

Sok minden a TTP-ről, Touch-Trigger Probe Piezo+

All about TTP, Touch-Trigger Probe Piezo+

Pálincás Tibor gépészmérnök
Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország
tpalincas@radiovilag.hu

Összefoglalás — A koordináta-mérőgépekhez kifejlesztett érintkezős finomtapintó, a Touch Trigger Probe (a továbbiakban: TTP), sir David Roberts McMurtry ír mérnök hatalmas karriert befutott találmánya, ma már nem csak a gépesített ipari méretellenőrzés és modern CNC gépek szerszámbeállításának nélkülözhetetlen segédeszköze, hanem az amatőr CNC-gép építők körében is népszerű. Mi sem bizonyítja ezt jobban, mint az a számos szájta, amelyben egy-egy házilag kivitelezett, különböző színvonalú konstrukciót – a fából összetakolttól a félprofi kivitelűig – mutat be az alkotója. A következőkben ennek a tapintófejnek a problémáiról, a problémák néhány gyári megoldási módját ismertetjük, majd egy házilag megvalósított továbbfejlesztéséről esik szó. Jelen cikkünk eredetije a Rádiótechnika Évkönyvének 2017-es kiadásában jelent meg, ahol részletesebb építési útmutatók is szerepelnek.

Kulcsszavak: tapintófej, koordináta méréstechnika

Abstract — The Touch Trigger Probe (TTP) developed for coordinate measuring machines, a career-making invention by Irish engineer Sir David Roberts McMurtry is now an indispensable tool not only for industrial automated dimensional inspection and tool setting on modern CNC machines, but also for amateur CNC machine builders. Nothing proves this better than the many sites in which its creator presents a home-made construction of varying quality, from the wooden to the semi-professional. In the following, the problems of this probing head are described, some factory solutions to the problems are described, and then a home-made improvement is discussed. The original of this article was published in the 2017 edition of the Rádiótechnika Évkönyve, where more detailed construction instructions are included.

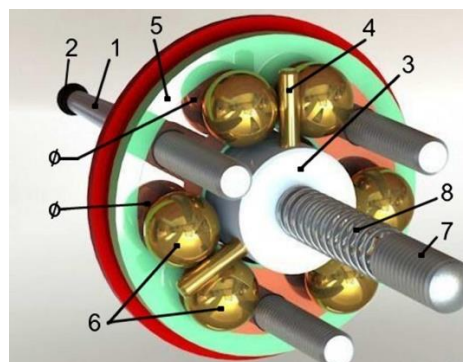
Keywords: touching probe, coordinate measurement

1 BEVEZETÉS, A HAGYOMÁNYOS TTP-ELV

McMurtry (1. ábra) eredeti szabadalmának egy egyedi megvalósítást bemutató szép grafikai illusztrációjának (2. ábra) eredetije az [1] honlapról származik. Mivel lehet, hogy nem mindenkinek ismerős, röviden bemutatjuk ezt a zseniálisan egyszerű tapintórendszert.



1. ábra: Sir David Roberts McMurtry



2. ábra: Szabadalom vázlatja

A konkrét feladat: a mérőgép (más esetekben CNC szerszámgép) szánjainak pozícióját abban a pillanatban kell beolvasni, amikor az 1 mérőszár végén levő, nagy alakhűségű 2 műrubin vagy kerámia tapintógömb megérinti a munkadarab (szerszám) kiszemelt pontját. Ehhez a tapintófejnek státuszjel kell adnia a három (X, Y, Z) digitális mérőlécezt leolvasó elektronikus egység számára, hogy mentse el a pillanatnyi koordinátaértékeket. Ezt a státuszjelet egy nyugalmi állapotban zárt áramkör megszakítása jelenti. A tapintószár a 3 fémtömbbe ágyazott szigetelt hüvelyben van (általában) cserélhetően rögzítve. A tömbbe sugárirányban, 120°-os szögosztással 3 db kemény felületű 4 wolfrámgörgőt ragasztottak, melyek közül legalább egy a tömbtől el van szigetelve (l.: 6.1. pont). Az ábráról hiányzó tapintóház belsejében, ahhoz szilárdan rögzítve foglal helyet az 5 szigetelőgyűrű, amelybe szintén 120°-os osztással 6 nagy tisztaságú wolfrám golyópárokat ágyaztak. Mind a görgők, mind a golyók nagy geometriai pontossággal készültek. A 3-4 szerelvényt a 7 állítócsavarral beállítható nyomóerejű 8 rugó szorítja a golyók közé úgy, hogy a görgők összesen hat pontban érintkeznek azokkal. Ez hat villamos kontaktuspárt jelent, miközben a tömb – ezzel a tapintógömb – térbeli helyzete rendkívül szabatosan, nagy visszaállási pontossággal definiált (a hat igen korrekt

felfekvésű pont a tapintógömb mind a hat szabadságfokát elveszi). A golyók kis vezetékdarabokkal össze vannak kötve úgy, hogy a golyópárokat rövidre záró görgőkkel együtt egy hat bontókontaktusból álló soros hálózatot alkossanak. Amennyiben a tapintógömböt bármely irányból, a tengelyirányú húzást kivéve, akár csak 1 μ -nél kisebb mértékben is elmozdítjuk, valamelyik görgő kiemelkedik a golyók közül, és az áramkör megszakad. Villamos szempontból tehát egy nyugvóáramú kapcsolóról van szó, ami az érintés pillanatában megszakítja azt az áramkört, amibe beiktatták.

Magának az eredeti szabadalomnak nem sikerült nyomára akadnom, de a neten az *US 4153998 A* számú, 1979-ben közzé tett szabadalmi leírás megtalálható ([2]); ez lényegében ugyanezt tartalmazza. (A következőkben számos szabadalmi leírásra hivatkozom, ezek mindegyikét a világhálóról töltöttem le. A konkrét forrásra a továbbiakban nem fogok hivatkozni; a szabadalomszám szerint könnyen megkereshetők. Aki a témában el akar mélyülni, érdemes ezeket tanulmányoznia.) Az első ilyen elvű, egy repülőgépgyárban fejlesztés alatt álló repülőgép motorja egyes alkatrészeinek mérésére készített tapintófej fotóját a **3. ábrán** láthatjuk, amelyet a korabeli koordinátamérőgépek egyikén használtak.



3. ábra: Tapintófej

McMurtry otthagya a gyárat, és a TTP-re alapozva 1973-ban *John Deer*-rel megalapította saját cégét, a *Renishaw*-t, Wotton-under-Edge városkában. Később a feltaláló számos szabadalmát fogadták el a témában, amelyeket vagy egyedül, vagy társ-feltalálókkal együtt nyújtott be. Az ilyen rendszerű mérőfejek azóta hatalmas karriert futottak be. A Renishaw folyamatosan fejleszti az immár rendszerbe foglalt TTP-családjait, és jelenleg is a szakterület vezető gyártója. Az 1940-ben született McMurtry-t pedig néhány róla szóló cikkben, vele készült riportban a méretellenőrzés Steve Jobs-ának titulálják.

Amíg a szabadalom le nem járt, a Renishaw számos pert kezdeményezett az ötletolvajokkal szemben, de a becsületesebb hosszmeréstechnikai cégek igrékeztek a McMurtry-étől eltérő szerkezeti kialakítású érintkezős tapintófejeket kidolgozni. Ilyet ismert pl. a *US 4562646* (1986), az *US 4734994* (1988), vagy az *US 4964223* (1990). Ezek közös jellemzője, hogy lényegesen bonyolultabb szerkezetűek, és általában a kinematikai hibáik is nagyobbak az eredeti TTP-énél, így mára feledésbe merültek. Magam a '80-as években a Zeiss nagy koordináta-mérőgépén láttam egy „lapozós” konstrukciójú hatalmas villamos érintkezős tapintófejet.

Az ős-szerkezet egyik első továbbfejlesztése a tapintócsúcsnak a -Z irányban – azaz „kihúzás irányában” – való elmozdíthatósága volt (*US 4451988*, *US 4136458*, *US 5505005*, *US 5339535*). Egy 1981-ben benyújtott, a manapság elterjedtebb képest gyökeresen eltérő elrendezésű golyós szerkezet is ebbe a kategóriába tartozik (*US 4375723*). Utóbbi tudomásom szerint nem került gyártásba. Példák a további jobbító ötletekre: kettős rugós, töréspontos erőkarakterisztikával: *US 5208993 A*, *EP 0598709 A1*; rugó+mágnes (közel állandó erő): *US 5111592 A*; hagyományos egyrugós előfeszítés, de külső rugóval: *US 4462162*. Egy hosszú élettartamúként deklarált, kissé elbonyolított japán szerkezetet mutat be az *US2009/0133277 A1* számú szabadalom. Érdekesége, hogy az érintkezési pontok három pálcá/ferdén álló pálcapár között jönnek létre. Utóbbi elrendezést a TTP-k pontosságának javításával foglalkozó egyik szabadalom, az *US 5657549 A* is tartalmazza.

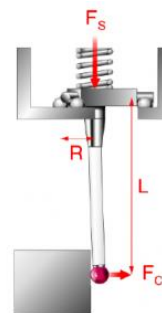
Korábban találkoztam olyan, hazai kutatóintézetben kifejlesztett, ISO-kúpra szerelt TTP-prototípussal, amelyben a csillag kerámiatestére 3 db golyó volt felragasztva. Ezeket 3-3 db golyóból álló fészkek tájolták. Az összesen 12 db, Ø2 golyó aranyozott volt (szárazon működő felületekkel), a „golyófészkek” 7 részre szegmált vezetőrétégű nyakgyűrűre voltak felforrasztva. Nekem ez az elrendezés a mechanikai határozatlansága miatt aggályosnak tűnt. A kapcsolóstatusz átvitelére viszont nagyon szellemes, induktív elvű módszert dolgoztak ki, amit a [3]-ben részleteztem.

Lényegesebbek azonban a *statikus és dinamikus letapintási hibák* csökkentésére irányuló erőfeszítések, amelyek különböző jellegű kiegészítő érzékelőelemek alkalmazásával valósulnak meg. A statikus hibák okait a [4] Renishaw-dokumentum egyszerűen, több elhanyagolással tárgyalja. A következő pontban hasonló ábrákkal és levezetéssel, az [5] jelöléseinek megtartásával idézem ide a lényegét, számpéldával is illusztrálva.

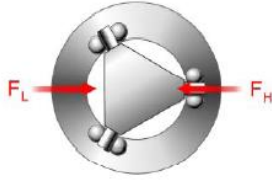
2 A TTP FELÉPÍTÉSÉBŐL, MŰKÖDÉSÉBŐL EREDŐ HIBÁK, RÖVIDEN

2.1 Statikus hibák

A **4.a. ábra** a kontaktusbontás előtti pillanatban szemlélteti a kinematikai/kinetikai viszonyokat. Az egyszerűbb tárgyalás miatt feltételezzük, hogy a háromágú „érintkezőcsillag” (azaz a belső mozgó alaptest a három pálcával) szerelési egysége abszolút merev, az L hosszúságú tapintószár pedig kör keresztmetszetű, végig azonos átmérővel.



