

# OT-3 optoelektronikai TTP

## OT-3 optoelectronic TTP

Pálincás Tibor, gépészmérnök

Óbudai Egyetem, BGK, Gépészeti és Technológiai Intézet

ptibor723@gmail.com

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

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

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

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

### 1 ELŐZMÉNYEK, ÚJABB GYÁRI MEGOLDÁSOK

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

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

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

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

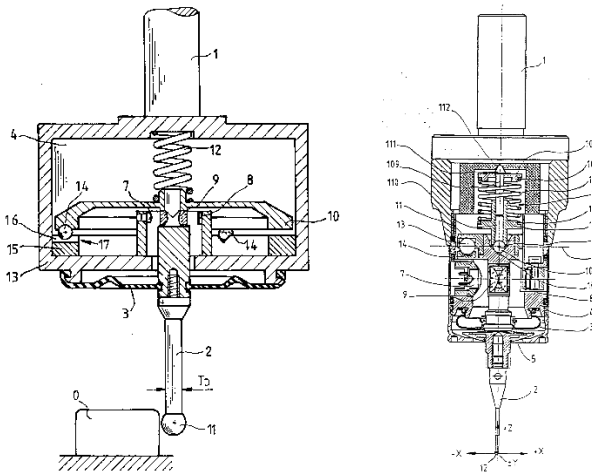
Eredetileg nyúlásmérőbélyeges átalakítóban gondolkodtam, amihez a Renishaw MP, ill. OMP sorozata adta az inspirációt, bár az én konstrukcióm másképpen nézett volna ki. Az [1]-ben az említett gyári tapintófejekkel kapcsolatban még így fogalmaztam: „A küllőkre egy-egy szilícium (piezorezisztív) nyúlásmérő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



1. ábra: Mikromechanikai nyúlásmérő elem (Renishaw)

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

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

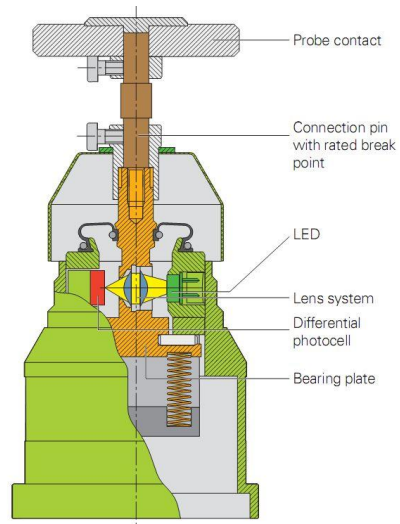


2. ábra: Optoelektronikai elvű TTP (Heidenhain szabadalmi leírásokból)

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

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

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



3. ábra: A Heidenhain TT-460 TTP hosszmetsete

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

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

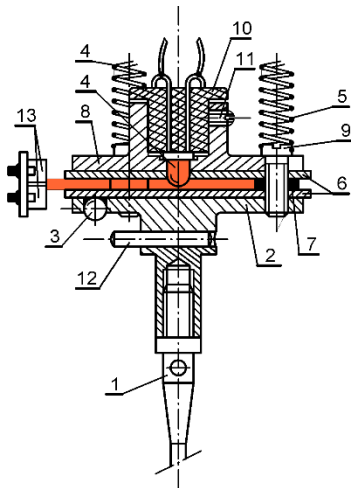
A szükséges optikai elemek beszerzése és korrekt beépítése, beállítása is problémát okozna az amatőr utánépítőnek, bár lézerdíódához való, polikarbonátból készült aszférikus kollimátorlencsék beszerezhetők. Rádásul nagyfelületű kettős fotodióda sem volt nálunk e cikk írásának idején kereskedelmi forgalomban.

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

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

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

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



4. ábra: Az OT-3 mozgó egységének hosszmeteszete

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

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

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

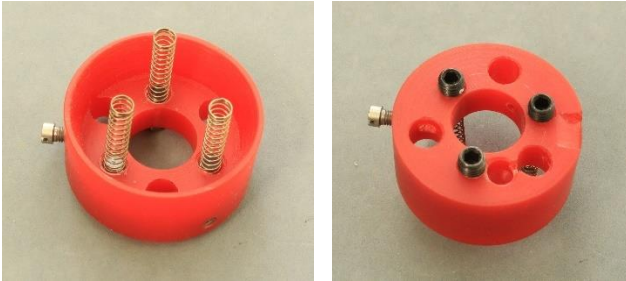
A LED fénye a felső tükrő tengelyében készített furaton lép be a részbe, fénye a tükröző felületeken sokszorosan visszaverődik – ez kicsit hasonló a fényvezető szálak belső fényterjedéséhez – és körben kilép, egy 1,5 mm-es, meglehetősen homogén fényeloszlású „fényhengert” alkotván. Ezt mértem, bár a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

