töltőárammal és az idővel. Ha az I_0 töltőáram állandó, akkor az eltelt időt a

$$\Delta T = \frac{C}{I_0} U_{\max}$$

képlet adja meg. A stopjel után egy FET-es voltmérővel megmértem a kondenzátor feszültségét, ebből kiszámíthattam a töltéssel eltelt időt. A legkisebb mérhető időköz 1 ms (a teljes skálán), a legnagyobb 30 s,

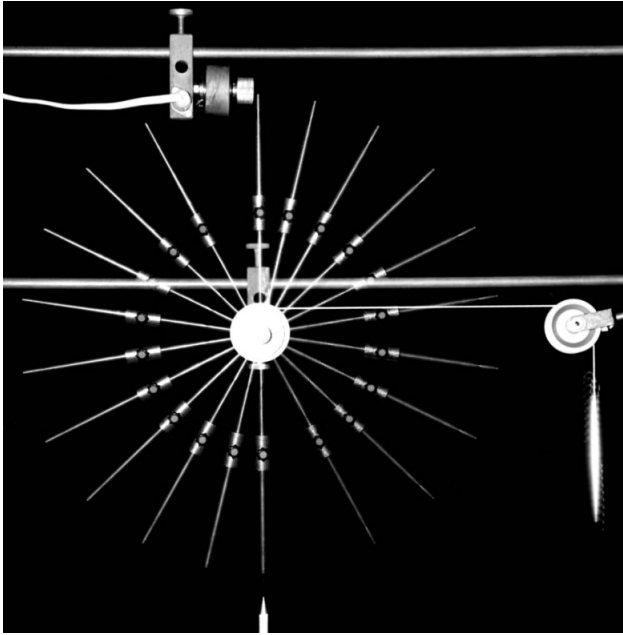
¹ Megtekinthető a <http://fizikaiszemle.hu/extra/bartos1912> helyen.

szabványos 1-3-10 lépésekben. A leolvasási pontosság növelésére egy külső műszercsatlakozó is van, ide csatlakoztathattam a Vielfachmesser, nagyskálás, hajszálvékony üvegtűs voltmérőmet. Az eredmény leolvasására körülbelül tíz másodperc állt rendelkezésre. Két fényesorompós analóg kronométert építettem (1. ábra, 1980), amely szabadalmat² is kapott, kilenc országban publikálták. A gyártásra előkészített prototípus érkezési fényesorompóját VOX vezérlésre is cserélhettem (1. ábra, 1981), és így koppanással is megállíthattam a kronométert. Mivel a kalibrálás fizikai alapokon történt, nagyon bíztam a kronométer használhatóságában. A rendelkezésre álló kvarcetalonjaim leosztott frekvenciájú időközzeit igen jól mérte, de a szabadesés magasságának csökkenésével egyre jobban hibázott. A kronométer jól mért, de az első fényesorompót nem tehettem nulla távolságra a golyó alá, a kimaradt útnak megfelelő időt pedig nem mérhette meg a kronométer, ez okozta az egyre nagyobb hibát. Egy próbaszámításban legyen a $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, az elhelyezési hiba a megvalósíthatatlan $\Delta h = 100 \text{ }\mu\text{m}$. Ezt a Δh távolságot a golyó $\Delta t = 4,52 \text{ ms}$ alatt teszi meg. A hátralevő $h = 0,4 \text{ m}$ utat a már elért $v_0 = 44,3 \text{ mm/s}$ kezdősebességgel, $t = 281,05 \text{ ms}$ alatt teszi meg, de mi csak 281 ms-nak olvassuk le. Az elkerülhetetlen, beépített mérési hibák miatt a g kiszámított értéke $10,13 \text{ m/s}^2$! Kiderült, hogy két fényesorompóval lehetetlen meghatározni a g -t! Ezután „kikerültem” az első fényesorompót, és az elektromágnes tápfeszültsége megszüntetése pillanatát vettem a golyó biztosan pontos indulási időpontjának, ez a jel került az első fényesorompó jele helyére. A hiba még nagyobb lett, a nehézségi gyorsulás pedig sokkal kisebb! Kisebb, vagyis a golyó nem indult el azonnal, az elektromágnes remanenciája (és a Lenz-hatás) visszatartotta! Az elvileg helyes, de mérési hibalehetőségekkel teli megoldást az egész osztállyal (nyolc mérőhely) elvégzett stroboszkópos szabadesési mérési kísérlet jelentette (lásd alább).

Számítógép-vezérelt stroboszkóp

Szintén Marokkóból jövet, Altamira sok ezer éves barlangfestményeit csodálva egy nyolclábú vaddisznóra lettem figyelmes. Kiderült, hogy az állat mozgását akarták ábrázolni. Rögtön beugrott a stroboszkópos képek alkalmazásának lehetősége a fizikatanításban. Itthon elkészült a klasszikus elektronikus stroboszkóp, amely a '80-as évek végére számítógép-vezérlést is kapott. Az addig elterjedt állandó időközű stroboszkópos fényképezés mellé, 1992-ben bevezettem az állandó térközű stroboszkópos fényképezést. Kihasználva a számítógép lehetőségeit, a mozgásfüggvény inverz függvénye szerinti időközökkel villantattam. Ha minden rendben van, akkor a pálya egyenletes mozgást mutat, ha nem, akkor

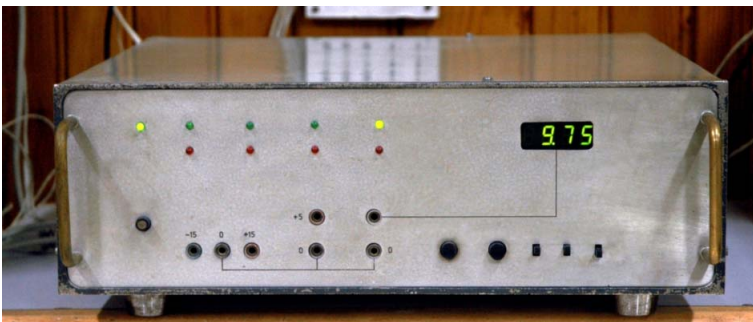
² Bartos-Elekes István: *Analóg kijelzésű elektronikus kronométer a kis időintervallumok mérésére*. OSIM – 79672 számú szabadalmi leírás, 1981.04.20. – OSIM: Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci – a román szabadalmi hivatal rövidített neve.