4.a. ábra: Kontaktusbontás előtti pillanat képe



4.b. ábra: A meghajlás irányfüggősége

Az erőegyensúly ekkor a következőképpen alakul (az előjelek elhanyagolásával, abszolút értékekkel kalkulálva):

$$F_c L = F_s R, \text{ amiből } F_c = F_s R/L.$$

Az F_s a többnyire beállítható rugóerő. Az F_c erő hatására a tapintószár tapintógömb felőli vége h mértékben meghajlik (az ábrán nincs feltüntetve); ez a radiális irányú statikus hiba, ami igen alacsony megközelítési sebesség mellett rendszeres hibának tekinthető, és elvileg szoftveresen kompenzálható:

$$h = F_c L^3/3IE;$$

ahol E = a tapintószár anyagának rugalmassági modulusa, I = a tapintószár keresztmetszetének másodrendű nyomatéka (kör esetén $I = \pi r^4/4$).

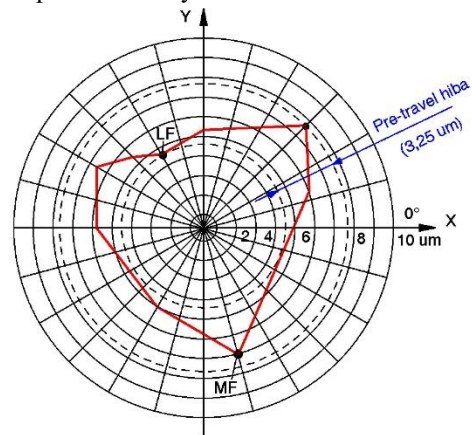
Az R szerkezeti kialakításból adódó irányfüggése miatt ez a meghajlás jellegzetes irányfüggőséget mutat. Ennek megértéséhez tekintünk a **4.b. ábrát!** Az érintkezőcsillag érintkezési pontpárjait egy egyenlő oldalú háromszög csúcsán fekvőnek képzeljük el. A háromszög geometriájából ismert, hogy a magasságvonalak (most egyben szögfelezők) $1/3 - 2/3$ arányban metszik egymást, azaz $r_2 = 2r_1$. A metszéspont itt a csillagszerelvény/tapintószár tengelyvonalában fekszik, a Z tengelyen.

A fentiekből következik, hogy ha mérendő pont oldalirányú megközelítése éppen az F_L irányából történik, akkor a csillagszerelvény az AB szakasz körül fordul el, és a C -nél szakad meg az áramkör, tehát $R = r_1$. Ha azonban éppen az F_H felől érintjük a mért darabot, akkor a forgáspont a C csúcs lesz, az áramkör megszakítása az A -nál vagy a B -nél következik be. Ekkor $R = r_2$. Az előző képletek alapján a tapintószár meghajlása R -rel egyenesen arányos, tehát a fenti két jellegzetes irányban a statikus hibák is $1:2$ arányúak lesznek. Mivel ez a jelenség 120 fokként ismétlődik, egy polárkoordináta-rendszerben a hibadiagram elvileg háromszög jellegű. Ezt a mérőgép szoftvere is figyelembe tudja (tudná) venni. Egy TP6 mérőfej bemérése során felvett hibadiagramot szemléltet az **5. ábra** (Renishaw dokumentum alapján megrajzolva). A mérés 50 mm-es mérőszáron történt, $F_c \cong 0,15$ N mellett. A diagram csak durván közelíti az elméleti egyenlőoldalú (ív)háromszöget; ez a vizsgált szerkezet további kinematikai hibáinak, ill. a mérési hibáknak tudható be. Megjegyzem, az LF minimális, ill. MF maximális kinematikai hiba különbsége (a Renishaw TTP-k adatlapján található jelölések) „Pre-travel variation” megnevezéssel – talán kontaktusbontás előtti elmozdulásnak fordíthatjuk, azaz az érintés pillanata és a

kontaktusbontás közötti eltelt idő alatti elmozdulásnak – szerepel az adatlapokon, és mikrométeres nagyságrendű.

Az axiális irányú megközelítés esete egyszerűbb, hiszen ekkor $F_c = F_s$.

Mivel a tapintószár nyomóerővel szembeni merevsége igen nagy, a rövidülésével, és ha csak nem extrém hosszúságú, akkor a kihajlásával (a szár görbülésével) sem kell számolnunk. A statikus hiba a kontaktushibákból adódik, amely azonban véletlenszerű. Az is véletlenszerű, hogy az egyes axiális megközelítések során a három kontaktuspár közül melyik bont először.



5. ábra: TP6 mérőfej bemérése során felvett hibadiagram

A fenti okfejtéseknek az a fő tanulsága, hogy amikor csak lehet, válasszuk ki a készletből a feladatra még éppen alkalmas legrövidebb, tömzsi mérőszárat! A gyári mérőszárok nagy szilárdságú, tömör korrózióálló acélból vannak, a hosszabbak kerámiából vagy szénszál merevítésű kompozitból készült csövek. A tapintógömb extra pontosságú mesterséges rubin, ill. nagy átmérők esetén héjszerű kerámia. Ezen anyagokból nagy alakpontosságú, kemény, kopásálló gömbfelület alakítható ki. Amatőrviszonyok között egy új, lehetőleg nagy pontosságú osztályú csapágygolyó is megfelel; McMurtry prototípusán is ez volt! Több forrás megemlíti, hogy ha csak lehetséges, akkor a tapintógolyót érdemes olajozni, így a kopása természetesen mérséklődik.

Egy példán keresztül nézzük meg, hogy mekkora a statikus hiba a két jellegzetes szélső esetben, egy konkrét konstrukciónál! Ehhez a **6. fejezetben** ismertetendő, saját készítésű *Touch-Trigger Probe Piezo+* adatait vesszük alapul. Ennél $L = 0,055$ m, de ebből csak az $l = 0,02$ m-es szakaszt vesszük számításba (a tapintócsap további szakasza lényegesen merevebb, amely szakasz deformációját elhanyagoljuk); $r = 0,001$ m; $r_1 \cong 0,006$ m; $r_2 \cong 0,012$ m; $E = 210$ GPa ($2,1 \cdot 10^{11}$ N/m², nagy szilárdságú acéltövezet); $F_s = 1$ N (széles határok között beállítható; ez egy közepes érték). A tapintószár keresztmetszeti tényezője (inerciája):

$$I = 3,14 \cdot 0,001^4/4 = 7,854 \cdot 10^{-13} \text{ m}^4.$$

$$F_L = F_s r_1/L = 1 \cdot 0,006/0,055 = 0,11 \text{ N}.$$

$$LF = F_L l^3/3IE = 0,11 \cdot 8 \cdot 10^{-6}/(3 \cdot 7,854 \cdot 10^{-13} \cdot 2,1 \cdot 10^{11}) = 2,651 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cong 2,65 \text{ } \mu\text{m}.$$

$$F_H = 2F_L = 0,22 \text{ N}; LH = 2LF = 5,3 \text{ } \mu\text{m}.$$

Az F_c rugóerő mérséklésével az LF és ezzel az LH is csökkenthetők lennének – ha házilagosan is képesek lennének olyan minőségű érintkezést biztosítani, amilyenekkel a gyári mérőfejekben találkozhatunk. Erről röviden a 3. pontban lesz szó. Megjegyzem, hogy a fenti eredmények csak az érintkezőcsillaggal merev kapcsolatban levő tapintószárra érvényesek! Később látni fogjuk, hogy a címbeli mérőfejre ez így nem teljesen igaz, mert egy membrán is beiktatódik az erőláncolatba.

A statikus hiba további csökkentésének lehetősége a minél rövidebb tapintószár választásán felül a nagyobb rugalmassági modulusú anyag – pl. kerámia – felhasználása, de igazán hatékony módszer az inercia növelése, ami a szár sugarának negyedik hatványával arányos! Jó választás lehet, ha a tapintószárat pl. régi kerámia csőkondenzátor testéből alakítjuk ki.

A fenti gondolatmenet a probléma erősen leegyszerűsített tárgyalását nyújtja, mert többek között nem foglalkozik a pontszerű érintkezéseknél létre jövő Hertz-feszültség okozta deformációval. Ugyancsak statikus hibát okoz a tapintógömb alakhibája, ami ma már tized mikron nagyságrendben tartható. Az érdeklődők részletes analízist kaphatnak pl. az [5]-ből.

2.2 Dinamikus hibák

Amennyiben a mérés során nagyon lassan közelítjük meg az érintési pontokat, csak a fenti, viszonylag jól meghatározható hibákra kell tekintettel lennünk. Am a korszerű ipari méréstechnikában törekszünk a geometriai mérések minél gyorsabbá tételére is, azaz a koordináta-mérőgépek is relatíve nagy sebességgel dolgoznak. Ez a sietség további, a statikus hibáknál nagyságrendekkel nagyobb hibákat okozhat: végső soron jelentősen nőnek a mérőfej letapintási sebességéből adódó mérőszár-deformációk. Arról van szó, hogy a háromágú csillagszerelvénynak van valamekkora tömege, annak pedig az elmozdítással, kifordítással szemben tanúsított ellenállása, tehetetlensége. Newton 2. Törvénye, melynek lényege az $F = m \cdot a$ összefüggés, ami az m tömeg a gyorsulásának eléréséhez szükséges erőt fejezi ki. Ez egyenes vonalú, egyenletes mozgásra vonatkozik ugyan, de jó közelítéssel a mi, kis szögelfordulásokkal járó esetünkre is értelmezhető. A gyorsulás a letapintás során negatív (azaz valójában lassulás): az eredetileg valamilyen sebességgel haladó tapintógömb ütközésekor lép fel). Közben jelentős hajlítóerő keletkezhet, ami a tapintószárat nagyságrendekkel nagyobb mértékben deformálhatja, mint az előző pontban vázolt statikus erők! A dinamikus hiba számítása nagyon bonyolult, a modern numerikus módszerekkel, számítógépes végeelem-analízisekkel végezhető el. Az azért nyilvánvaló, hogy érdemes a mozgó tömeget minél kisebbre redukálni. Jól példázza ezt a törekvést a 6. ábra, [6]-ról származó fotója, ami egy Renishaw TTP kontaktusrendszeréről készült. Jól látható, hogy a csillagszerelvényt igyekeztek kikönnnyíteni.

A TTP-k statikus és dinamikus hibáinak részletes analízise a neten több tudományos közleményben is szerepel, ám sajnos, ezek zömmel fizetősek. Nem fizetős pl. a [7], amely egy TP6 és egy OMP6-2 típusú TTP statikus és dinamikus hibavizsgálatának mérési módszereit, eszközeit mutatja be, és közzé teszi a mérési eredményeket, nagyon szemléletes térbeli diagramok formájában is. Az ilyen cikkeket tanulmányozva megállapíthatjuk, hogy a kézi mozgatusú koordináta-mérőgépeknél, ahol a megközelítés sebessége lényegében

véletlenszerű, a dinamikus hibák is véletlenszerűek lesznek, míg a CNC (motoros mozgatusú) gépeknél a szoftver közvetlenül az érintési pont elérése előtt csökkenti a közelítés sebességét, a még megmaradó dinamikus hatásokat pedig számításba tudja venni.