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



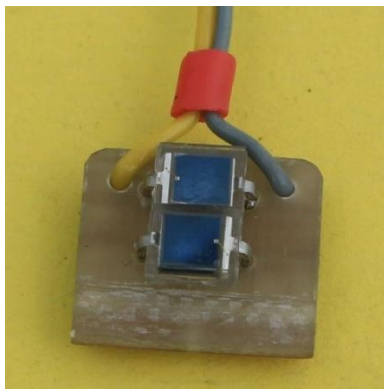
túlságosan nagy elfordulását korlátozza szárcsere esetén, de a normál mozgásában nem gátolja.

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



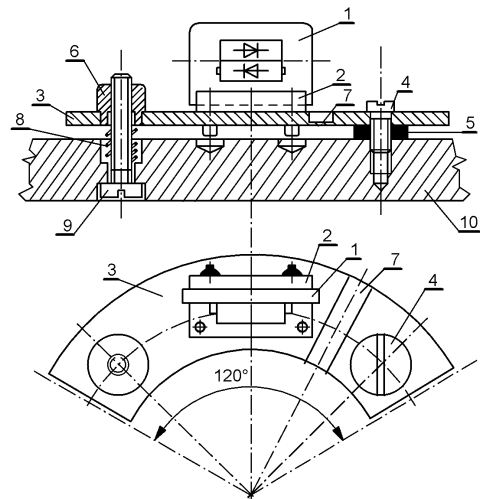
5. ábra: Háromrugós erőgenerátor műanyagtömbje

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



6. ábra: Elmozdulásérzékelő fotodióda-pár

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



7. ábra: A finomállító mechanika vázlatja

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

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

védőharmonika körül pedig a három finomállító csavar látszik.

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



8. ábra: Három görgőpáros ülészerelvény



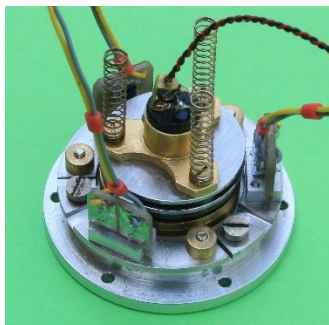
9. ábra: A „fénghenger” előállító elemek, összeszerelés előtt



10. ábra: Összeszerelt mozgó egység



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



12. ábra: A TTP aktív szerelvénye



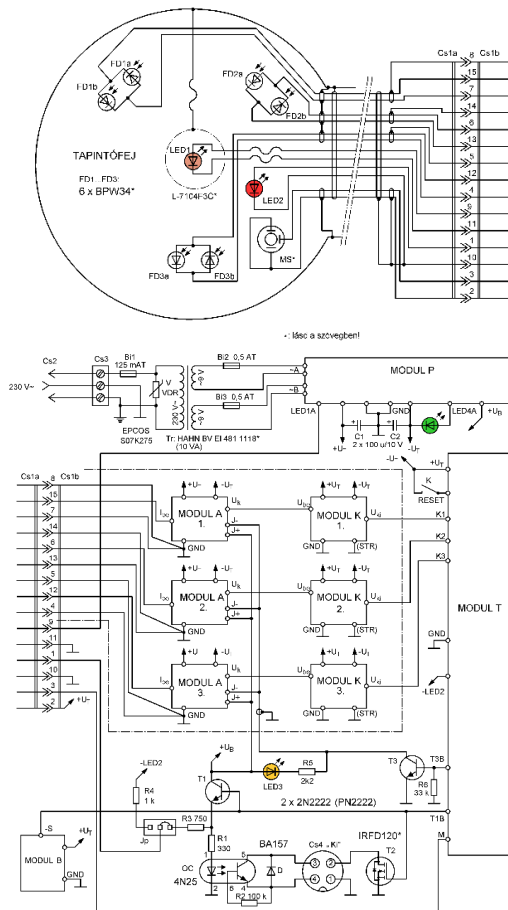
13. ábra: Szennyeződésektől védő, egyben fényzáró rugalmas védőharmonika