2. ábra. Az elektromágnes remanenciája visszatartja a rudat. A térközők nem egyenlők!

meg lehet, meg kell keresni a hiba okát. Megtaláltam! A 2. ábrán a merevtest tehetetlenségének bizonyítására készült fényképsorozat egyik képe látható. A jobb oldali nehezék forgatónyomatéka hatására az elektromágnes által addig megfogott rúd az elektromágnes tápfeszültségének kikapcsolásakor forgásba kezd. A villantási időközöket úgy számítottam a géppel, hogy a szögterközők egyenlők legyenek. Nagyon nem egyenlők! Az elektromágnes remanenciája 8–15 ms-ig visszatartja a rudat. Ezt a jelenséget használtam fel a nehézségi gyorsulás szabadesésből való közvetlen meghatározásakor. Az egész osztállyal nyolc mérőhelyen kísérleteztünk. A vaksötét teremben egy acélgolyót a számítógép-vezérelt elektromágnes fog meg az 1300 mm magas állvány tetején. A terem végéből – a diákok háta mögül – két villantás következik. Az első villantással szinkronban a PC kikapcsolja az összes elektromágnes tápját, a második villantáskor (például 475 ms múlva) a diákok az előre megadott helyen levő referenciánál figyelik a golyót. A szem „lefényképezi”, még percek múltán is meg tudják mutatni a golyó helyét. Több próbálkozás után megegyeznek, és feljegyzik a villantási időközt meg a megtett utat. Csökkentjük a villantási

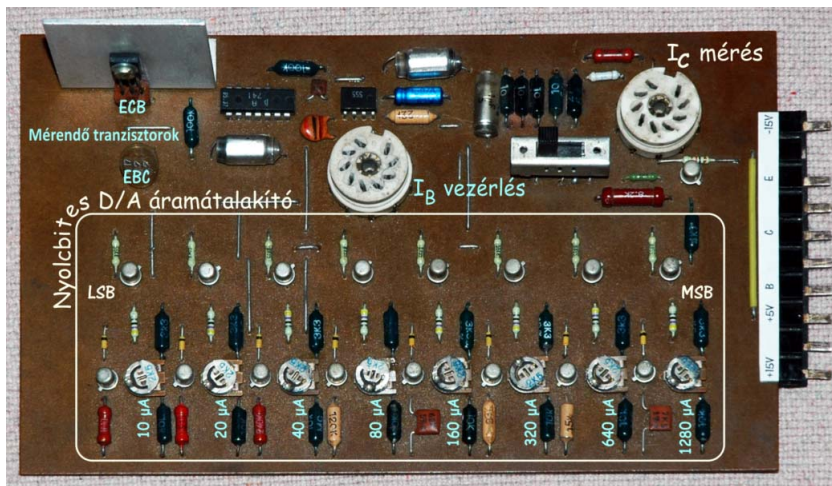
3. ábra. Szám- és számítógép-vezérelt tápforrás – 1985.



időközt, és lassan kiderül, hogy ugyanannyi idő alatt a golyó más-más távolságokat is megtehet. Az „okos” ötletemre, hogy alattad biztosan egy nagy aranyrög van, szinte mindig rájönnek, hogy az elektromágnes tartja vissza a golyót. *Ezt az időt nem ismerjük, vagyis az eddigi méréseink nem jók!* Megint tudják, hogy némi csalás van a dologban, felfedem titkot, és ügyes adatfeldolgozással, egymástól függetlenül meghatározhatjuk az elektromágnes visszatartási idejét és a nehézségi gyorsulást is. A *Fizikai Szemle* 2010. júniusi számában bemutattam a megoldást, a *Fizikumban* százával végzett egyik kísérlet fényképes bemutatója elérhető a *Mellékletek* 2018. novemberi számában.

Számítógépes mérési és vezérlési próbálkozások

A számítógéppel támogatott vezérlés-mérés a '80-as évek közepén – a beszerezhetetlen kvarcok miatt – a számomra nem volt járható út. Annak idején (még ma is) a mérések elvégzése után a külső, gyári mérőeszköz „bediktálta” a mérési eredményeket a számítógépnek, az feldolgozta, esetleg a program függvényében válaszolt is, továbbléptette a fizikai jelenséget. Létrejött a *nem valósidejű*, számítógéppel támogatott vezérlés-mérés. A külső mérőeszköz megépítését feleslegesnek tartottam és tartom ma is, mert a mérés értelmezéséhez szükséges eszközök (kvarcok, számlálók, byte-os ki- és bemeneti csatornák) sokszorosan jobb minőségben vannak meg a számítógépben. Meg kellett azonban oldanom a külső eszközök, az A/D (analóg-digitális) és a D/A (digitális-analóg) átalakítók összekapcsolását a számítógéppel. Amennyiben az A/D átalakító TTL jelei bekerülhetnének a számítógépbe, akkor nem a nagyon komplikált külső eszköznek kellene megoldania az értelmezésüket, hanem azt rábízhattam a szinte mindentudó számítógépre. A D/A átalakítók Assembly vezérlése is a számítógépen belül jön létre, ezt egy külső hardver szinte meg se oldhatná (például a felharmonikusok bemutatására szolgáló komplex jelsorozat). Az átalakítók kívül maradnak, azok nagy, elektronikai egységek (3. ábra), csak a többcsatornás, byte-os vezérlőjeleket kapják a számítógéptől. Egy jellegzetes példa a tranzisztorok kimeneti karakterisztikáját megrajzoló kétszer nyolcbites vezérlésű D/A és egybites A/D átalakító. A kollektorfeszültséget a számítógép-vezérelt tápforrástól kapja, a bázisáram-vezérlést egy másik, byte-os csatornán érkezett információ alapján a készülék saját maga állítja elő a nyolcbites, kettes számrendszer szerint súlyozott áramok összegéből (4. ábra). A kollektoráram A/D konvertere helyben van, az egybites időköz-információt és az áramfigyelő ellenállást váltó állapotait egy nyolcbites csatlakozó juttatja a számítógépbe. *De hogyan jut a számítógépbe az A/D konverter jele, hogyan történik az egy byte-os vezérlés?*



