

Az elektronika és finommechanika kölcsönhatásai

DR. PETRIK OLIVÉR

BME Finommechanika Optika Tanszék



DR. PETRIK OLIVÉR

egyetemi tanár a Budapesti Műszaki Egyetem Gépész-mérnöki Karán nyert oklevelet 1951-ben a gépgyártás-technológia szakon. Finommechanikai és műszertechnikai gyakorlatát a KFKI-ban szerezte meg, ahol nukleáris műszereket tervezett. 1957-

től tanít a BME Finommechanikai Optikai Tanszékén, amelynek 1967-től vezetője. 1961-től a műszaki tudomány kandidátusa (dolgozatának témája a mechanikus ütközés jelensége volt). Jelenlegi kutatási területe az összetett (mechatronikai) műszer- és eszközrendszerek, valamint a megbízhatósági problémák.

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk először röviden áttekinti a finommechanika és az elektronika fejlődését. Ezt követően a két látszólag különböző fizikai alapokon nyugvó terület egymásra hatását vizsgálja. Kiemelten foglalkozik a kisméretűséggel, a mikromozgatások megoldásával, végül a finommechanikának mikroelektronikai elemek (áramkörök) gyártásában betöltött jelentős szerepével.

Bevezetés

A finommechanika évszázados múltra tekinthet vissza. Történetének kezdetén a nagyszabatosságú, különleges képességeket igénylő, szinte virtuóz jellegű, kézműves tevékenységhez kötődött. A hajózási tájékozódáshoz — a nyílt tengeren — nagy szükség volt kronométerre, és helymeghatározó műszerre (szextáns). Ez volt az elsők között jelentkező olyan reális igény, amely korán létrehozta ezt a szakmát. Később más hatások (közlekedés, hadiipari tömeggyártás stb.) következtében a manufaktúrából iparrá vált és, mint a többi szaktudomány esetében is történni szokott, az elméleti megokolás a gyakorlati eredményeket magyarázta, azokat követte, majd elébük vágott.

Az elektronika a finommechanikánál később jelent meg. Előfutára az elektrotechnika (elektromechanika) volt, amely szintén az iparosodás magymérvű elterjedése révén lendült fejlődésnek. Ennél is rohamosabban fejlődött ki maga az elektronika, amely az elektromosvezetés kezdeti fázisán túljutva, olyan lendületes kibontakozást produkált, amelyre előtte nem volt példa. A generációváltások annyira felgyorsultak, hogy ma már szinte 5—8 éven belül egy-egy újabbnak a megjelenése várható. A jelzett folyamatok között lényegi összefüggések vannak, ezekre hívjuk fel a figyelmet az alábbiakban.

Történeti előzmények

A finommechanika mint szakma a fent körülírt kézműveskorszaka óta több jelentős változáson ment át. Korai fejlődési szakaszában a *dekoratív* munka jelentette feladatának nagy részét. Gondoljunk a régi „műves” zsebórákra, zenélődobozokra stb. Ezt követően a *kutatás* eszközeire irányult a megrendelők igénye. Neves kutatók mellett kialakuló színvonalas műhelyekből nem egyszer világhírű cégek fejlődtek ki.

Ebbe a kategóriába említhetjük pl. dr. Abbé professzor és Kari Zeiss együttműködését, de nem kell példáért a szomszédba mennünk: a Kolozsvári Egyetem finommechanikusa a Kesselből áttelepedett Süss Nándor későbbi budapesti (a Csörsz utcában működő) műhelyéből fejlődött ki a MOM.

A fent leírt időszak a múlt század második fele, az iparosodás erősödése változatos igényekkel lépett fel. A megkezdődő tömeggyártás mérőeszközöket és műszereket kívánt, a közlekedés új gépei szintén sokoldalú követelményeket támasztottak. Különösen az alkatrészek *csereszabátossága* okozott és okoz még ma is sok fejtörést. Az első és második világháborút megelőző időszakokban a hadiipari gyártás különösen aláhúzta ezt a követelményt.