6. ábra: Renishaw TTP kontaktusrendszere

3 KONTAKTUSPROBLÉMÁK

Az angol nyelvű szakirodalomban ezt a 6 golyó/3 pálcá (vagy 3 golyó/6 pálcá) 6 db érintkezési pontja valamelyikének megszűnésén alapuló mérőfejet Kinematic resistive probe (kinematikus rezisztív mérőfej) megnevezéssel is illetik. A golyók/pálcák nagyon korrektül definiált érintkezési pontjai kiváló geometriai ismételhetőséget biztosítanak, hiszen a tapintógömb térbeli helyzetét elvileg tized mikrométer alatti hibával tarthatják az általuk közvetve meghatározott pozícióban. Ez maga a kinematikai rendszer. A sorba kapcsoldó hat kontaktuspárnak van egy eredő nyugalmi ellenállása; innen a „rezisztív” szó. A kitérés során először ez az ellenállás növekszik, ahogy az érintkezők rugalmas deformációja fokozatosan megszűnik, majd gyakorlatilag végtelenné válik. A kontaktusrendszerhez kapcsolt jelkondicionáló áramkör az ellenállásnövekedés meghatározott mértékénél átbillen, a kimenete logikai szintet vált. A nyugalmi átmeneti ellenállás azonban nem stabil: függ például a szorítóerőtől, a felületek oxidálódásától, a működési ciklusok közben fellépő kopástól, oxidációtól és az esetleges szennyeződésektől. Találtam olyan szabadalmi leírást (EP 0501680 A1), amelyben pl. autozéró-áramkörrel mérsékelnék a problémát, míg egy másikban váltófeszültségű áramkörbe iktatnák be a TTP-t (EP 0501681 A1).

Az érintkezőelemek anyaga nagyon precízen megmunkált, a gyártó által nem részletezett összetételű keményfém (ám valószínűbb, hogy egyszerűen wofrámm; [8]), amelyet valamilyen kontaktfolyadékkal vonnak be. Mondanom sem kell, hogy a Renishaw nem közli az általa használt kontaktfolyadék mibenlétét sem. A saját készítésű példányoknál kipróbáltam a közismert, WD-40 univerzális kenőanyagot, amit a gyártó kontaktjavítóként is ajánl. Ebből egy kis adagot kifújunk egy apró tálkába, és innen kenjük fel a golyók, görgök felületére. (Az olajról, mint kontaktfolyadékról a [9]-ben emlékeztek meg röviden. Aki e régi lapszámhoz nem tud hozzájutni, annak a [10]-et ajánlom.)

4 A TTP HIBÁINAK CSÖKKENTÉSE

A hobbisták (pl. hobby CNC-építők) számára a 2.1. végén kiszámolt statikus hibák elfogadhatónak látszanak, hiszen a házi készítésű gépek szánmozgatásának felbontása 10 μm nagyságrendben van, a gépek kinematikai hibái pedig ennél nagyobbak. Azonban a neten meglehetősen precíz házi készítésű szerszámgépekkel is találkozhatunk, és ki tudja, mit hoz a jövő? A forgácsolással foglalkozó mikrovállalkozásoknak már most is lehetnek nagy pontosságú szerszámgépeik, de nem biztos, hogy egy méregdrága mérőfej-rendszer megvásárlását megengedhetik maguknak. Ha a hobbisták céljainak egyelőre akár egy fából készült, a golyókat félgömbfejű csavarokkal helyettesítő, házilag barkácsolt TTP-konstrukció ([11]) talán meg is felel, lehet, hogy nemsokára jóval pontosabb, de még mindig házilag elkészíthető mérőfejre lesz szükségük!

Az iparban a pontosság növelésének az igénye már régen megfogalmazódott, és természetesen számos szabadalom született a TTP eredő statikus és dinamikus hibáinak mérséklésére. A döntő többségük valamilyen analóg jelátalakító(k) beépítésével oldaná meg a problémát. Így voltak induktív (pl. *US 4443946*) vagy kapacitív (pl. *US 6683780 B2*) elmozdulásérzékelőkre vonatkozó elképzelések, amelyek zömmel abból indultak ki, hogy a csillag elmozdulásának a tapintógömb bármilyen irányú kitérésekor végső soron van egy tapintószár tengelye irányába mutató komponense, amit a fenti módon érzékelni lehet. A 4443946-ban háromágú csillag helyett egy tárcsa pereme támaszkodik fel, egy jelfogós (!) feszültségosztó-átkapcsolóval gondoskodik a feltaláló arról, hogy a Z irányú érzékenység se legyen sokkal nagyobb, mint a vízszintes irányú, így az elmozdulással közel arányos analóg jel nyerhető, bár a kitérés irányát csupán ebből nem lehetne megállapítani. Nincs ugyan további érzékelője, de McMurtry az *EP 0598709 A1* számú szabadalmában egy rugalmasan illeszkedő peremes alkatrészsel (serleggel) javasolta a hagyományos TTP statikus hibáját csökkenteni, de ez alighanem nem váltotta be a hozzá fűzött reményeket.

Született elképzelés olyan interferometrikus rendszerre is, ami szerint a tapintóházban Michelson-jellegű interferométer van, amelynek mérőkarját csőszzerű tapintószár képezi, a végében, a tapintógömb fölé beépített tükörrel (*US 5118956*): ez lenne az interferométer mérőkarja. Elképzelhető, hogy mennyire kényes egy ilyen rendszer a legkisebb elállítódásra még akkor is, ha tükör helyett apró szögprizmát építenének be! (A gyakorlatban elkerülhetetlen, a mérési feladathoz alkalmazkodó tapintószár-csere ui. csak azzal volna lehetséges.)

A korai elképzelésekben gyakran szerepelt a *piezoelektromos átalakítók* alkalmazása; erre később visszatérek.

A számos ötlet közül mára két fő termékcsalád kristályosodott ki a Renishaw-nál: a nyúlásmérő bélyeges és az analóg optikai átalakítók alapuló konstrukció.

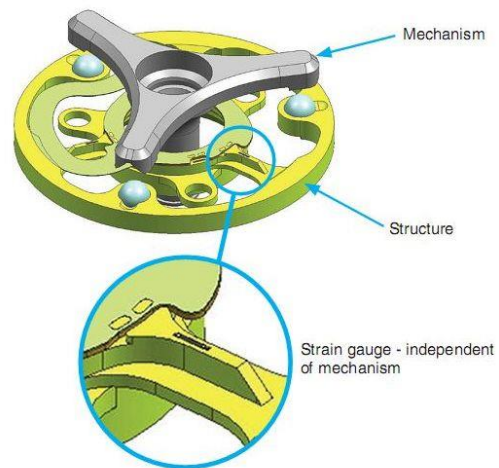
4.1 Nyúlásmérő bélyeges TTP-k

Ezekben a mérőfejekben a golyópáros/pálcacsillagos rendszer feladata a mérőszár, és ezzel a tapintógömb térbeli nyugalmi pozíciójának szabatos biztosítása, kimozdulásának lehetővé tétele, tehát a tájolóelemek nincsenek áramkörbe kapcsolva. (Ígazából nem is helyes

TTP-nek nevezni sem ezeket, sem a következő pontban tárgyalt mérőfejeket. Megszokásból mégis maradunk ennél a titulussnál.)

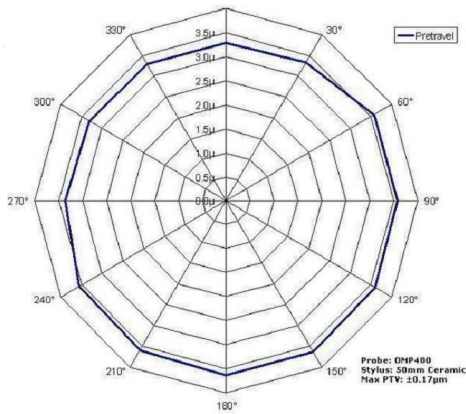
A korai (1984-ben közzé tett) *US 4462162* szabadalom többféle nyúlásmérő bélyeges – és egy induktív elmozdulásérzéklős – konstrukciót is bemutat. Érdekes az *US 5090131* koncepciója is, de a ténylegesen megvalósult, gyártásba került típusok felépítése jelentősen más, az *US 2010/0292956 A1*-ben ismertetetre hasonlít. Az első, nyúlásmérő bélyegeket tartalmazó tapintófej a Renishaw MP250 volt, majd követte az OMP400 (az „O” betű az optikai – azaz a tapintófej és tipikusan a CNC szerszámgép vezérlése közötti infravörös – jelátvitellel utal). Jelen cikk írásakor a legfejlettebb típus az OMP600, az MP700 rendszer és az RMP600 volt [12]. Utóbbi rádiós jelátvitelű. Amúgy az IR jelátvitel sem teljesen új a TTP-k területén: Az *US 4608763* egy kompakt, teleses táplálási egységet mutat be, metszetrajz és kapcsolási vázlat szintjén. Hagyományos, érintkezős rendszer vezérli az öttranzistoros áramkört, melynek alapja egy 150...200 kHz-es Colpitts oszcillátor. A TTP ennek frekvenciáját kapcsolja át. A modern optikai átvitel már kétirányú: a mérőegység parancsokat képes fogadni. Házilag elkészíthető, nagyon gyorsan reagáló, egyirányú IR-átvitelű rendszert mutat be a [13].

Az előbb felsorolt gyártmányok RENGAGE™ mérőrendszerének vázlatát a 7. ábra mutatja ([14]). Egy háromküllös „kerék” látunk a grafikán, amely az „agyrésznél” fogva három csavarral erősíthető belülről a tapintóházhoz. A küllőkre egy-egy szilícium (piezorezisztív) nyúlásmérő rudacska rögzítettek; nem hagyományos nyúlásmérő bélyegekről van tehát szó, inkább mikromechanikai konstrukcióról!



7. ábra: RENGAGE™ mérőrendszer vázlat

A kerék abroncsába beágyazva három kerámia golyó is látható, amelyek a tapintószárat is tartó merev, háromágú csillag „V” alakú árkaiba hatolnak be, szabatosan tájolóva a tapintószárat. A szerelvényt egy, itt nem ábrázolt nyomórugó szorítja a kerékhez, a szokásos módon. Ez a rendszer szubmikronos érzékenységű, és jóval kisebb hajlítóerővel terheli a tapintószárat a jelzés kiváltásakor, mint a klasszikus felépítésű „Touch-Trigger Probe”-ban. A 8. ábra egy OMP400 típusú, RERANGE rendszerű mérőfej hibagömbjét tünteti fel. Dacára az 50 mm hosszúságú – igaz, kerámiából készült – mérőszárnak, a maximális pre-travel hiba csupán $\pm 0,17 \mu\text{m}$!