4. ábra. Számítógép-vezérelt tranzisztor-karakterográf – 1987.

mítógép konzoljához való közvetlen elektronikai hozzáférést, a próbainterfész sikerén felbuzdulva, 1987-ben hétportosra bővítettem (5. ábra) és PIO – Parallel Input Output néven 1989-ben szabadalmat³ is kaptam rá. Az addigi mérőkészülékeim jeleit immár be tudtam vinni a számítógépbe. A fizikai jelenséget mérő analóg-digitális átalakítót (A/D) egyszerű érzékelővé szűkítettem, az addigi külső értelmező és számító részt egy Assembly rutin formájában hoztam létre a számítógép belsejében. *Létrejött az Electronics + Assembly képletű számítógépes, újfajta mérőrendszer.* Nem igényelt precíziós kvarcokat, komplex számlálókat, tárolókat, különleges kommunikációs feltételeket, ez mind benne volt a PC-ben. A számítógépes jelző itt nem a már megmért adatok fogadását-feldolgozását, hanem a mérés folyamatában való effektív részvételt jelenti. Ez lényeges különbség a mai, szokásos USB-s mérőrendszerekhez képest. A mérési adatok a számítógépben keletkeznek, valós idejű mérés jön létre, ez óriási előny! Az első, valós idejű mérések örömét nem lehet leírni! Egy teljesen új világ nyílt meg előttem!

Univerzális, hétportos kétirányú interfész

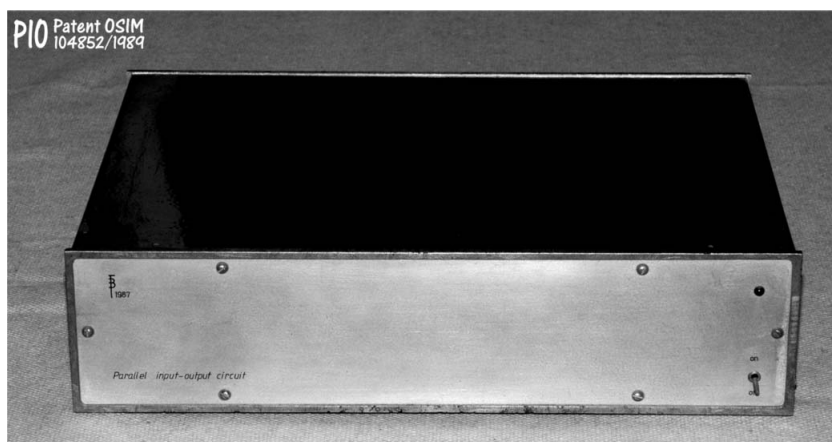
1985-ben jobban „belenéztem” a nemrég vásárolt ZX81-be, megtaláltam a konzol bekötéseit, majd megállapítottam, hogy lehetséges az egy byte-os kommunikáció létrehozása. Egy héten belül egy kétirányú, egyportos próbainterfészt építettem, ennek birtokában, a számítógép + mérés fogalomkörében a kor szokásaihoz képest egy teljesen más úton indultam el. Az akkori (és a mostani) mérésbediktálás helyett magát a számítógépet „kértem fel”, hogy felügyelje és értelmezze a mérést. Ez valós időben történik. A komplett, külső mérőeszközt logikailag „kettévágtam”, az egyszerűbb, a fizikai mennyiséget érzékelő elektronikai rész kívül maradt, az alkatrészigényes (kvarcok) értelmező és számító részt pedig Assemblyben a számítógépre bízta, hiszen abban minden rendelkezésre állt. Addig az első rész jeleit nem sikerült egyből bevennem a számítógépbe, mert a személyi számítógépek elterjedésének kezdetén – a '80-as évek közepén – az akkori számítógépeket csak soros kommunikációra tervezték, így nem rendelkeztek párhuzamos portokkal. Mivel már az első elterjedt személyi számítógép, a ZX81 is támogatta a szá-

mlézőket, tárolókat, különleges kommunikációs feltételeket, ez mind benne volt a PC-ben. A számítógépes jelző itt nem a már megmért adatok fogadását-feldolgozását, hanem a mérés folyamatában való effektív részvételt jelenti. Ez lényeges különbség a mai, szokásos USB-s mérőrendszerekhez képest. A mérési adatok a számítógépben keletkeznek, valós idejű mérés jön létre, ez óriási előny! Az első, valós idejű mérések örömét nem lehet leírni! Egy teljesen új világ nyílt meg előttem!