Szólni kell a századfordulótól rohamosan fejlődni kezdő *villamosítási* és *híradástechnikai* törekvésekről. Ezekben az iparágakban sok finommechanikai, gyakran gépészeti jellegű berendezést is használtak, és használnak ma is (kapcsolók, biztosítóberendezések, érintkezők, mozgóelemek stb.). Ha a század első évtizedeire (bátran mondhatjuk, hogy első felére) jellemző *elektroncsövekre* gondolunk, azok előállítására tömeggyártási méretekben alkalmazott finommechanikai technológia nélkül nem lett volna elképzelhető. Ugyanez elmondható az elemgyártásról is (ellenállás, kondenzátor, tekercsek stb.). A kapcsolat és összefonódás még szorosabbá vált a *félvezetők* megjelenésével. Ezzel már a jelenhez érkezünk, s erről az alábbiakban majd részletesen szólunk. Előtte azonban néhány fogalom tisztázását érdemes elvégezni, nehogy ugyanazon elnevezés alatt ki-ki másra gondoljon.

Fogalommeghatározások

A finommechanika fogalmával foglalkozunk elsőként. Ez a legrégebbi és leggyakrabban használt kifejezés. Idegen nyelvű megfelelői: *Feinmechanik*, *точная механика*, *precision mechanics*. *Egységesen elfogadott meghatározás nincs*. Az 1960-as évek elején Kuhlenskamp professzor javaslatára [1] Braunschweigben egy

Beérkezett: 1986. VI. 5. (H)

konferencia tűzte napirendjére a meghatározást. Sok vita után azzal zárták a témát, hogy a klasszikus (kézműves alapon álló) finommechanikát túlhaladta az idő, a ma szükséges finomtechnikát (Feinsttechnik) pedig definíció helyett célszerűbb lényeges jellemzőivel körülhatárolni. Ezek pedig:

- elsődleges feladatuk a jel- (információ-) továbbítás;
- erőhatások, teljesítménytovábbítás másodlagos;
- kis méretek a jellemzők;
- a működési és mére szabotosság (precizitás nagymértékű);
- általában mechanikai struktúra.

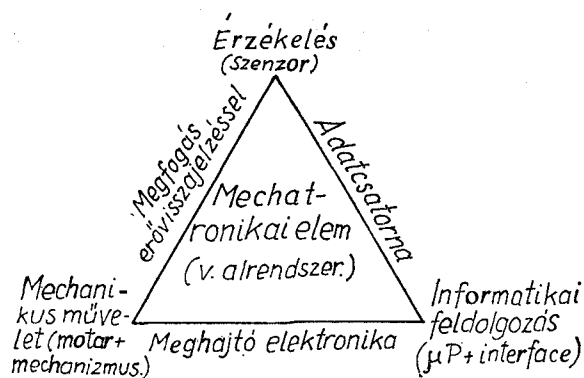
A felsorolt jellemzőket speciálisan kell értelmezni, mert pl. az első ismérv alapján a harang is a finommechanikához tartozik, hiszen jeleket továbbít!

A *jeltovábbítás*, mint fő funkció elsősorban a mérőműszerekre jellemző, de megjelenik még a szabályozást, vezérlést végző berendezésekben, az őrműszerekben és sok más helyen. A finommechanikában jelentős fejezetet alkotnak a jeltovábbításra alkalmas gyártmányok. Kevés kivétellel ráillik a finommechanikai gyártmányok többségére, hogy az energiatovábbítás elsődlegesen meghatározó szerepe ezekben megszűnik és helyébe a „jelfolyam” lép. A határfok mint paraméter ugyancsak másodlagossá válik, a relatív hiba a jel és a hibaérték (zaj, torzítás) hányadosának értéke, a jel/zaj viszony dönti el egy mérőrendszer használhatóságát.

A kis méretekre, a *miniatürizálódásra* való törekvés, különösen a finommechanika és a vele rokon műszer és híradástechnikai iparok területén ma az egyik legszembetűnőbb jelenség. A magyarázatát a kis méreteknek a berendezések fajlagos teljesítőképességére és egyéb jelentős paramétereire kedvező hatásában kell keresni.