8. ábra: OMP400 típusú RARENGE mérőfej hibagörbéje



9.a. ábra: Membránrugó-pár

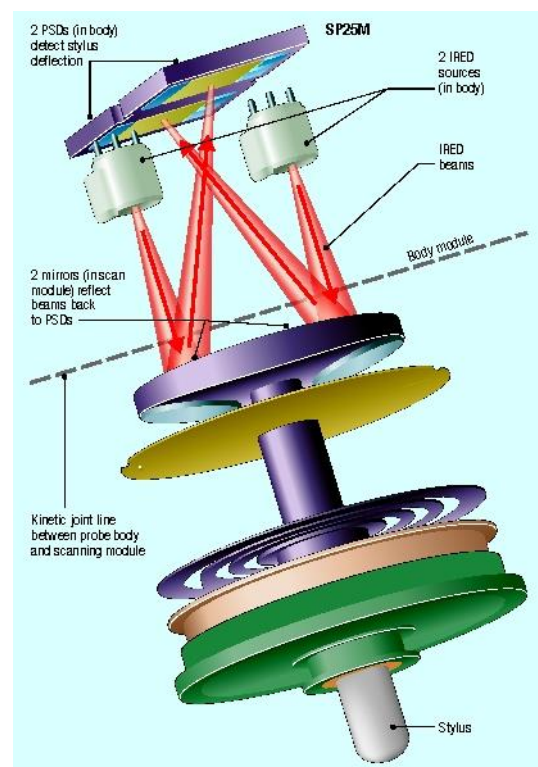
Sajnos, a nyúlásmérő bélyeges tapintók jelkondicionáló áramköréről semmit nem árul el a gyártó. Az EP 0242747 A2 szabadalmi leírás tartalmaz vázlatos kapcsolási rajzokat is, az US 7689379 B2 pedig sokat elmond a hárombélyeges rendszer által nyújtott *analóg pozíciómeghatározási módszer* lehetőségéről. Még részletesebb elvi magyarázatot nyújt az ilyen konstrukciókról az US 2009/0043534 A1.

4.2 Optoelektronikai elvű TTP-k

Egy optikai koncepciót korábban megemlítettem, de számos más elven működő optikai tapintót szabadalmaztattak már. Modern elképzeléseket tükröz például az 1988-ban közzé tett US 5825666 A számú szabadalom, amely optikai a tapintószár elmozdulását képbontó eszköz közvetítésével értékelné ki.

A ténylegesen megvalósult, gyártásba került RENISHAW SP25M alapú, elemekből összeállítható tapintócsalád analóg optikai elven érzékeli a tapintócsap nyugalmi helyzetéből bármely irányban történő kimozdulását. A tapintócsapot ezáltal nem a megszokott, golyópárokból és pálcacsillagból álló mechanika, hanem speciális kiképzésű, szabadalmaztatott, kellően merev membránrugó-pár igyekszik stabil pozícióban tartani (9.a ábra).

Az alsó rugó minden irányú elmozdulást megenged, a felső csak Z (azaz tengely-) irányút. A látszat ellenére a rendszer stabilitása igen nagy: egy 200 mm hosszúságú – tehát viszonylag súlyos – tapintószár legfeljebb 4 µm-es mérési bizonytalanságot okoz a 21 mm-es tapintószárhoz képest! A rugórendszer további előnye, hogy az oldalirányú kitérés érzékenysége közel független a kitérés irányától, szemben a hagyományos Touch-Trigger Probe rendszerével, ráadásul *megengedi a tapintószár -Z irányú elmozdulását* is anélkül, hogy ehhez a mechanikát alaposan el kellene bonyolítani! (Hasonlót pl. az US 5345689, vagy az US 7146741 ismertet.) Az ilyen membránrugók szerkesztése mára külön tudománnyá vált: a neten több tanulmány részletezi a hasonló csukló-/vezetőelemek elméleti hátterét, méretezését; a cikk végén egyet ki is emelek.



9.b. ábra: A tapintófej optomechanikai rendszerének vázlata

A tapintófej optomechanikai rendszerének vázlatát a 9.b ábra mutatja. A tapintóházhoz rögzített két, itt szürkére színezett IR sugárforrás (LED-et és kollimátorlencsét tartalmazó tubus) fénye a tájolórugó-rendszerhez erősített mozgó platformon rögzített két homorú tükörrre vetül, amelyek a sugarakat a fölül látható, sárgára színezett két PSD-re (Position Sensing Detector) vetítik. Ezek nem mások, mint nagy felületű négyzetes PIN fotodiódák, melyeknek négy anódkivezetése van, a négyzet négy oldaláról. Utóbbiakhoz transzkonduktancia-erősítőkkel és OPA-s műveletvégző áramkörökkel álló áramköri környezet csatlakozik. Az elektronikai hálózat X, Y kimenetéről elvezethető feszültséggel közel arányos a kerek fényfoltok a lapka középpontjától mért X, ill. Y irányú távolságával.

A két, kitérő irányú fénysugárra a Z irányú elmozdulás mérése érdekében van szükség. (Az optikai rendszer lényegében az US 2002/0174556 A1 szabadalomban

lefejtett konstrukciós elveken alapszik, persze azokat továbbfejlesztve. Más optikai elemekkel és sugárutakkal, de 3 db PSD-n alapul az *US 2006/0070253 A1* számú szabadalom.)

Azért tájolóhornyok és pálcacsillag ebben a műszer családban is van, bár az érzékelésben ugyanúgy nincs szerepük, mint a nyúlásmérő bélyeges társaikban, sőt normális esetben a tapintás közben el sem mozdulnak egymáshoz képest! A tapintószár pozícióját ezek határozzák meg az eleve két egységből összeállítható tapintóház alsó elemének elmozduló egységén, a ház két alapelemét pedig négy apró állandómágnés-korongpár fogja össze. Ez a moduláris koncepció rendkívül leegyszerűsíti a tapintószárak automatikus, programozott cseréjét a CNC mérőgépeken, sőt, megakadályozza a kezelési hibából származó törést is. Túlmozduláskor ui. a tapintószárat a mágnesek egyszerűen elengedik, az sérülés nélkül leválik. Ez sem teljesen új ötlet, pl. az *US 7676945 B2*, az *US 5918378 A*, vagy az *US 5404649* szabadalom mutat be hasonlót. Kétségtől szellemes megoldás, és lényegesen költségkímélőbb, mintha az összes tapintószárhoz egy-egy önálló mérőfej tartozna! Erre a következő pontban visszatérek. A hagyományos felépítésű, 5 vagy 6 irányú (azaz -Z mentén is elmozdítható tapintószárú) TP20 esetén hasonló elvet követtek, csak hogy itt a maga a mérőegység választható le tapintószárustól a koordináta-mérőgépbe befogott alaptestéről.

Az SP25M eleve *kontúrkövetésre* készült – és mint ilyen, alighanem a világ legkisebb, legkompaktabb tapintórendszere –, de a TP20 TTP-t illesztve hozzá, hagyományos, ponttapintású mérőfejként viselkedik.

5 PIEZOKRISTÁLY A TTP-BEN

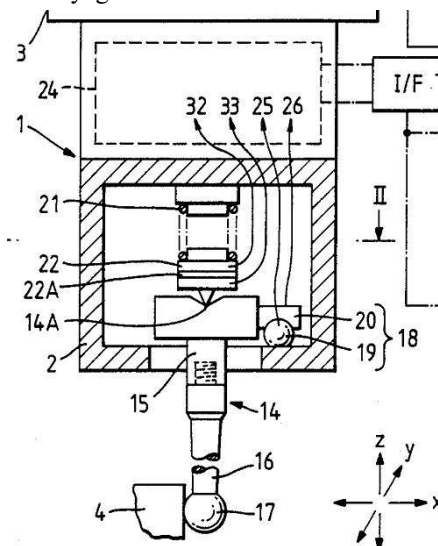
Az eddigiek tanulmányozása után azt gondolhatjuk, hogy eleget tudunk a TTP-kről ahhoz, hogy megszerkesszük a saját, nyúlásmérő bélyegekkal vagy optikai elmozdulásérzékelőkkel kiegészített, csekély statikus és dinamikus hibával rendelkező tapintónkat. Ne siessük el a dolgot! A nyúlásmérő bélyegek nagyon drágák, a felragasztásuk is különleges ragasztót, technológiát és nagy gyakorlatot igényel, és a „küllős kerék” anyagválasztása, hőkezelése, megmunkálása sem túlságosan könnyű kihívás még egy profi finommechanikai üzem számára sem! Az optikai rendszer házilagos kivitelezése sem kifejezetten egyszerű, bár ha a rugómembránok helyett maradunk a hagyományos TTP-mechanikánál, és lemondunk a -Z irányú elmozdulás lehetőségéről, talán célhoz érhetünk. Jelen írás szerzője a '80-as években már kísérletezett CD-meghajtókból származó olvasófejek elemeinek felhasználásával. Egy más alapú, sajátos rendszerű, saját fejlesztésű optoelektronikai érzékelő részletes ismertetése a [15]-ben található meg.

Mégis, e helyett tekintünk inkább a cím szerinti módszert, a piezokristály alkalmazását. Naná, hogy a neten kutakodva ilyen témájú szabadalmi leírások sokaságát is felleljük! Igaz, nem nagyon találunk a gyártók választékában piezo érzékelőelemmel kiegészített TTP-t, bár pl. a NIKON Metrology a [16]-ban javasol ilyen elvű tapintót a koordináta-mérőgépeihez, de típust nem jelöl meg.

Korábban említettem, hogy a csillagegység elmozdulásának minden érintés során van egy tengelyirányú komponense. Ezt McMurtry is kihasználhatónak vélte, és 1980-ban be is nyújtotta a már említett, később *US 4443946* számon közzé tett szabadalmi igényét. Ugyanó kért szabadalmat 1984-ben a teljesen hasonló elven, de az induktív elmozdulás-érzékelő helyett piezomembránt alkalmazó konstrukcióra, amit *US 4854050* számon adtak meg. Nagyon hasonló konstrukciót ismert az *US 4702013*, az *US 4780963*, ill. az *US 4769919* számú szabadalom is. Persze mások sem tétlenkedtek piezós TTP-ügyben. Érdekes elgondolás az *US 6708420 B1*, mereven rögzített tapintószárú, de a szárba iktatott rugalmas elemmel – „lírával” – ellátott mérőegység. Szintén érdekes elképzelést tükröz az *EP 0605140 A1*. Ebben a TTP-mechanika csillagegységébe beépített, 120 fokban elhelyezett, tárcsa alakú piezoelem-párok szerepelnek. A Zeiss már különleges kialakítású rugómembránokat épített volna be piezotapintójába, a szokásos TTP-mechanika helyett (*US 5111592*).

Házilagos megvalósítás szempontjából McMurtry eredeti elképzelése látszott a legmegfelelőbbnek, mert egyszerű alakú alkatrészekből épül fel, a piezokristály pedig olyan, fémtárcsára ragasztott lapka lehet, amit zümmerként árusítanak, számos olcsó (akár roncs) elektronikai kütyüben is megtalálható, de könnyen, olcsón be is szerezhető.