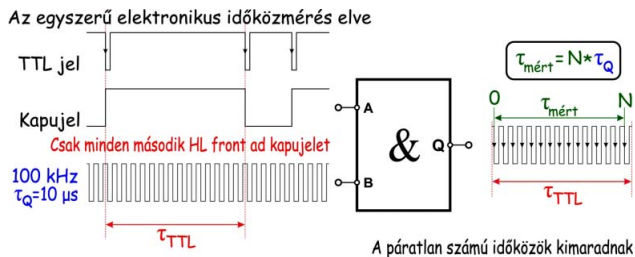
Az elektronikus időközmérés elve

Ahhoz, hogy értékelni tudjuk a számítógépes időközmérés előnyeit, először lássuk, mi módon mérnek az elektronikai eszközök. Az elektronikus időközmérők a mérendő jelek közötti időt egy kvarcetalonból származó órajelsorozattal töltik ki, ezután megszámlálják, hogy hány teljes periódus fért el a mérendő időközben. A mérendő jel minden második HL (High → Low) frontjával egy-egy kapujelét hoznak létre (6. ábra), amelynek magas szintje megnyitja, az alacsony szintje pedig lezárja a logikai AND kaput. A kapu másik bemenetére kerül a mérés órajele (kvarcetalon), a kimenetén pedig megjelenik a kapujel által engedélyezett impulzussorozat. Az $N+1$ számú HL front között N egész periódus van, így a τ_{TTL} időköz mért értéke $\tau_{mért} = N\tau_Q$, ahol a τ_Q az órajel periódusa. A mérés során majdnem kétszer két teljes órajelet is elveszíthetünk-nyerhetünk, ezért a legnagyobb felbontási hiba $\pm 2/N$ lesz. A kísérletezőknek a képlet

5. ábra. PIO (Parallel Input Output) – Hétportos, kétirányú interfész – 1987.



³ Bartos-Elekes István, Bartos-Elekes Zsolt: 7 portos, 8 bites párhuzamos interfész olyan, Z80-as mikroprocesszorral megépített számítógépek számára, amelyekenél létezik a külső buszhozzáférés. OSIM – 104852 számú szabadalmi leírás, 1989.01.26



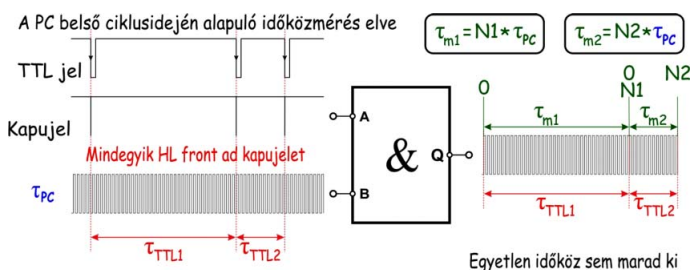
6. ábra. Az egyszerű elektronikus időközmérés elve.

rögtön mutatja, hogy minél nagyobb az N , annál kisebb az elkerülhetetlen felbontási hiba. A kapuidő lejártakor a készülék kijelzi a mért időköz értékét, majd a következő HL front megjelenésekor újból indul a mérés. Az elektronikus eredetű jelsorozatok időközmérésekor nincs fontossága a kimaradt időköznek, hiszen úgyis átlagolunk, de a változó időközök egyedi mérésére (szabadesés, radioaktív bomlások) ez a módszer nem alkalmas, mert minden második időközmérési lehetőséget elveszítünk. A vesztés oka a kijelzés és az értéktadás elkerülhetetlen időigénye, mert az értékeket nincs hol tárolni. A számítógépes mérésnél nincs kijelzés, az érték a PC-ben keletkezik, az átadás ns-ok alatt megy végbe, vagyis a mentést biztosan befejezi a következő logikai kapujel megjelenéséig.

A számítógépes időközmérés elve

A számítógépes időközmérés elve (7. ábra) hasonló az időköz elektronikus mérési elvéhez, de van néhány lényeges, nagyon előnyös különbség is (lásd alább). Az AND kapu csak szimbolikus, szoftveresen megoldott logikai egység. A virtuális kapujel a mérendő TTL jel HL frontja megjelenésekor kezdődik, és a következő HL front megjelenéséig tart, eközben a PC egy szoftveres ciklusban „ragadva” várja a TTL jel újabb HL frontját. A kapujel alatt a PC egy τ_{PC} periódusú ciklikus folyamat jeleit számlálja, vagy a végén leolvassa az eltelt ciklusok számát. Minél kisebb a τ_{PC} , annál több periódus fér el a két HL front között, és annál pontosabb a mérés. A ciklikus folyamat periódusainak számlálását a PC végzi, esetleg a HL front megjelenésekor lekérdezheti valamilyen külső vagy belső óra időpontjait. A buszsebesség nem engedi meg a 100 kHz-nél jóval nagyobb órajeleket, ezért a belső órajelekre hagytuk. A számítógépnek három belső órája van: a processzor

7. ábra. A PC belső ciklusidején alapuló időközmérés elve.