A *precizitás* ugyancsak nehezen meghatározható jellemző. Nem elegendő a mérettűrések finomsági fokozataira gondolni, mert éppen a különlegesen kis méreteknel a relatív mérettűrés nagymértékben megnő anélkül, hogy a szerkezet működési szabotosságát ez a körülmény észrevehetően befolyásolná.

Szembetűnő a „szilárdsági” méretezés kisebb jelentőségűvé válása a finommechanikai gyártmányok ter-



H-160-2

2. ábra. A mechatronika funkciósmájája

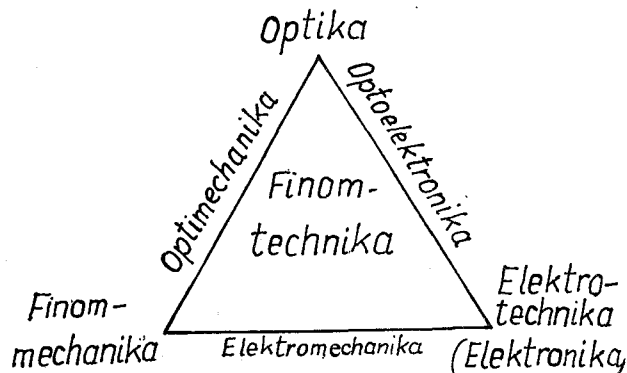
vezésében. A *működés közben* fellépő erőhatások, kevés kivételtől eltekintve olyan csekélyek, hogy az egyéb, mint pl. szállítási és gyárthatósági szempontból helyesen kialakított szerkezet a működés közbeni erőhatásokra nézve többszörösen túlméretezett. Az ún. másodlagos hatások (rázás, ütés, az esetleges hibás kezelésből származó erőltetések), rendszeren nagyságrendekkel nagyobb igénybevételt jelentenek a működés közbeninél.

A finomtechnika fogalmát fent már szóba hoztuk, de még nem határoztuk meg. Legszemléletesebben dr. Almássy György írta le, pontosabban rajzolta le a fogalom összetevőit az 1982-ben írt tanulmányában [2]. Az 1. ábrából látható, hogy a finomtechnika három fő szaktudományra támaszkodik (Finommechanika, Optika, Elektrotechnika (elektronika)), amelyek vegyesen egymásra hatva is jelentkezhetnek [4].

A finomtechnika-fogalom — sajnos — alig terjedt el. Érdekes módon annál jobb fogadtatásra talált a *mikrotechnika* elnevezés, amely olyan finommechanikai és elektromechanikus vagy elektronikus elemekből álló rendszerre vonatkozó fogalom, amelyben a mére szabotosság mikrométer nagyságrendű. Ennek fejlettebb formája a *nanotechnika*, amely különleges berendezéseket és környezetet igényel. Lényegében ez utóbbi két megnevezés a finomtechnika szinonimáját jelenti.

Az újabb műszaki irodalomban egyre jobban elterjed a: mechatronika kifejezés, amelynek meghatározása ugyancsak nem egységes. Többirányú törekvés testesül meg az ilyen típusú komplex berendezésekben. Egyik ilyen irányzat: mechanikai funkciókat kiváltani elektronikával. Ez a funkcióelem lehet pl. a programadás, időtervrögztetés stb. Másik az érzékelés, alakfelismerés, aktivizálás, amely ugyancsak az elektronikai részrendszer feladata. A megfogás, a mechanikai műveletek (helyváltoztatás, adagolás, erő kifejtés stb.) a mechanikai alrendszerre tartoznak, amelynek szorosan együtt kell működnie a vele komplex módon egybeépített elektronikával.

Összefoglalva: A mechatronika a mechanikai és elektronikus elemekből álló komplex együttműködéssel dolgozó rendszerekkel foglalkozó tudományág. A mechatronikai elem funkciósmájáját a 2. ábra mutatja. Szemmel látható az 1. ábrával való rokonság, amely nem véletlen, mert a korszerű mechatronikai



H-160-1

1. ábra. A finomtechnika és alkalmazási területei

berendezésben a finomtechnika valamennyi komponensét fellelhetjük.