### 3 AZ OPTOELEKTRONIKAI TTP JELKONDITIONÁLÓ ÁRAMKÖRE

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

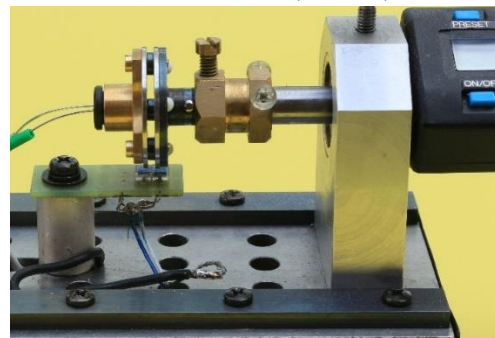
Az összefüggési kapcsolási rajz bal oldalán magát a TTP-t, pontosabban az abba beépített, az elektronikához kapcsolódó eszközöket tüntettem fel. Középen van az infravörös LED1, körülötte a három antiparalel fotodióda-pár. A LED2 a TTP-kenél szokásos beépített státuszjelző. Az MS miniatűr mozgásérzékelőről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

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



14. ábra: Az elektronikai rendszer összefüggési kapcsolási rajza

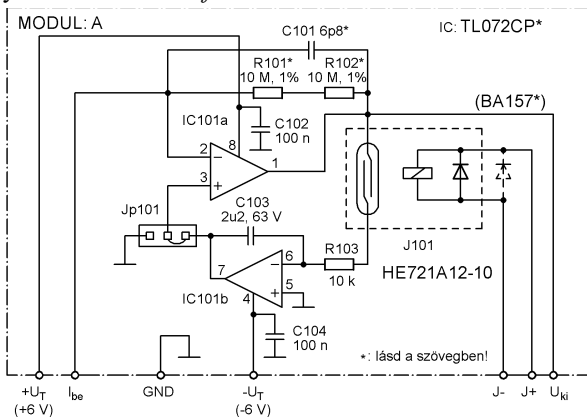
következik, hogy ha a fénysáv megvilágítottsága homogén, akkor ez az egyszerű rendszer akár elmozdulás, vagy finomtapintónak kiképzett mechanikai elrendezés esetén méreteltérés meghatározására is alkalmas. Az elmozdulás-kimenőfeszültség-karakterisztika egy adott szimmetrikus elmozdulás-tartományban lineárisnak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



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

### 3.1 Fotoáram-erősítő (MODUL – A)

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



15. ábra: A fotoáram-erősítő kapcsolási rajza

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



17. ábra: A mérési összeállítás fényvédő papírburkolata

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





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

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

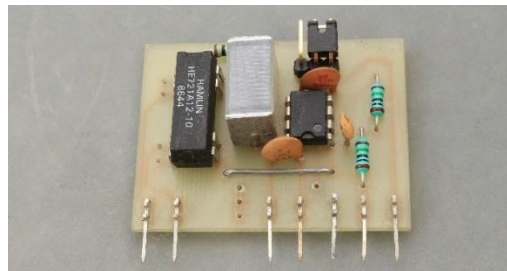
Megfigyelhetjük, hogy az IC101b, a C103 és az R103 egy integráló szabályozót alkothat. Tétélezzük fel, hogy a tapintófej nyugalomban van, amikor is az  $U_{ki}$  ponton a jelfeszültség – amelynek ilyenkor 0-nak kellene lennie – mégsem nulla! Ha most a J101 kontaktuspárja rövid időre záródik, akkor a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

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

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

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

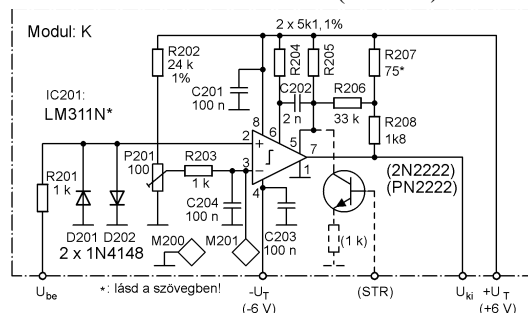
A Jp101-nek a beállítás során lesz szerepe; segítségével a szabályozókör ideiglenesen kiiktatható, és a főerősítő neminvertáló bemenete közvetlenül 0-ra köthető. A C101 optimális értékét ki kell kísérletezni; erről a 4.1. fejezetben lesz szó. Ebből a modulból természetesen 3 darabra van szükség. Az egyik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



19. ábra: Az egyik fotoáram-erősítő modul fényképe

### 3.2 Komparátormodul (MODUL K)

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



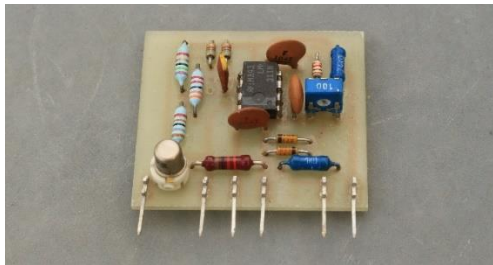
20. ábra: A komparátormodulok kapcsolási rajza