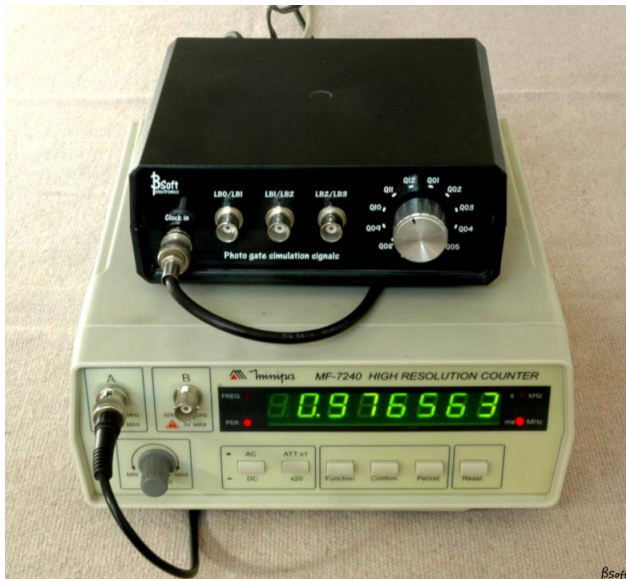
Egyetlen időköz sem marad ki

órajelforrása, az operációs rendszer órája (Operating System Clock). Az OS Clock a gép bekapcsolásakor átveszi az elemes, örökjáró CMOS-óra⁴ időpontját, azonnal átalakítja az OS Clock rendszerének megfelelő időpontformába. A CMOS óra másodperc felbontású, az OS Clock felbontása alapértelmezésben 55 ms körüli, de hétszámjegyes pontossággal kiszámítható (lásd a prezentációt). A CMOS óra hozzáférhető időegysége a másodperc, az OS Clock egy kis gépismert segítségével felgyorsítható 100 μ s-ig (lásd a prezentációt). Mindkettő lekérdezhető az esemény (HL front) megjelenésekor, de a nagy periódusuk miatt inkább csak frekvenciamérésre használjuk. A felgyorsított OS Clock az alapja a stroboszkópos működésének is, ezt használom a villanólámpa időzített vezérlésére, és a mozgásfüggvény inverz függvénye szerinti villantások időközének előállítására. Az i486-os mikroprocesszor megjelenésekor hozzáférhető lett a processzor órajele, ennek periódusa ns nagyságrendű, így igen pontos mérésekre alkalmas. *Ez lényegében változtatta meg az időközmérést, mert az elért felbontás minden addigi elképzelést felülmúlt.*

Kimaradt a PC saját számlálója alapján működő mérés. Még 1987-ben dolgoztam ki a PC belső mérőportja figyelési ciklusideje alapján működő időmérőforrást. E figyelési ciklus ideje csak processzor órajelet előállító kvarcoszcillátor stabilitásától függ (főleg a hőmérséklet befolyásolja). A HL front figyelési ciklusában elhelyezünk egy önfeltöltődő számlálót, amely a program ottjártakor egyet-egyet lép. Amikor program megtalálta a HL frontot, kilép, és azonnal elmentődik a számlálóból kiolvasott figyelési ciklusok száma. Így könnyen elértem a μ s-os τ_{PC} -t. Először a már kapható kvarcórák századmásodperces stoppere segítségével kalibráltunk, de hamarosan kiderült, hogy az egykori atlétikai bírói tapasztalatom ellenére sem ad ± 30 ms-nál jobb pontosságot. Ezért egy komplex időközöket szolgáltató kvarcetalont építettem, amely a szabadesés három fényosrompójának sorrendi jeleit adta a három BNC csatlakozóban.

A kvarcetalon segítségével még 2006-ban megmértem ezt az időegységet (8. ábra), vagyis megszámláltam a sorrendi jelek közötti figyelési ciklusok számát. Az akkori lehetőségekhez képest a 953 ns rendkívülien kicsinek tűnt. A μ s nagyságrendű és kvarceredetű időmérőforrással már komolyabb mérésekbe is foghattam. Ez a figyelési ciklus manapság, a Sunix 4018T printerport esetében 552 ns-ra csökkent.

⁴ CMOS: Complementary Metal-Oxide Semiconductor, integráltáramkör-építési technológia. CMOS óra: Saját, 32768 Hz-es ($2^{15} = 32768$) kvarcoszcillátora van, a 15 bináris osztóval ebből állítja elő az 1 Hz-et, majd a teljes naptárt is. Mindent BCD-ben tárol, az ezredvégi hisztériával ellentétben még az évszázadot, sőt az évezredet is tárolta-tárolja, csak egy pár byte-tal arrébb. A régebbi gépek CMOS órája igen pontos volt, a maiaknál erre már nincs feltétlen szükség, úgyis mindent az internetszolgáltató órájához, esetleg az Atomórához igazítunk.



8. ábra. A komplex időközöket szolgáltató kvarcetalon ellenőrzése.

A mikroprocesszor órajelén alapuló időközmérő elve

Fontossága miatt ezt külön tárgyalom. Csak a cikk címe kedvéért adtam ezt a nevet, mert egyáltalán nem időközmérőről van szó, hanem egy nagyon gyorsan járó, valóságos óráról, amely a toronyórához hasonlóan mindig leolvasható (9. ábra). Nincs kapujel, nincs kimaradás, nem számlálom az eltelt kettyenéseket, kérésre mindezt készen kapjuk a processzortól. Ez a TSC (Time Stamp Counter) szolgáltatás, időbélyegnek is nevezhetjük. Szerepe nagyon egyszerű, a benne tárolt időpontok alapján léptetődik a processzor, vagyis egy olyan időpontjelző órához jutottunk, amely a processzortól független, külső eszköz, egy 64 bites, bináris számláló, amely másodpercenként több milliárd (nem millió!) léptetést kap. A számlálókat építők rémálma a telítődés, a „mindent kezdünk újból”. Ezen óra telítődése elvileg csak évszázadok múlva jöhet létre (a 3520 MHz-es gépemnél, ez 166 év). A naptáros óráktól eltérően, a gép újraindításakor kinullázódik a 64 bites bináris számláló, és az újbóli bekapcsolástól eltelt időt méri. Ez a számláló gyakorlatilag sohasem telítődhet!

Időközmérésről volt szó, tehát egy megfigyelt esemény kezdetekor leolvassuk a StartTSC időpontot, majd minden esemény megjelenésekor az ActualTSC időpontot. A leolvasás és az adatkimentés együttesen 88 óra-



10. ábra. GPS-vezérelt időközetalon.

jelbe kerül, vagyis a leolvasás időigénye (ez 3520 MHz-nél körülbelül 25 ns) nem befolyásolja a dTSC-t (ami az ActualTSC és StartTSC különbsége), az eltelt időt. Ez igen egyszerűnek tűnik, de nagyon nem így van, „hibázhatunk” a kivonásnál (lásd a prezentációmát)!