Tekintsük például az *US 4854050* számú, *Contact-sensing probe* című szabadalmi leírás 1. ábráját, amelynek számunkra lényeges részletét a **10. ábrán** kiemeltem.



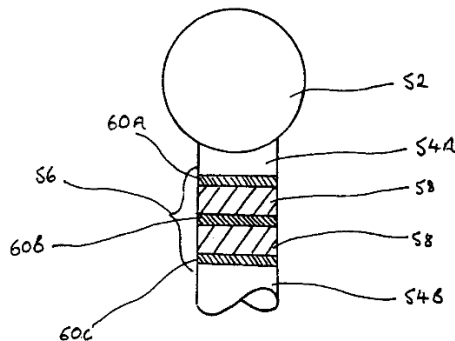
10. ábra: Contact-sensing probe - részlet

Egy hagyományos TTP-hez hasonló szerkezetet látunk, amelyben a 14 - 17 elemeket és a 20 pálcákat is magában foglaló mozgó részt a 21 rugó szorítja a 19 érintkezőgolyók közé. A rugó és az érintkezőcsillag közé azonban további szerkezeti elemek (14A, 22, 22A 32, 33) is be vannak iktatva; a rugóerő ezeken keresztül adódik át a csillagra. A 22A elem maga a piezokerámia lapka, amire a mozgó egység elmozdulásának függőleges komponense által kifejtett erő hat.

Elkészítettem, kipróbáltam. Sajnos, a tapintóház kocogtatására majdnem olyan érzékenyek bizonyult, mint a tapintószárára.

Találtam egy érdekes elgondolást, amely *aktív piezos*: a tapintócsúcsot rezgeti (US2009/0320553A1, US007856731B2). A felülettel való érintkezést a rezgés csillapításán keresztül érzékeli. A továbbiakban ezzel nem foglalkozom, bár az ötlet meggondolandó.

Végül egy további problémát is meg kell említenünk. Acélban a hang terjedési sebessége mintegy 5100 m/s, azaz 1 μ s alatt 5,1 mm-t tesz meg a lökéshullám az anyagban. Például egy 50 mm-es tapintószárban eleve 10 μ s körüli a késleltetés. Ha a tapintófej haladási sebessége 100 mm/s = 100 000 μ m/s, akkor ebből 10 μ s alatt 1 μ m rendszeres, azaz szoftveresen korrigálható késleltetési hiba keletkezik. A minél nagyobb pontosság érdekében jobb lenne a piezoelemeket közvetlenül a tapintógömb mögött elhelyezni. Ezt a törekvést tükrözi az EP 0420416 A2, ill. az EP 0420416 A3, 1991-ben közzé tett szabadalom, amelynek egy ábráját ide idézem; ez pontosan a fenti konstrukciós elvet tükrözi (11. ábra; a piezolapok az 58-as számú tételek). A dolognak az a hátulütője, hogy tovább drágítaná az amúgy sem olcsó TTP-t és tapintókészletét (az SP25 rendszer árajánlatát lásd pl.: <http://www.thecmmstore.com/products/probe-system/probe-body/sp-25/default.html>). Mások a nyúlásmérő bélyegeket is felragasztották volna a mérőszárra (US 2005/0283990 A1), és a 4. fejezetben említett interferométeres tapintó is nyilván ugyanezt a problémát kívánta volna kiküszöbölni.



11. ábra: EP 0420416 Szabadalom - részlet



12. ábra: SP25M és SM25-1-mágnesesen „feltapadó” tapintószár

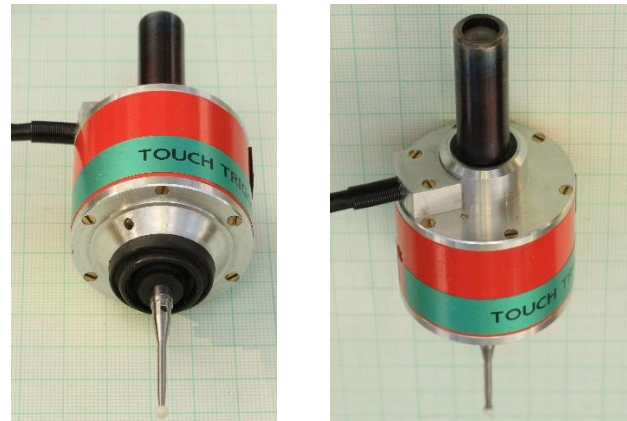
A hagyományos konstrukciók esetén alkalmazott lehető legrövidebb tapintószár ezt a hatást is enyhíti. Az SP25 optikai mérőfej-rendszerrel különböző hosszúságú SM25-x, tapintószárat befogadó membránrugós/tükrös egységek

(5 féle van) illeszthetők az SP25M alapegység és a mágnesesen „feltapadó” tapintószárak közé. Így a mérési ponthoz való hozzáférés sokszor nem a kevésbé merev tapintószár hosszának növelésével valósul meg. Persze, minden SM25-x egységbe a hosszához illeszkedő fókuszú tükröket szereltek. Egy lehetséges összeállítás elemeit láthatjuk a 12. ábrán.

6 TOUCH-TRIGGER PROBE PIEZO+

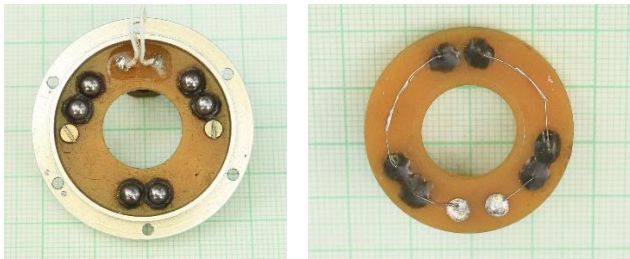
6.1 Mechanika

Egy ilyen precíziós finommechanikai konstrukció elkészítése a mechanikai műszerész munkában való nagy jártasságot, megfelelő felszerelést (minimum egy jól felszerelt esztergapadot) és komoly türelmet igényel. A következőkben nem is adok pontos alkatrészrajzokat és részletes legyártási útmutatókat, csupán a lényegesebb szempontokat említem meg. A konstrukciós részletek tekintetében mindenki járjon el a saját tapasztalatai, felkészültsége és lehetősége szerint!



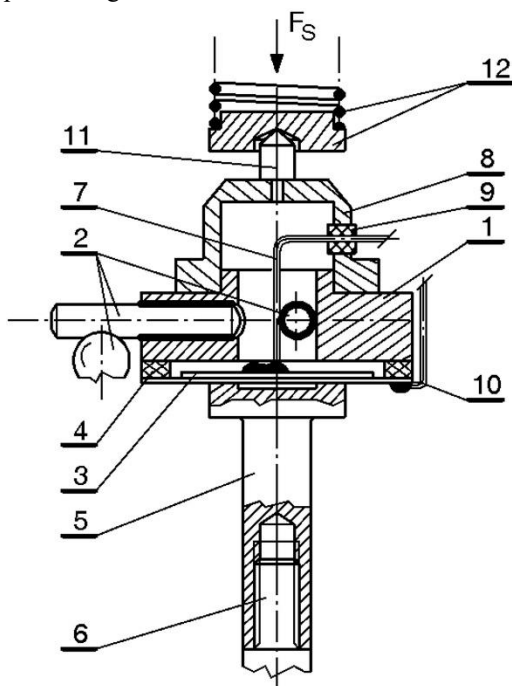
13. ábra: Saját prototípus külső fotói

A komplett, $\varnothing 42 \times 72$ mm befoglaló méretű, $\varnothing 12$ mm-es befogószáru prototípus külső fotói a 13. ábrán láthatók. A tapintóház egy esztergált alumínium cső, amelyhez M2-es csavarokkal erősítettem hozzá az alsó és a felső szerelőpajzsot. Előbbi belső, gyűrű alakú hornyába van becsavarozva az $\varnothing 33 \times \varnothing 15 \times 1,5$ nyákgyűrű, amin azonban nincs rézréteg. A gyűrűbe, 25 mm átmérőjű körön, 120 fokos osztással $\varnothing 3,7$ mm-es furatpárokat készítettem, a furatokba a 4 mm-es csapágygolyókat ragasztottam, kétkomponensű, nagy kötősszilárdságú fémragasztóval. Előtte a golyó felületének egyik felét szikraerózióval feldurvítottam. Ezt a műveletet ugyanazzal a célhegesztőkészülékkel ([17]) végeztem, amivel a hozzávezető huzalokat is a golyókhoz hegesztettem. A kontaktusegység kivezetéseit 2 db 2 mm-es csőszegecs képezi. A felhegesztett huzalokat a golyók beragasztása után egymáshoz és a csőszegecsekhez forrasztottam. Az elmondottak a 14. ábrán jól megfigyelhetők.



14. ábra: Elkészített szerkezet

A mozgó rész metszetrajzát a **15. ábra** mutatja. Az alapja az *1* alumínium alaptest (gyűrű), amelybe a 3 db 2 helyező/érintkező pálcá van beragasztva, 120 fokos szögben (az egyik golyót is ábrázoltam). Az alaptest aljához van ragasztva a 3 piezozümmber-lapka, a 4 nyákgyűrű közébeiktatásával. A lapka hátoldalához, azzal, egyben az alaptesttel egytengelyűen helyezkedik el az 5 sárgaréz szárbefogó (szintén felragasztva), amibe a 6 tapintószár csavarható be. A lapka „meleg” kivezetése a 7 hajlékony, szigetelt sodrat, ami a 8 alumínium kupakba sajtolt 9 műanyag védőcsövecskén bújik ki. A testpotenciálú 10 sodratot a zümmberlapka hátoldalra forrasztottam fel. A szerelvényre az F_s szorítóerő a 11 kúpos acéltüskén keresztül adódik át, a 12 elemekkel jelképezett erőgenerátorról.

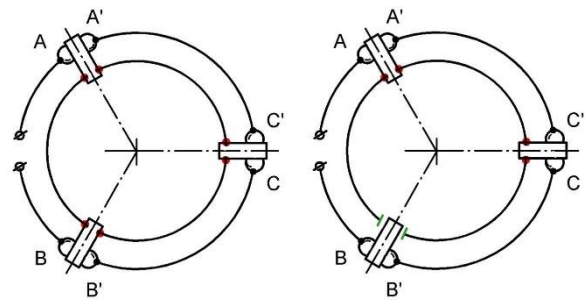


15. ábra: A mozgó rész metszetrajza

Az így befoglalt lapka mind szimmetrikus deformáció hatására (tengelyirányú nyomásra), mind féloldalas hajlításra (a tapintógömb sugárirányú kitérésére) feszültségjellet produkál.