Fogalmi áttekintésünket zárjuk le azzal, hogy elsődlegesen nem meghatározásokat kívántunk adni, inkább körülírni, több oldalról megközelíteni mai technikánk újabb témaköreit.

Nem szólnak a finomtechnika gyártmányait előállító technológiákról. A mikrométer körüli tűrések elkészítése különleges módszereket, eszközöket és műszerezést kíván. Ha a bűvös μm alá merészkedünk (ún. szubmikron-technológiák) teljesen új, ma még járatlan területre jutunk. Nem kerülhetjük el, hogy szembenézzünk ezekkel a kérdésekkel, mert az újfajta gyártmányok pl. nagy integráltságú áramkörök gyártóeszközeihez ilyen technológiák nélkül nem juthatunk el [5].

Az elektronika és finomtechnika egymásrahatása

Az előzőekben már röviden írtunk arról, hogy pl. az elektroncsövek gyártásához viszonylag fejlett finommechanikai felkészültség kellett. A 3. ábrán egymás mellé állítottuk az elektronikai elemek egymást követő fajtáit (generációit is mondhatnánk, de az ábrán itt nem ez volt az elsődleges). Jól látható, hogy a mind összetettebb, fejlettebb elemekhez mind nagyobb szabotosságú (precízitású) finomtechnika szükséges. Ez a fokozódó követelmény egyaránt vonatkozik az elemgyártó berendezés finommechanikai alrendszerére, mind a különféle pozicionálókra, manipulátorokra, segédszerkezetekre stb. Ugyanúgy jelentkezik ez a követelmény az új típusú elektronikus elemek precíziós csatlakozóinak és más mechanikai elemeinek esetében is. A 3. ábra görbéje láthatóan közel exponenciális jellegű, ami arra utal, hogy esetleg a későbbiekben „telítésbe” megy át, azaz elérkezhet olyan évszámhoz, amikor csak túl nagy fejlesztés hoz érzékelhető javulást. (A számítás csupán formális, de egyszerű exponenciális görbeillesztéssel kb. 97%-os korrelációs tényező mellett kimutatható, hogy 2000, ill. max. 2010

körül gyakorlatilag bekövetkezik a telítődés, amely egyszerűen azt jelenti, hogy merőben új utakat kell keresni az elemsűrűség további növelésére.) Ma még nem tartunk itt, a nanotechnika még ígéretes, de nem könnyű út a fejlesztésre. Mint arról olvashatunk a szakirodalomban, maga a természet ad követendő példákat. Az agy szinte végtelen számú neuronja nagyobb kapacitású, mint sokezer nagy számítógép operatív és háttér-memóriája együtt. Igaz, egészen más „szervezésű” és éppen ezért sokkal többre és másra is képes.

Visszatérve kiinduló gondolatunkhoz, az elektronika számos területen visszaszorította a mechanikát. Más téren viszont létezésének feltétele, hogy az eddiginél precízebb, pontosabb és megbízhatóbb mechanikai rendszerek álljanak elő a nagyteljesítményű elektronikus elemek gyártóberendezéseikhez.

A méretek csökkenésének iránya egyaránt jelentkezik mindkét szóban forgó területen. Az okok mások a finommechanikában és megint mások az elektronikában, de az eredmény hasonló.

Ragadjunk ki egy jellegzetes alkatrész méretet, amely a darabot számunkra képviselje, legyen az „ l ” (lineáris méret). Csökkentsük az alkatrész valamennyi méretét „ a ”-ad részére. A működés közben keletkező hőmennyiség elvezetésére akkor jobb a lehetőségek, ha a felület viszonylag nagy a térfogathoz képest.