GPS-vezérelt atomóra-kapcsolat

A mikroprocesszor órajelén alapuló időközmérőm a 3520 MHz-es gép esetén 284,091 ps-os felbontással mér, de a számítógép hőmérséklete befolyásolhatja az órajelét. A számítógép működése szempontjából ez egyáltalán nem gond, de az órajel néhány ppm-es változása nagyban csökkenti a mérések pontosságát. A 10. ábrán látható GPSDO (GPS Disciplined Oscilla-

9. ábra. A mikroprocesszor órajelén alapuló időközmérő rutin legújabb változata.

Legújabb változat: 64 bites számláló és 284.091 ps-os felbontás

Az Atomórához kalibrált órajelét időbélyegként használjuk; a rendszer ppb szintű pontosságot és stabilitást biztosít

1. @SetCounter: → **Címke:** a frontszámláló beállítása. Az első HL frontot már detektáltuk, és MaxDW számú HL frontra várunk. A Start HL front nulla indexű lesz.
2. mov cx, word ptr [MaxDW]
3. @Get&SaveStartTSC: → **Címke:** Leolvassuk a PC Time Stamp Counter (TSC) időbélyegét, ez valójában a PC órajele. A 64 bites StartTSC időpontértéket tároljuk az erre előkészített QWord-ös tárolóban, majd a byte-os es:[di] pointer által mutatott cél helyértékét 8-cal növeljük.
4. db 0Fh, 031h
5. db 66h; mov es:[di+0], ax
6. db 66h; mov es:[di+4], dx
7. add di, 8
8. mov dx, word ptr [MPort]
9. @MeasurementHL: → **Címke:** a cx-ben tárolt MaxDW számú HL frontot figyeli loop ciklusban. A Mask tartalmazza a megfigyelendő bitet, a dx a jelet adó portot.
10. mov ah, byte ptr [Mask]
11. @WhileALEqualLow: → **Címke:** addig vár, ameddig a jel magas szintűvé válik (LH front). Beolvassuk a dx port által címzett byte-ot (jel), és teszteljük a Mask által meghatározott bitet.
12. in al, dx
13. test al, ah
14. jz @WhileALEqualLow
15. @WhileALEqualHigh: → **Címke:** addig vár, ameddig a jel alacsony szintűvé válik (HL front). Beolvassuk a dx port által címzett byte-ot (jel), és teszteljük a Mask által meghatározott bitet. Ha továbbra is magas, akkor visszalép. A HL frontok közötti időt az ActualTSC időpontok különbségéből kapjuk meg.
16. in al, dx
17. test al, ah
18. jnz @WhileALEqualHigh
19. @Get&SaveActualTSC: → **Címke:** Leolvassuk a PC Time Stamp Counter (TSC) időbélyegét. A 64 bites ActualTSC időpontértéket tároljuk az erre előkészített QWord-ös tárolóban, majd 8-cal növeljük a byte-os es:[di] pointer által mutatott cél helyértékét.
20. db 0Fh, 031h
21. db 66h; mov es:[di+0], ax
22. db 66h; mov es:[di+4], dx
23. add di, 8
24. mov dx, word ptr [MPort]
25. @LoopHL: → **Címke:** Ameddig nem találjuk meg a MaxDW számú HL frontot, újrakezdjük a méréseket, egyúttal az ActualTSC időpontok leolvasását is.
26. loop @MeasurementHL
27. @Exit: → **Címke:** a MaxDW indexű HL front megtalálása után kilép!

βsoft

tor) időközetalonnak van saját, állandó hőmérsékleten tartott, 10 MHz-es, ± 10 ppb pontosságú kvarcoszcillátora, és leosztott frekvenciájú 1PPS (1 Pulse Per Second) TTL szabványú kimenete. A bemelegedés és az Atomórával való GPS-kapcsolat létrejötte után az 1PPS kimeneten $T = 1,000\,000\,000\,0$ s periódusú etalonjelet kapunk, amelynek stabilitása ± 10 ps. Az így kialakult új mérőrendszerben a mérés előtt és után is ezzel a jellel kalibrálom a PC órajelét. Egy régóta bekapcsolt, zárt dobozban levő számítógép órajelkvarcának a hőmérséklete a néhány másodperces mérés alatt alig változik. A fonálingás kísérletnél ezt sok méréssel igazoltam, a „tanúm” az 1PPS volt.

A számítógépes időköz mérés előnyei

A virtuális kapujel nem egy elektronikus engedélyező jel, hanem a TTL jel két HL frontja közötti belső ciklusszámlálás kezdetének, végének és a következő mérés megkezdésének szoftveres feltétele. Három előny: a kapujel folytonossága; az, hogy a számlálás magától történik, alig költünk rá gépidőt; a legfontosabb, hogy nem történhet jelvesztés, mert a port állandóan figyel a mérendő jelet. A negyedik, a fenti három előny fölötti kategóriába tartozik, ugyanis a ciklusok számának átadása csak néhány ns-ig tart, ráadásul a mért érték a számítógépben keletkezik és a további felhasználásra is ott marad. A prezentációmban két Assembly rutin elemzése közben bemutatom a 32 bites számlálók használatának két módját is. A 32 bites számlálókkal μ s-osnál is jobb felbontásban félórányi időközöket is mérhetünk. Nekem ez se volt elég, nem találtam elég finomnak a μ s-os felbontást! A nagyságrendekkel jobb, néhány tized ns-os felbontást a mikroprocesszor léptetését biztosító órajel elérése hozta.