Itt egy kis kitérőt kell tennem az érintkezőcsillag tárgyában, mert egy egyszerű tényre a szakirodalom soha nem hívja fel a figyelmet. A [6] külföldi netes fórumon vetődött fel a kérdés egy eredeti Renishaw-tapintóval kapcsolatban, hogy miként lehetséges az, hogy szétszedés és összeszerelés után csak a háromágú „csillag” két pozíciójában működik helyesen a TTP, a harmadik lehetséges pozícióban pedig nem? Ráadásul a csillag

fémtestétől csak az egyik pálcá van elektromosan elszigetelve! Ennek megértéséhez tekintük a **16. ábrát!**

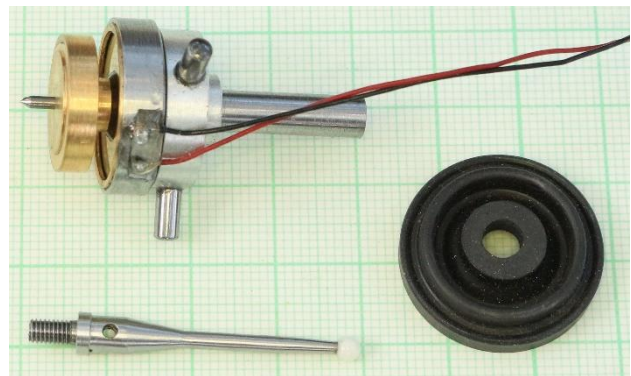


16. ábra: Az érintkezőcsillag szigetelése

A **16.a ábrán** a csillag pálcái be vannak sajtolva a mozgó fémtömbbe, azaz egymással galvanikus kapcsolatba kerülnek. Ha a mérés során az *A-A'* vagy a *B-B'* kontaktpár szakad meg, akkor nincs probléma, az elvezetések között is szakadás keletkezik. Ha viszont a *C-C'* közül emelkedik ki a pálcá, a másik kettő a helyén marad, akkor az *A* és *B* golyó között megmarad a kontaktus, ezzel az elvezetések között továbbra is rövidzár mérhető! Ha a **16.b ábra** szerint az alsó két pálcá közül valamelyiket elszigeteljük a többitől (a példában a bal alsót), akkor ezt a problémát kiküszöböltük. A fenti kérdés ezzel meg is oldódott, bár a házi készítésű mérőfejünkben mindhárom pálcát elszigeteltük úgy, hogy a szigetelési ellenállása 20 Mohmos méréshatárú ellenállásmérővel sem mérhető.

A 19 mm átmérőjű zümmberlapkának először a kerámia felőli oldalára ragasztottam a 0,6 mm-es, kétoldalon fóliázott nyákából esztergált Ø15,5/Ø19 mm-es 4 gyűrűt. A fémezett felületre a lapka tengelyvonalaiban a vékony, piros szigetelésű kivezetősodratot (7) forrasztottam. A forrasztásokat óvatosan, kis ónpötty hátrahagyásával kell elvégezni! A 10 testelő sodrat fekete színű. Végül a lapkaszerelvényt a helyére ragasztottam. A fém alkatrészek egymáshoz ragasztása a már említett fémmagasztóval történt. Nyáklemez helyett sárgaréz- vagy acéllemezről készített gyűrű ugyanúgy megfelel.

Ez az elrendezés nagyjából a 11. ábra szerinti – elméleti – elképzelés előnyével kecsegtet abban a tekintetben, hogy a lapka közvetlenül a tapintószár erőfolyamába van beiktatva, ezzel kisebb zavarérzékenységet ígér, mint a 10. ábrán, ill. a US 4854050 számú szabadalom további ábráin bemutatott vázlatok.

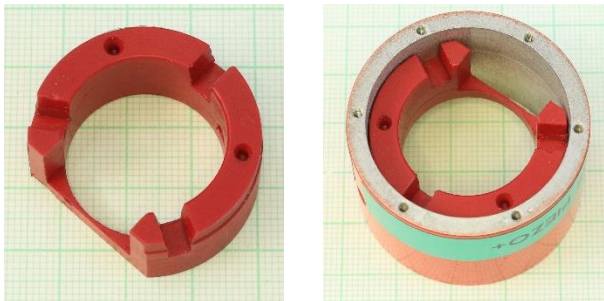


17. ábra: Alumínium testű komplett érintkezőcsillag

A **17. ábrán** az alumínium testű komplett érintkezőcsillag fotója látható, a kiegészítő szerelvényeivel. A csillagszerelvénytől jobbra szerepel a képen a gumi védőharmonika, ami meggátolja a szennyeződések bejutását a tapintóház belsejébe úgy, hogy közben alig akadályozza a tapintószár mozgását. Felszerelve a 13. ábrán látszik.

Alul egy tapintószár fekszik, természetesen M3 menettel, az elülső végén egy nagy pontosságú, Ø3 mm-es kerámia golyóval. Egy puha esztergapatronba fogott golyóba fogászati gyémántfűrővel kb. 1,5 mm mély zsákfuratot képeztem ki, amibe a szár levékonyított végét az említett fémgrasztóval beragasztottam. A szár tövénél levő keresztirányú furat annak szilárd rögzítésére szolgál: a helyére csavarás után egy acélpálcikával a csavarkötést jól meg kell szorítani, különben a mérést hiszterézishiba is terheli fogja!

A csőszerű házba egy M3-as csavarral rögzítettem a **18. ábrán** látható, ipari műanyagból esztergált/mart alkatrészt. Ennek fő feladata a csillag elfordulás elleni biztosítása, hogy a pálcák mindig visszataláljanak a golyók közé. Az elfordulás-gátlásra akkor is szükség van, ha a tapintószárat be- vagy kicsavarjuk. Az alkatrészen ejtett lelapolás és bemarás a kontaktuspanel két vezetékének és a piezó testhuzaljának átvezetésére szolgál.



18. ábra: A csillag elfordulás elleni biztosítása

A felső szerelőpajzs (ez is a 13. ábrán figyelhető meg) is alumíniumötvözetből készült. Ebbe van besajtolva/beragasztva az acél befogószár. Utóbbi is csőszerű, M8×1 belső menettel, ahova az általam erőgenerátornak nevezett nyomórugós szerelési egység belső kulcsnyílású állítócsavarját lehet becsavarni (**19. ábra**).

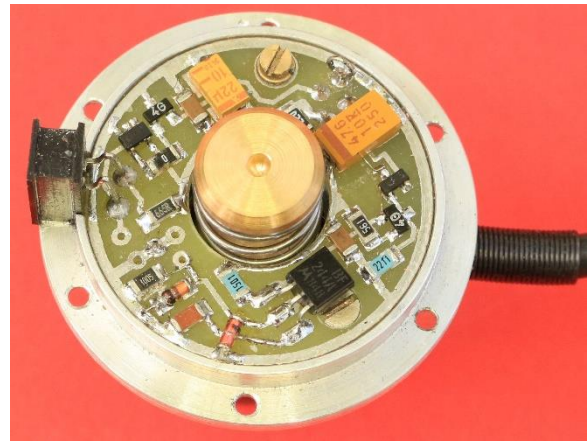


19. ábra: Rugós erőgenerátor

A rugó bal oldali végébe illeszkedik a zsákfuratos nyomóelem (ez fogadja be a mozgó szerelvény tuskóját). Alul az imbuszkulcs fekszik, amivel végső soron az F_s

erőt lehet kívülről, a tapintó felfogószárának menetes furatán keresztül beállítani. *A terhelés során óvatosan kell eljárni, mert túlfeszítés esetén a kerámialapka elpattanhat!*

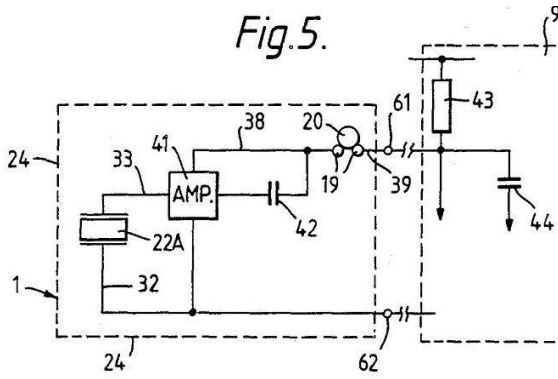
A hátsó pajzsra szereltem az egyedi gyártású kábelrögzítőt és rugós törésgátlót a négyeres árnyékolt kábel számára, a belül kiképzett gyűrű alakú hornyába pedig a felületszerelt jelkondicionáló panelt szereltem be, 2 db M2-es csavarral (**20. ábra**; az áramkör a 6.3. pontban). A kontaktusbontást jelző 3 mm-es piros LED egy kis „H” profilú műanyag hasámba illeszkedik szorosan (a képen balra), ami összeszereléskor a házon kiképzett horonyba csúszik be. A képen jól látszik a nyomórugó is, a zsákfuratos nyomóelemmel.



20. ábra: Jelkondicionáló áramkör a hátsó pajzsban

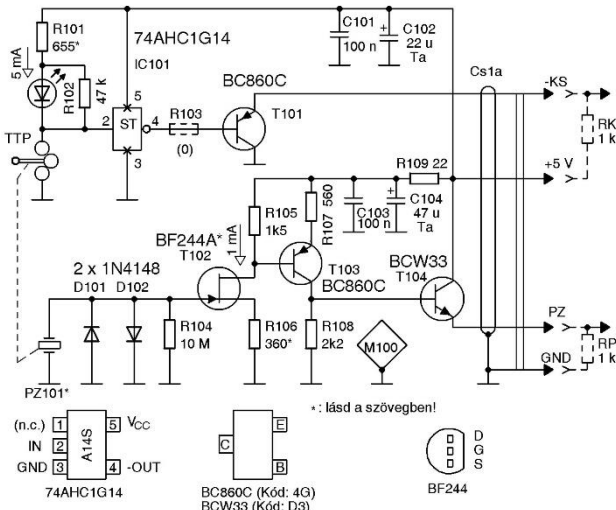
6.2 Jelkondicionáló áramkör

Azon korai szabadalmi leírásokban, amelyek áramköri vázlatokat is közzé tettek, a mérőfejbe integrált elektronika kapcsolási rajzán/tömbvázlatán többnyire megfigyelhető a törekvés, hogy a mérőfej két vezetéken keresztül (amelyből az egyik a test) csatlakozzon a mérőgép elektronikájához, ugyanúgy, mint a legegyszerűbb kinetikus TTP-k. Ezzel pl. a Renishaw TTP-kenél (mint a korábbi TP1, a TP2, a TP6 sorozatnál is) szokásos M8, vagy újabban M16×1 menetű (a TP20 típusnál) felfogás egyetlen központi, elszigetelt érintkezőpárral továbbra is megvalósítható volna. Jellemző példával illusztrálja ezt a törekvést a már hivatkozott US 4769919, amelyben mind a kapcsolórendszer, mind a piezó jeleit a tápfeszültségre szuperponálnák; ilyen megoldást vázol pl. a dokumentum 5. ábrája (**21. ábra**). Mivel ezt a konstrukciós elvet mára maga a Renishaw sem tartja abszolút fontosnak (az SP25M alapmodulon, ha jól számoltam, 13 db aranyozott csatlakozópólus van, ahogyan az a 12. ábrán fölül látszódik), én is eltekintettem tőle. Végül a *Touch-Trigger Probe piezo+* négyvezetékes lett, és egy olcsó, ún. négypólusú mikrofoncsatlakozó-páron (MIC 324/334) keresztül tartja a villamos kapcsolatot a külvilággal. Az 1,5 m-es árnyékolt kábel „összenőtt” a mérőfejvel, ezért az automatikus csere kizárt, de hát egy kísérleti, végül amatőr-célú konstrukciónál ez nem is szempont...