$$\text{Az alkatrész felülete: } A = k \cdot l^2;$$

$$\text{míg térfogata: } V = K \cdot l^3;$$

ahol: k, K az alkatrész alakjától

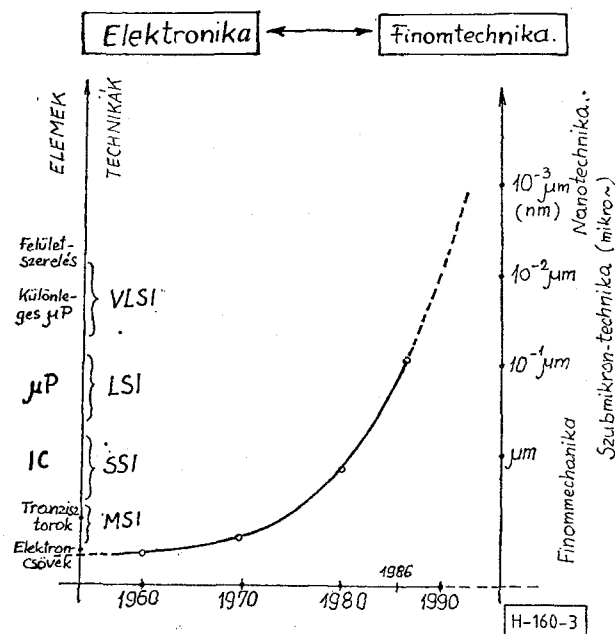
függő tényezők. Végül a felület—térfogat arány:

$$\frac{A}{V} = \frac{k \cdot l^2}{K \cdot l^3} = C \cdot \frac{1}{l};$$

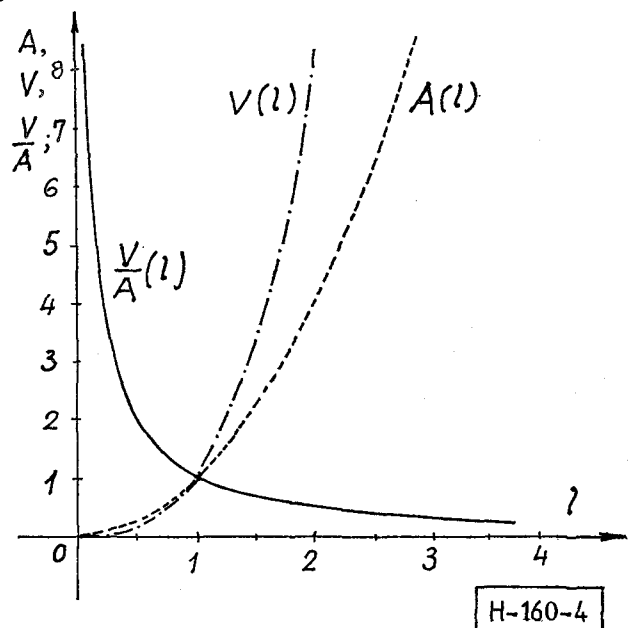
ahol

$$C = \frac{k}{K}$$

(alaktényező). Ez a szám a termikus terhelhetőségre jellemző.



3. ábra. Az elektronikai elemek típusai (generációi) és azok előállítását biztosító finommechanikai technikák



4. ábra. Alkatrészjellemzők kapcsolata egy jellegzetes hossz mérettel (l); $V(l)$ térfogat; $A(l)$ felszín;

$\frac{V}{A}(l)$ a termikus terhelhetőség jellemzője

Jól látható, hogy az említett felület—köbtartalom arány a jellegzetes méret csökkenésével rohamosan növekszik, egyértelműen megokolva a miniatürizálási tendenciát. (l. 4. ábrát)

A termikus hatás a finommechanikai elemekben is jelentkezik, noha nem annyira jellegzetes és meghatározó, mint az elektronikusok esetében. A finommechanikai alkatrészek — méreteikhez viszonyítva — nagyságrendekkel „erősebbek”, mint nagyméretű „rokonok”. A köbösen csökkenő térfogat ugyanilyen mértékben csökkenő tömegterhelést is jelent. Ezt a „vékonyodó” rugalmas elem „lágyulása”, — amely csupán lineáris — nem tudja elrontani. Ezért rezgőhatásra a finomszerkezet merevebb, „ellenállóbb”. Saját súlyát pedig két nagyságrenddel könnyebben „elviseli”, mint méretcsökkentés előtti állapotában. [6]

Összefoglalva: a *kis mérettartomány* mindkét elemtípusnak kedvező hatása. Ez az oka az egyre csökkenő méreteknek, a nagyfokú miniatürizálásnak. Az ilyen parányokat lassan már meglátni is csak mikroszkóppal lehet, kezelni pedig nagyszabotosságú finommechanika nélkül gyakorlatilag lehetetlen. Ez a körülmény is a két eszköztípus szoros egymásrataltságát példázza.