Rendszerkövetelmények

• *Operációs rendszer.* A mérési elvből kiindulva könnyen meghatározhatjuk a rendszerkövetelményeket. Az elv minden esetben saját számlálót feltételez, vagyis mérés közben a PC-nek nem adhatunk más munkát, különben hibázna. Műszaki kifejezéssel szólva, le kell tiltanunk a megszakításokat, a mérés néhány tizedmásodperce alatt (szabadesés) a gép csak a méréssel kapcsolatos dolgokkal foglalkozhat. Ezt csak a DOS (Disk Operating System) operációs rendszer engedélyezi. Ha nem tiltjuk le a megszakításokat, a mérés igencsak pontatlan lesz. Ezt a prezentációmban egy könnyen érthető grafikonpárral szemléletesen bizonyítottam. Itt csak annyit, hogy a két kétórás mérési kísérlet pontossága a DOS-os gép esetében 11-szer jobb a Linuxosénál, ahol nem lehet letiltani a megszakításokat. A DOS-ban igen gyengék a grafikus lehetőségek, ezt megoldottam a saját szabványú VESA kompatibilis grafikusrendszer létrehozásával. Ezekről és sok másról bővebben szólok a prezentációmban.

• *Processzor.* Szintén a mérési elvből indulunk ki. Legfontosabb az órajel nagysága. Egy 3 GHz-es processzorral már igen jól lehet mérni. A szuperpontossághoz szükséges az Atomóra-kapcsolat⁵ alapján létrejött kalibrálás.

• *Mérőport.* A hozzáférési idő minél kisebb legyen, ezt átviteli sebességként határozzák meg. A leggyorsabbak átviteli sebessége 2,7 MBps körül van. Az alaplap portok általában igen lassúak.

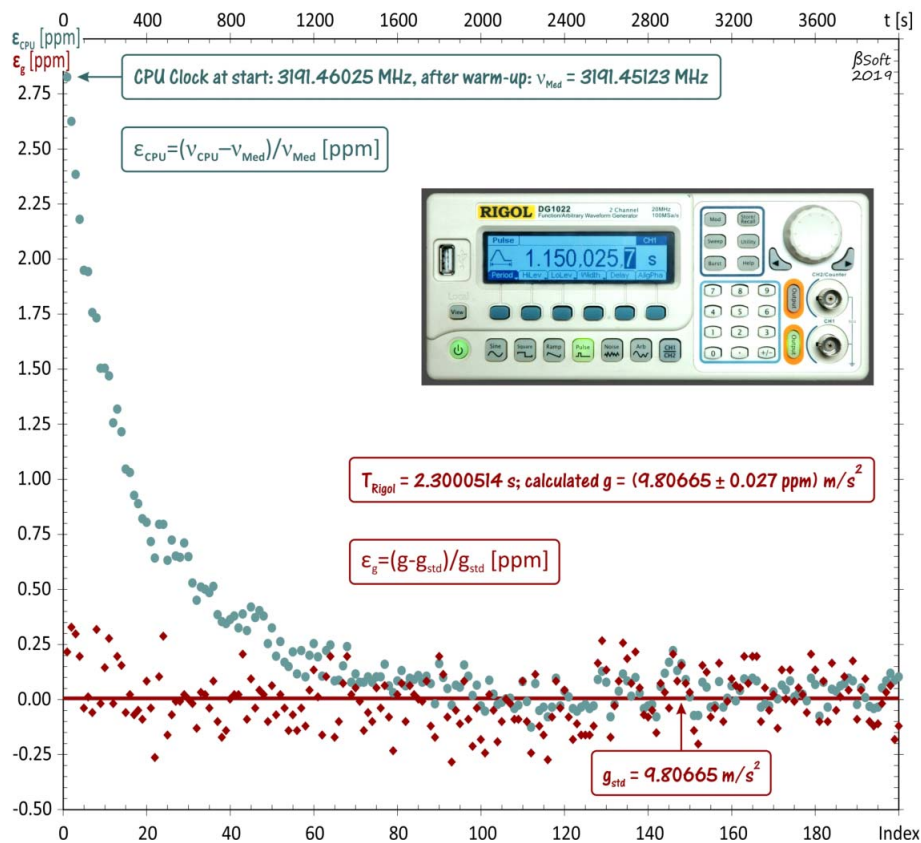
• *Monitor.* Ma már nem gond, de 2005-ben az ilyen irányú fejlesztéseim kezdetén kevés VESA monitor ismerte az 1280×1024-es módot, ezért a VESA unitomat 320×200, 640×480, 800×600, 1024×768 formátumra is megírtam, illetve paramétereztem. A mai monitorok ismerik ezeket a módokat, de a felbontástól függetlenül olyat kell választani, amelyik a ma elterjedt 16:9 mód mellett ismeri az 5:4 módot is.

Egy érdekes mérési eredmény

Az Atomórához igazított 1PPS etalonjel birtokában számtalan mérési kísérletet végeztem, élveztem az újdonsült pontosságot. A most bemutatandó kísérletben felrúgtam a méréstechnika legegyszerűbb alapszabályait, és egy bemelegedés alatt álló számítógéppel mértem meg a gép melegező processzorának pillanatnyi órajel-frekvenciáját, majd ezzel az órajellel (3200 MHz) mértem meg az ingajelet szimuláló, egész éjjel bekapcsolva hagyott, professzionális függvénygenerátorom által szolgáltatott „ingajelek” időközzeit. Minden úgy folyt le, mint a valós ingamérésben, csak az inga lengésekor keletkezett fényesorompójeleket a nyolcdigites, precíziós függvénygenerátorral állítottam elő. Úgy választottam meg a Fizikum ingájának a periódusát (2,3000514 s) és az inga hosszát, hogy éppen a standard nehézségi gyorsulás ($9,80665$ m/s²) értékét „mérje”. A periódus „páros” kell, hogy legyen, különben nem lehet beállítani a félperiódust. Mivel az inga egy teljes periódus alatt kétszer metszi a fényesorompót, ezért a félperiódus-időkből (1,1500257 s) építettem fel a standard g-t mérő inga fonalhossza periódusának megfelelő „mérési” összeállítást. Az előre beállítható öt teljes periódus (tizenegy takarás) indítása előtt és után lekértem a TSC időpontokat, majd az ismert ingahossz alapján, a matematikai inga képletével kiszámoltam a g értékét. A valós fonálinga csak abban különbözne ettől, hogy a fonálinga tehetetlenségi nyomatékával, és a szögamplitúdóval is számolnom kellene. A számítógép órajelkvarcának a szükséges, legalább $\pm 0,01$ °C pontosságú hőmérséklet-stabilizálása helyett, minden mérés előtt és után az Atomórához szinkronizált GPSDO 1PPS jelével megmértem a processzor órajelének frekvenciáját, majd e két frekvencia átlagát vettem. Még rátettem egy lapáttal, ugyanis közvetlenül a bekapcsolás után, mintegy órán át mértem a bemelegedő számítógép órajelét, és a megmért órajellel az inga lengéseit szimuláló „ingajeleket”.