21. ábra: US 4769919 5. ábrája

A szimpla, 5 V-os tápfeszültségről üzemelő áramkör (22. ábra) két független jelfeldolgozó csatornára bontható. A TTP kontaktusrendszerét az R101, LED101, R102 áramkörbe iktatjuk be. Egy „közöséges” anyagokból, azaz 6 db Ø4 csapágygolyóból és 3 db Ø3×12 csapágygörgőből összeállított érintkezőrendszer a tapasztalataim szerint akkor működik megfelelően, ha néhány milliampères áramot kell megszakítania. Egy átlagos korszerű piros LED ilyen munkapontban már jól világít, miközben mintegy 1,5 V esik rajta. Az R101-gyel kb. 5 mA-es nyugalmi áramot állítottam be. A kontaktus nyugalmi helyzetében az IC101 Schmitt-trigger bemenetét L-re húzza, így a SOT-23/5 tokozású „egykapu” kimenete magas szinten van. A kontaktusbontás során annak átmeneti ellenállása folyamatosan, de igen gyorsan nő (hiszen kinematikus rezisztív mérőfejről van szó), és amikor a rajta eső feszültség eléri a Schmitt-trigger nagyjából 3,5 V-os felső küszöbszintjét, a kimenet L-re vált, majd a kontaktus újbóli záródása során, amikor a feszültség ismét csökken, az áramkör hiszterézise folytán úgy 1,5 V tájéka visszabillen H-ra. Az R102 garantálja a Schmitt-trigger bemenetének korrekt magas szintjét, amikor a TTP szakadást mutat. (Az előfeszítetlen LED nagyon nagy átmeneti ellenállása erre önmagában nem lenne képes.)



22. ábra: A jelkondicionáló áramkör kapcsolási rajza

Az IC101 CMOS kimenete alkalmatlan volna egy 1,5 m hosszúságú, határozatlan impedanciájú kábel meghajtására úgy, hogy a másik végén a jelek fel- és lefutóelei meredeksége ne legyenek elfogadhatatlanul

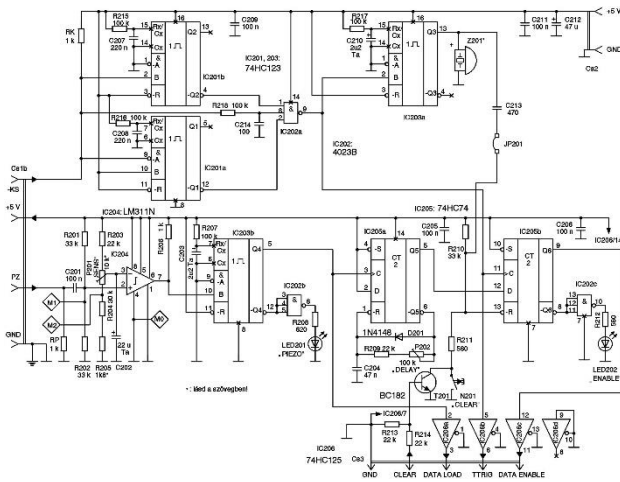
„lankásak”. Ezért iktattuk be a T101 emitterkövetőt, amely a fogadó oldalon az RK, 1 kohmos felhúzóra dolgozik. Nyugalmi állapotban a -KS ponton a feszültség 5 V, ami aktiváláskor +0,7 V-ra csökken, amit a jel-előfeldolgozó áramkör (5.2. pont) CMOS bemenetei alacsony szintként érzékelnek. Az R103 „0 ohmos” ellenállásra csupán nyáktopológiai okból volt szükség. Az R101-et érdemes úgy megválasztani, hogy a LED-en átfolyó áram közel azonos legyen az RK-n átfolyóval, mert így az átkapcsolás során a kapcsolóáramkör összefogyasztása nem ingadozik.

A kapcsolási rajz alsó áramköre egy nagy bemenőimpedanciájú feszültségerősítő, a PZ101 gyorsulásérzékelőhöz illetve a T102 hagyományos, TO-92 tokozású alkatrész, mert ilyen állt rendelkezésre, de ezt is felületre szereltem, a lábait meghajlítása és rövidre vágása után. A FET-es fokozat feszültségerősítése kicsit több mint négyszeres, a T103 közös emitteres fokozat nagyjából kétszeres, míg az emitterkövetős kimenet közel egységnyi. A DC-csatolt erősítőlánc összerősítése így kb. nyolcszoros. A kábel másik végénél a PZ kimenetre csatolt RP ellenálláson jelmentes állapotban mintegy +2,8 V-os nyugalmi DC szint mérhető. A gyorsulásérzékelőn egy-egy erősebb ütés jellegű gerjesztés hatására akár voltos nagyságrendű feszültség is felléphet, ami a FET-et károsíthatná. A D101, D102 antiparalell diódapár ezeket eliminálja. A normál működésre nincsenek hatással, mert olyankor néhány millivoltos - tíz millivoltos jelek keletkeznek. Beállítást csak az R106 igényel: olyan értékűt kell választani, amelynél $U_{PZ} + 2,5 \dots 3$ V közé esik.

Mivel a rendelkezésre álló hely eléggé szűkös volt, a nyákterv kialakításakor sokat „sakkoztam” az alkatrészekkel (20. ábra).

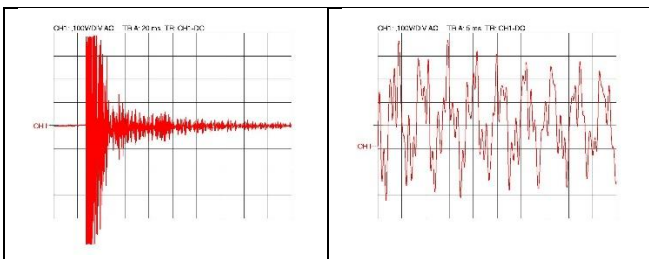
6.3 Jel-előfeldolgozó áramkör

A beépített gyorsulásérzékelő már nagyon kis ütést, rezgést is „észrevesz”. Elég, ha megkocogtatjuk a tapintóházat, vagy akár egy-egy erősebb hanghatás éri a rendszert, máris előállhat a triggerjel. (A nyúlásmérő bélyeges konstrukció előnye éppen az, hogy nem kényes ilyen jellegű zavarokra, ezért lehetett a TTP-kapcsolórendszer kihagyni. Létezik viszont szabadalom a tapintószárba beépített rezgéscsillapításra: US 6370788 B1, bár ilyenrel a valóságban nem találkoztam.) Hogy a környezeti zajtranziensek miatt a piezós TTP-vel való mérés során se keletkezzen hamis adat, a kiértékelő elektronika a piezocella jelkondicionálójáról érkező státuszjel hatására azonnal elmenti ugyan a mérőegységek koordinátaadatait – végül is ez az egész dolog célja –, de csak akkor érvényesíti azokat, ha néhány milliszekundumon belül a golyós/pálcás rendszer kontaktusbontást jelez. Ez így leírva egyszerűnek tűnik, de Murphy általam már többször idézett, konstruktőröknek címzett mondása – „Semelyik műszaki probléma sem olyan egyszerű, mint amilyennek az első pillanatban látszik.” – ezúttal is beigazolódtott: elegendő a 23. ábrára tekinteni, amely a kísérleti jel-előfeldolgozó rendszer teljes kapcsolását mutatja!



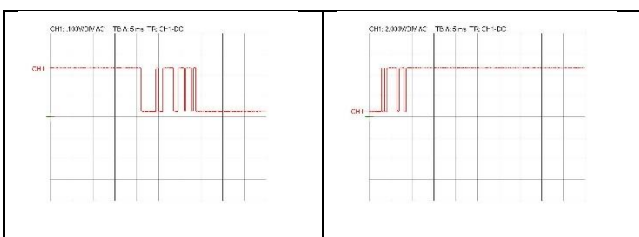
23. ábra: Kísérleti jel-előfeldolgozó rendszer teljes kapcsolása

A fő problémát két jelenség okozza. Az egyik a piezolapkát tartalmazó mechanikai rendszer felépítéséből ered. Ez rugókat, tömeget és csillapításokat tartalmazó mechanikai impedanciát megtestesítő egység, aminek ugyanúgy van sajátfrekvenciája és vannak veszteségei, mint az induktív, kapacitív és rezisztív tagokból álló rezgőkörnek. Az érzékelő az ütésszerű mechanikai gerjesztés hatására csillapodó rezgést végez, amit a **24.a ábrán**, egy részletét kinagyítva a **24.b ábrán** láthatunk (a mérés egy *PZ* ponton történtek). A mechanikai rezgőrendszer sokkal összetettebb annál, mintsem hogy egy egyszerű rezgőkörrel modellezni lehetne: a gerjesztés hatására egyidejűleg több rezgési módus áll elő.



24. ábra: Csillapodó rezgés

A másik kellemetlen jelenséget a TTP kontaktusrendszerének pergése okozza, ami a *-KS* ponton mind a megszakítás közben (**25.a ábra**), mind az alaphelyzetbe történő visszaállítás során (**25.b ábra**) jelentkezik. Ez utóbbi többek között azért különösen kellemetlen, mert a két pergéses jelváltás között meghatározatlan idő telik el pláne abban az esetben, ha kézi mozgatású koordináta-mérőgépen történnek a letapintások.



25. ábra: TTP kontaktusrendszerének pergése

Ha mindkét kimenet összetett jeléből sikerül korrek, egyetlen impulzusból (a *-KS* esetén az impulzus szélessége néhány száz milliszekundumtól akár több másodperc is lehet) álló jelet generálni, akkor az áramkör további fokozatai már nem jelentenek problémát. A korábban hivatkozott EP 0420416 A2 számú szabadalom például komplett kapcsolási vázlatot közöl egy piezóval kiegészített TTP jelfeldolgozására, de a fenti problémákat nagyvonalúan elkerüli: a pergések, lengések megszüntetésére szolgáló áramköri részleteket csupán blokkokként jelöli.

Visszatérve a 23. ábrára: az előfeldolgozás is két csatornán történik. A *-KS* formált kontaktusjelet pergésmentesíteni kell. A hagyományos, RC-tagból és Schmitt-triggerből álló egyszerű áramkörök ide nem alkalmasak, mert milliszekundumos késleltetés engedhető csak meg, miközben a pergés periódusideje eleve néhány milliszekundum. Pergésmentesítőknak a következő kritériumoknak kell eleget tennie:

- az első lefutó impulzusélt minél kisebb késleltetéssel vigye át,
- küszöbölje ki a kontaktusok okozta pergéseket,
- invertálja a kapcsolójelet, mert a pergésmentesítőt követő D-flipflop beírásához **L** → **H** impulzusél szükséges.