A finompozicionálás és mikromozgatás

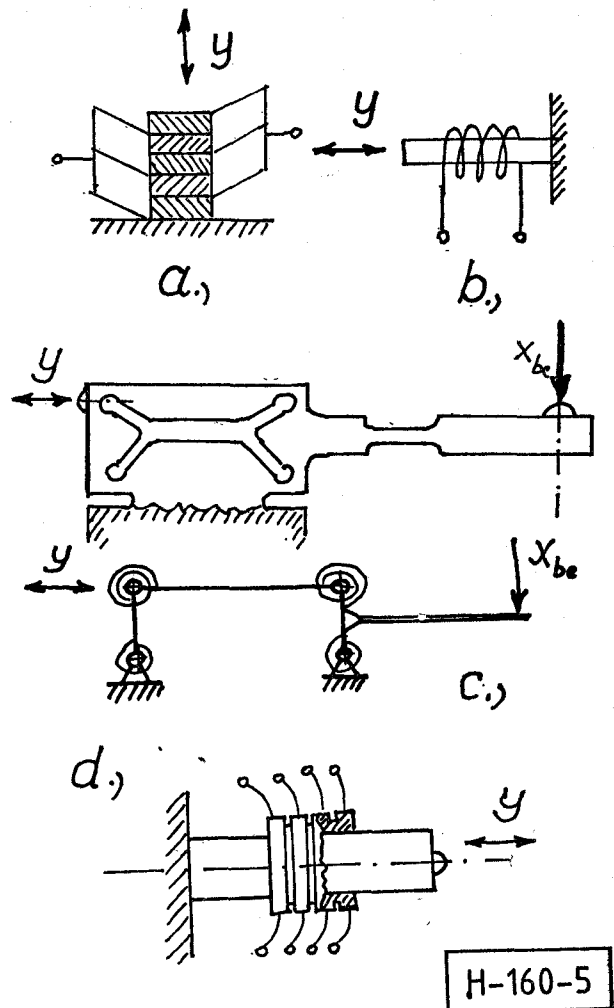
A címben szereplő két fogalom a végrehajtáskor nem különül el. Adott geometriai helyzetbe hozni bármilyen elemet (tárgyat) csak elmozdítással lehet. Az *elektronikai elemek gyártásában* szükséges műveletek közül sokat ma még kizárólag mechanikai úton tudnak elvégezni. Nagy elemsűrűségű IC-k trimmelését végző lézersugár eltérítő elemét finomelmozdítással kell működtetni. Ebből kiindulva elmondható, hogy a legújabb — elektronikai — technika elemeinek elkészítéséhez a korábbinál pontosabb és precízebb finommechanika kialakítása válik szükségessé.

A *mechanikai technológiák* ugyancsak igénylik a finommozgatást, különösen az olyan esetekben, amikor a távműködtetés elengedhetetlen. Az extrém nagy pontosságú esztergálási és marási műveleteket az ember közvetlen közletről nem irányíthatja, mert pl. a hőmérsékleti viszonyokat testének hőkisugárzásával károsan befolyásolja.

Magának a mikromozgatásnak a kivitele többféle elven történhet. A *közepes* finomságú (pl. jusztirozáshoz szükséges berendezésekben) elmozdításhoz finom fogazatú fogasléc és fogaskerék, precíziós ágyazással, finommenetes orsó és megvezetett anya használható. Kis mérettartományokhoz a közvetlen ékpálya vagy egyszerű karos mechanizmus is megfelel, elegendően finom kivitelben. A manapság alkalmazott legszabotatosabb orsós mozgatómű az ún. golyósorsó, amely számos CNC gépben (különösen megmunkálógépben) jól bevált szerkezeti elem.