⁵ *Sükösd Csaba* (BME) ötlete.

TSC alapú, a PC bemelegedése alatti szimulált g mérés - ingajel: Rigol DG1022



11. ábra. A melegedés dacára a PC a hosszú idő alatt ± 27 ppb pontossággal mérte az „ingajelel” szimuláló Rigol DG1022 függvénygenerátor által biztosított TTL jeleket.

Az eredmény magáért beszél (11. ábra): a bemelegedés alatt álló mérőrendszeremre nem hatott a melegedés miatti órajelváltozás (a frekvencia mintegy 3 ppm-et csökkent), ezért továbbra is ugyanazzal a pontossággal ($\pm 0,027$ ppm) határozta meg a virtuális inga periódusát. A valóságban a szimuláció helyett az inga valódi jelei adják majd a periódusokat, tehát a mérés pontossága csak a megépített mérőrendszer mechanikai elemeitől függ (tehetetlenségi nyomaték). Ez a kísérlet – még változó körülmények között is – egyértelműen bizonyítja mérőrendszerem pontosságát. A prezentációmban a kísérlettel kapcsolatban további részletek is találhatók.

Összefoglaló

Az időköz-méréssel kapcsolatos, mintegy három évtizedes fejlesztéseimből a mérési elveket és néhány megvalósítást villantottam fel. Talán az egyetlen itt bemutatott mérési eredmény is elég ahhoz, hogy értékelni lehessen az újfajta mérés pontosságát. A rendszer alapértelmezésben egyszerre öt (vagy nyolc) biten mérhet, ez lehetővé tette az Atomóra-kapcsolat mérés előtti és mérés utáni, esetleg a mérés alatti szimultán alkalmazását a kalibrálásra. Itt csak a mérés előtti és utáni kalibrálást láttuk, de ez is két nagyságrenddel növelte a pontosságot. Sajnos, az egy bites USB-s rend-

szerek nem teszik lehetővé a kalibrálást-mérést, ez egy biten lehetetlen. Lehet ugyan egyszerre két adatgyűjtőt használni, de a két különélő kvarcoszcillátor „egybekalibrálásának” nincs értelme.

Az évek során nem mindig volt ilyen sikeres az ingakíséreltem. A printerport belső ciklusának használata után még a lassúbb gépeknél is a néhány periódusra tízmilliós ciklusszámot kaptam, vagyis a felbontás igen jó volt, a sok stopperórás kalibrálás se volt nagyon rossz, mégse jött ki a g helyi értéke. *Mi nem ismerjük a g értékét, mi szeretnénk meghatározni* szövegem mármár a Fizikum ingás kísérleteinek mottójává vált. Mint mindig, most is a véletlen oldotta meg a problémát. A mérőprogramot úgy írtam meg, hogy a mérés elején hagyjon ki néhány fénysorompó-takarást, így ellenőriztem a kúp-inga elkerülhetőségét. Megadtam a két számot 3 és 11, azaz 3 kihagyott takarás és 5 periódus. Egyszer fordítva írtam be,

ekkor a g értéke nagyot nőtt! Kiderült, hogy az elektromágnesz remanenciája egy ideig még fékezi a visszatérő golyót. A csökkenő amplitúdó miatt gyengült a visszatartó erő is. Az új, ferromágneses anyagok nélküli elektromágnesemmel ezután tökéletesen mért! A csak kvarcetalonhoz kalibrált rendszerrel $g_{\text{Fizikum}} = 9,805 \pm 0,0032$ m/s²-et mértem, addig 9,78-at! A Fizikumra (47°03'29,17"N; 21°55'56,26"E; h = 135 m) kiszámított érték: $g = 9,8076451$ m/s² (H. Moritz: *Geodetic Reference System* – 1980, forrás: ftp://athena.fsv.cvut.cz/ZFG/grs80-Moritz.pdf).

Mérőrendszerem minden elemét magam terveztem és hoztam létre az elképzeléstől a bedobozolásig. A kapcsolási rajzaim az „okos-füzetemben” vannak, ha valami érdekel, azokat ritkán nézem meg, inkább a mellettük levő elvi leírást tanulmányozom át. Talán meglepő, hogy nem mutattam be kapcsolási rajzokat, nem csatoltam programokat, úgy lett volna teljes ez a kis leírás. Szerintem csakis az elv átadása a fontos, annak ismerete nélkül nem lehet sikeresen összeszerelni egy komplexebb kapcsolást, vagy megszerkeszteni egy jól működő mérőprogramot. Szinte szó sem esett az A/D konverterek, fénysorompók belső világáról, pedig ezek talán a legfontosabbak a pontos méréshez. Úgy érzetem, hogy mélyebb elektronikai ismereteket igényelnek, ezek nem férnének be a *Fizikai Szemle* profiljába, ezért bárkinek szívesen segítek, ha megépítené az itt vagy a prezentációmban megemlített mérőeszközöket.