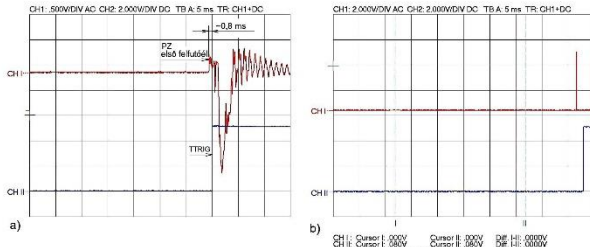
A feladatot két újraindítható monostabilon (IC201) és az IC202a kapun alapuló részlet oldja meg. Nyugalmi állapotban, amikor *-KS* = **1**, az IC 201 *-Q1* és *-Q2* kimenete is **H** szintű, így a kapu kimenete **L**-en van. A *-KS* első **H**→**L** váltásakor az IC201a bebillen, és mivel újraindítható és az időzítőelemei sokkal nagyobb kvázistabil időt határoznak meg, mint a pergés periódusideje, *-Q1* mindaddig alacsony szintű marad, amíg a pergés tart. Ugyanez mondható el IC202-ről, csak azt az **L**→**H** élek billentik be, és a *-Q2* lesz **L** szintű. Mivel az IC202a kimenete mindaddig **H** szintű lesz, amíg bármelyik bemenete **L**-en van, az első lefutó éltől az utolsó felfutóig (+ IC202b kvázistabil idejéig) elvileg egyetlen, folyamatosan magas szintű impulzust kapunk. Hogy ne legyenek benne a monostabilok belső késleltetése miatt „lyukak”, a kapu közvetlen bemenetét az R218, C214 taggal mikroszekundumos nagyságrendben késleltetjük. Ezzel a fenti követelményrendszernek eleget tettünk.

Az IC203a monoflopot a formált impulzus felfutó éle billenti be, és a Z201 aktív piezosugárzót működteti, a TTP-s mérésénél szokásos rövid, kb. 100 ms időtartamú sípólást előállítandó.

A piezocsatorna *PZ* jelét, kapacitív leválasztás (C201) után az IC204, nyitott kollektoros komparátor fogadja, amely az R206 felhőzóra, mint munkaellenállásra dolgozik.

A komparátor referenciaszintjét az R203, P201, R204, R205 feszültségosztó állítja be az invertáló bemenetén. Az R205-öt úgy kell megválasztani, hogy a trimmer leszabályozott állásában a 3. láb potenciálja 0 ±0,05 V legyen a 2. lábéhoz képest. Ekkor a P201-gyel kb. 0...0,8 V-os referenciaszint állítható be. Ha olyan kerámialapkát sikerült megszerezni, amelyik ellentétes polaritású jelet generál, a komparátor két bemenetét egyszerűen cseréljük meg!

A komparátor kimenetén egy 5 V amplitúdójú négyszögbörszt jelenik meg (pontosabban: az alacsony szintje +0,2 V, a magas 5 V), valahányszor a gyorsulásérzékelőt kellő mértékben gerjesztették, azaz a PZ lecsengő amplitúdója egy vagy több perióduson keresztül meghaladja a 100 mV-ra beállított komparálási szintet (**26.a ábra**). Hasonló késleltetést mutat a **26.b ábra**: itt a piros görbe felvétele az IC204 kimenetén történt.



26. ábra: Komparátor kimenete

A rezgéskép meglehetősen sztochasztikus, így a komparátor kimenetével egy eléggé nagy, mintegy 100 ms kvázistabil idejű, újraindítható monoflopot (IC203b) triggerelünk. A monoflop Q4 kimenetén már egyetlen impulzust kapunk, aminek a felfutó éle nagyon kis késleltetéssel a börszt első élénél áll elő. A monostabil bebillent állapotát az IC202b által meghajtott LED201 jelzi a felhasználónak. A végső soron PZ első felfutó éle által kiváltott DATA LOAD (adatbeíró) jelet az IC206a vonalmeghajtó küldi ki a mérőgép vezérlőegységének.

Kapcsolási vázlatunk alapját az IC205 képezi, mert ez valósítja meg a jelzésel fogadás alapelvét: a piezóz csatorna parancsára elmentett adatot csak akkor érvényesíti, ha a kontaktuscsatorna egy megadott időablakon belül aktiválódik. A működése elve azonos az [1] jel-előfeldolgozó áramkörében szereplő hasonló részlethez, csupán a tényleges kapcsolás tér el attól. Mivel ebbe a fokozatba nem kell újraindítható monoflop, egy szokatlan, ritkán használatos monostabilt alakítottam ki az IC205a D-flipflopból. Ez a C bemenetén billen be, az impulzus L→H élénél. Ekkor a D bemenet stabil H szintje íródik be a regiszterébe, a -Q5 L-re vált. A D201-en át előzőleg gyorsan a tápfeszültség közelébe feltöltött C204 elkezd küldeni az R209, P202 soros tagon át. Amint a kondenzátor feszültsége elérte a -R bemenet küszöbszintjét, a tároló resetelődik. Közben a Q5 kimeneten a P202 állásától függően egy kb. 0,8...4 ms szélességű impulzus keletkezik: ez az említett időablak. Az impulzust a D bemenetre vezetjük.

Amennyiben ezen időtartam alatt a C bemenetre megérkezik a formált kapcsolóimpulzus felfutó éle, az IC205b-be H szint íródik, ellenkező esetben a Q6 alacsony szinten marad. A Q6 magas szintje engedélyezi a DATA LOAD által előzőleg elmentett adatok (azaz az X, Y, Z koordinátaértékek) mérési adatként való elfogadását a koordináta-mérőgép vezérlése számára. A DATA ENABLE jelet az IC206c küldi ki, közben az IC202c-n keresztül aktiválódik a D202 LED.

Az IC205b-t az adat elfogadása után alaphelyzetbe kell állítani. Ezt maga a jel-előfeldolgozó egységünk is meg tudja tenni, ha a JP201-et felhelyezzük. Ilyenkor az IC203a Q kimenetének a „sípsozó” végén, tehát a kontaktusbontás után nagyjából 0,1 s-mal végbemenő L-re váltása a C213-on át törli az IC205b-t. Külső resetre is

lehetőség van: a mérőgép vezérlése a CLEAR impulzussal törölhet, a T201 segítségével, de a felhasználó is megnyomhatja az N201 gombot. (Utóbbi az áramköri kísérletek során volt különösen hasznos.)

A TTRIG jelet olyan lassú megközelítés esetén használja fel a mérőgép vezérlése, amikor a PZ kimeneti impulzusai nem érik el komparátor küszöbszintjét, de végül az érintés megtörtént.

Az áramkört csak dugaszpanelon raktam össze, hogy a beállítási adatokat kikísérletezhessenem, nyáktervet nem készítettem hozzá. A végleges rendszer mikrokontroller alapú, természeténél fogva a bemutatottnál sokkal egyszerűbb kapcsolású [18]. A kellő reagálási sebesség a kontrollerchipse integrált CLC-knek (Configurable Logical Cell) köszönhető.

A két trimmer beállítása különös odafigyelést igényel. A P1-el olyan érzékenységre kell venni a piezorendszert, hogy ne okozzon sűrűn „vakriasztást”. Ez a tapasztalataim szerint minimum +50 mV-os komparálási szintet jelent. A P2-vel a várakozási időt úgy kell beállítani, hogy a 26.b ábra szerint az első felfutó impulzusél még beleferjen, de a második már ne. A beállítások erősen függenek a konkrét mérőfej alkatrészeinek méreteitől, felerősítésének módjától, környezetétől.

7 KÉT KURIÓZUM

Végezetül két nagyon érdekes honlapra hívom fel a TTP-k iránt érdeklődő kedves olvasó figyelmét. A [19] részletes tanulmány ismerteti a jelen cikkben is szereplő gyári tapintókat, majd bemutat több, *mágneses érzékelőkön* alapuló saját, nagyon érzékeny konstrukciót. A tapintószár ezekben rugómembrános tájolású. A saját tervezésű rugómembránok számos változatát szemlélteti, és mind ezeknek, mind a mágneses érzékelőrendszereknek, mind az elkészült tapintófejek hibáinak komoly matematikai analizisét adja.

A [20] egy Michelson-interferométeren alapuló kísérleti mérőfejről számol be, amelynek fő optikai egységét CD-meghajító olvasófejből képezték ki. A miniatűr tapintófejet különleges szálak tájlojják, a mozgó egységben öt apró síktükör is van.

Tág tere nyílik a kísérletezésnek, ezen a területen is!

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] <http://www.cnczone.nl/viewtopic.php?f=22&t=4157&hilit=touchprobe>
- [2] <https://patentimages.storage.googleapis.com/28/24/cb/814a38d5bc648e/US4153998.pdf>
- [3] Pálinkás Tibor: Érintkezőstátusz inductív átvitele; Rádiótechnika 2009/11., p. 638-639.
- [4] Renishaw: TE411 Innovations in touch-trigger probe sensor technology
- [5] Woźniak, A., & Dobosz, M. (2003). Metrological feasibilities of CMM touch trigger probes. Part I: 3D theoretical model of probe pretravel. *Measurement*, 34(4), 273-286.
- [6] <http://www.practicalmachinist.com/vb/cnc-machining/anyone-been-inside-renishaw-probe-246715/>
- [7] <http://www.measurement.sk/2013/Wozniak.pdf>
- [8] Pálinkás Tibor: A precíziós érintkezőpár; Rádiótechnika 2017/10., p. 334.
- [9] Katona Zoltán: A Rádiótechnika fejtetői versenye; Rádiótechnika 1967/2., B3
- [10] Pálinkás Tibor: Kontaktusolaj; Rádiótechnika 2012/9., p. 410.
- [11] <http://gtocs.blogspot.hu/2012/04/garys-diy-cnc-touch-probe.html>

- [12] <http://www.renishaw.com/en/rengage-technology--13953>
- [13] Pálinkás Tibor: Érintkezős tapintófej, infravörös státuszátvitellel; *Rádiótechnika* 2016/1., pp. 6-8; 2016/2., pp. 43-46; 2016/3., 92-94.
- [14] Renishaw: H-2000-8309 High-accuracy machine tool probes with RENGAGE technology
- [15] Pálinkás Tibor: Optoelektronikai TTP; *Rádiótechnika Évkönyve* 2019, pp. 138-157.
- [16] <https://www.nikonmetrology.com/Download/Touch-probe>
- [17] Pálinkás Tibor: Kondenzátor-hegesztés (gyakorlati példa); *Rádiótechnika* 2016/3., p. 88., 89.
- [18] Kőnig Imre: A TTP Piezo+ és az álrúhás hardver; *Rádiótechnika* 2017/2., p. 54, 55; 2017/3., pp. 83-85.
- [19] <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12609112/index.pdf>
- [20] Li, R. J., Fan, K. C., Tao, S., Qian, J. Z., Huang, Q. X., & Cheng, F. (2011, November). Design of an analogue contact probe for nano-coordinate measurement machines (CMM). In *Seventh International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation* (Vol. 8321, pp. 286-293). SPIE.