A fenti megoldások, mind saját geometriai hibáik, mind a hozzájuk csatlakozó egyenesvezetékek hibái miatt korlátozott szabotosságra építhetők. A további javításra két út kínálkozik.

a) gondos mérésekkel egyedileg bemérni a mozgási pontatlanságokat és a mechanikához csatlakozó μP -ra bízni a korrekciót.



5. ábra. Mikromozgatások néhány kivitele. a) piezokerámia oszlop, b) magnetostríciós rúd, c) deformációs mozgát-
 alakító (kivitel és modell), d) vegyes megoldás: piezogyűrűk és
 rugalmasan deformálódó rúd együttese

b) az alap mechanizmust durva beállításra tervezni, mind hardware, mind software vonatkozásban. A vele mechanikusan sorbakapcsolt finommozgató pedig a végleges helyzetbehözést hivatott elvégezni. Ez utóbbi megoldás drágább, már csak kétlépcsős kivitele miatt is, de megbízható működés érhető el vele.

Az 5. ábra néhány megoldásvázlatot mutat a finommozgató „végfokozatára” vonatkozólag. A legegyszerűbb egy *piezo-kerámia-oszlop* (a). A szükséges elmozdításnak megfelelően vagy közvetlenül alkalmazzuk, vagy áttétel közbeiktatásával még tovább „lassítjuk” a mozgást. Mind közvetlen, mind áttételes változatánál célszerű kismértékű előfeszítést is alkalmazni, amely határozottabbá teszi a mozgást. Piezomozgatású egységgel könnyen megoldható 15–20 μm -es tartomány átfogása kb. 0,1 μm -es feloldással. Két hátrányos tulajdonságát is meg kell említeni. Az egyik az, hogy működtetéséhez kilovolt nagyságú feszültség szükséges, amely a különleges tápegységigényen kívül azzal is jár, hogy megfelelő érintésvédelemről is gondoskodni kell. Másik említésre méltó hátrány, hogy nagy belső súrlódása miatt számításba veendő *hiszterézist* mutat. Külö-

nősen a nagyszabotosságú helyzetbeállítások esetén számításba kell venni, hogy mindig *egy irányból* kell a kívánt pozíciót megközelíteni, mert irányváltáskor ingadozó mértékű üresjárat iktatódik be a folyamatba.

A piezo-hatáshoz hasonló fizikai természetű a *magnetostríkcio* jelensége. Mindkettő kristályos (általában polikristályos) anyagok erőter hatására bekövetkező rácsorzulása. Míg a piezo-hatás megfordítható (erőhatásra villamos töltés jön létre, villamos tér hatására elmozdulás), addig a magnetostríkcio jelenséget mutató anyagok — fémötvözetek — mágnesez tér hatására rácsorzulást mutatnak fel, amely hossz-mértékük megváltozásával jár együtt. Finomhajtómű végfokozatként való alkalmazását az gátolja, hogy viszonylag nagy mágnesez térrel kismértékű elmozdulást lehet produkálni, amely körülmény a nagy tekercsméretetek miatt alkalmazását nehezékké teszi. (5.b.)

A leggyakoribb megoldás a különféle *rugalmas alakváltozást* végző szerkezetek beépítése. A kiinduló elmozdulást rendszerint egyszerű menetes orsós (ritkábban golyós orsós) vagy differenciálmenetes mechanizmussal állítják elő. Rugalmas alakváltozású szerkezet ezt „osztja le” a megfelelő mértékűre. Ilyen változatot mutat az 5.c. ábra, amelyen bemutatjuk — számításokra is alkalmas — rugalmas csuklós modelljét is. A bemeneti mozgást előállító mechanizmusnak önzárónak célszerű lenni, amely viszont bizonyos mértékű belső súrlódás megjelenésével jár együtt. A bemutatott kivétel egyik előnye, hogy nagy módosítást lehet vele egy lépcsőben elérni (max. 1/25—1/30), sőt az „*l*” méretváltoztatásával a módosítás beállítható. A felsorolt előnyök mellé még az is járul, hogy a bemutatott változat viszonylag egyszerűen kivitelezhető.

Jó dinamikai jellemzőket lehet elérni egy „vegyes” deformációs-piezohatást felhasználó változattal. (5.d. ábra.) Egy acélrúdra átfedéssel felhúzott piezo-gyűrűk (egy piezo-hüvelyből beszúrásokkal gyűrűzött) külön-külön, egyszerre és meghatározott csoportonként aktiválhatók egy arra tervezett elektronikus vezérlő áramkörrel. Ez a mozgató egység nagy erőhatásokat képes kifejteni gyors, néhány mikrométeres elmozdulások megvalósítása közben. A mozgató mőholdakon felszerelt nagytérű rugalmas tükörlapok görbületi sugarának a megváltoztatására is felhasználják. Az ábrán vázlatosan feltüntetett szerkezet tényleges átmérője 25 mm körül volt, a rúd hossza kb. 60 mm, a piezo-hüvely kb. a hosszmet felét borította be szimmetrikusan felhelyezve. [3]

Csatlakozók, szerelvények, segédberendezések

Jelentős szerep jut a finommechanikának az elektronikus elemek érintkezőinek, csatlakozóinak és különféle

mechanikus szerelvényeinek létrehozásában, biztosításában. Az elektronikus berendezések tervezői a megmondható, hogy mennyi gondot és problémát jelent az egyébként mellékesnek tűnő érintkező, dugaszoló egység, kapcsoló, forgatógomb és mechanizmus (durva és finom mozgítás). Csupán egy adat a fentiek alátámasztására: importált elektronikus elemek és berendezések teljes volumenének több mint 60%-át teszik ki a *nem*-elektronikus jellegű elemek, azaz a finommechanikai úton elkészíthető járulékos alkatrészek.

Külön említést érdemelnek a *mikrohullámú technika* elemei, amelyek legalább annyira finommechanikaiak, mint villamos természetűek. Egy tápvonal, egy csatlakozó, egy beállítható rezonátor stb. külön-külön egy-egy finommechanikai remekmű, mind méretszabotosságát, mind felületi finomságát tekintve.

A korszerű híradástechnika vezetékeire az *üvegszál*-kábelekre gondolva ugyancsak szembeűnő a két terület szoros együttesének jelenléte. Egy gradiensszáלבól álló kábel csatlakozója a finommechanika csúcsterméke. A kábelvég lemunkálása — a kedvező optikai csatolás biztosítására — pedig ez optikai üveg-megmunkálás szabotosságát közelíti.

Összegezés

A finommechanika a rohamosan fejlődő mikroelektronika korában sem veszített jelentőségéből. Fontossága az elektronikával való összeforrottsága, a vele szemben támasztott követelmények növekedtek. A hagyományos finommechanikai termékek egy részét gyakran elektronikai megoldásokkal váltják fel, amelyek lényegesen több szolgáltatásra képesek. Az elektronikus elemek előállítása és gyakran működésük biztosítása azonban csak még igényesebb finommechanikai szerkezetekkel lehetséges. A finommechanika így változatlanul ma is az ipari és áttételesen a tudományos fejlődés motorja.

IRODALOM

- [1] *Kuhlenkamp*: Feinwerktechnik 65., 1961. p. 15—21
- [2] *Almássy Gy. Dr.*: Finommechanika és elektronika kapcsolata. Belső anyag 1982. (Ennek sajtó alá rendezett változata: Magyar Elektronika 2. sz.)
- [3] *C. L. Fiandra*: Peristaltic action microinch actuator. NASA Report 1970. p. 9—24.
- [4] *C. Brader*: Wandel in der Lehre der Feinwerktechnik VDE-Fachberichte 30. VDE Kongress '78 p. 19—29
- [5] *S. M. Payne*: Manufacturing requirements printed circuit board design The Marconi Rev. Vol. XLV. N 225. 1982. p. 65—83.
- [6] *Petrik O.*: Finommechanika. Tervezés-Szerkesztés. Műszaki Könyvkiadó Bp. 1974. p. 13—24.