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

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

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

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



21. ábra: Az egyik komparátormodul fényképe

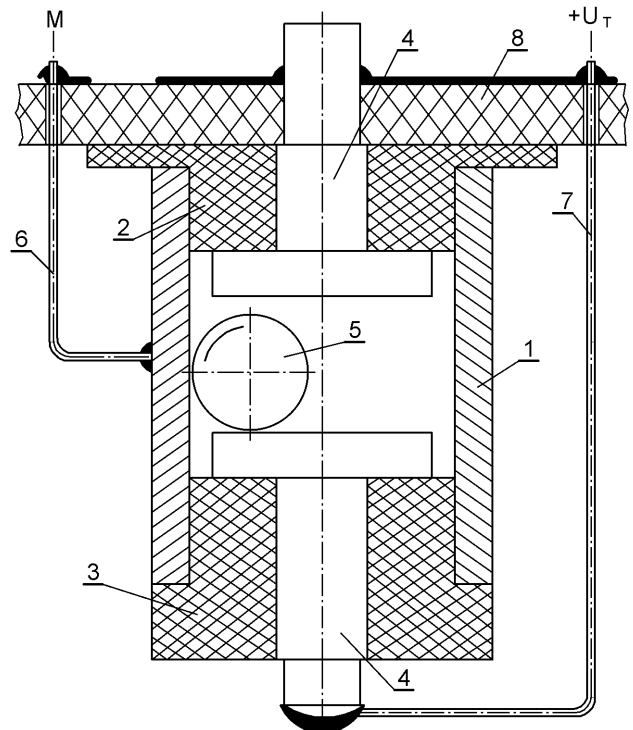
### 3.3 Ciklusidőzítő (MODUL T)

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

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

#### 3.3.1 Mozgásérzékelő házilag

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



22. ábra: A mozgásérzékelő hosszmeteszete

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

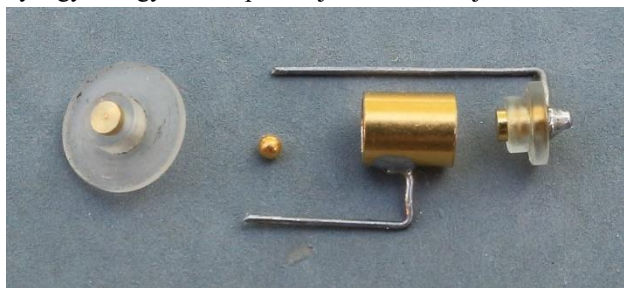
Alapvetően az a probléma ezzel a szerkezettel, hogy a golyó súlyából és a mozgás közbeni tömegerejéből adódó, a kontaktusfelületekre redukált erők olyan kicsik, hogy még korróziómentes acélból készült csapágygolyó esetén sem kapunk megfelelő érintkezést, ezért elkerülhetetlenek az aranyozott érintkezőfelületek.



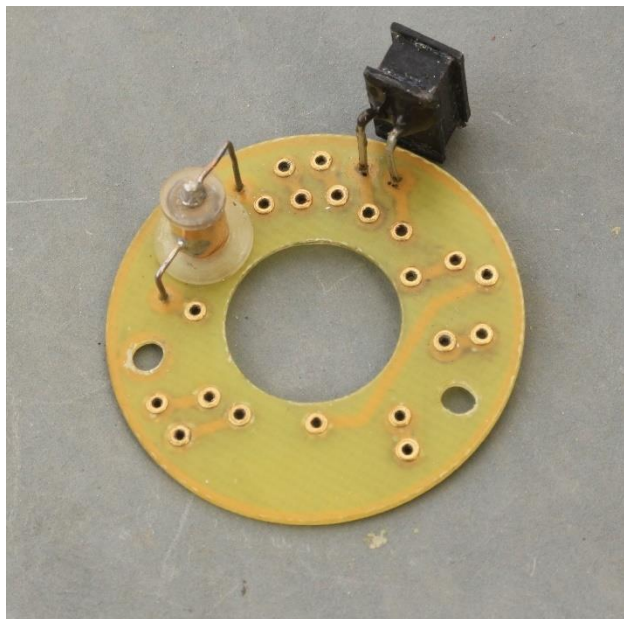
Megjegyzem, hogy a különböző külföldi kereskedők kínálatában szerepel viszonylag olcsó, bár a saját fejlesztésünél kissé nagyobb méretű érintkezőgolyós elmozdulásérzékelő, az SW-520D. Ez egy érdekes, 2 szabadon mozgó golyóval működő szerkezet, de a mi céljainkra valószínűleg nem alkalmas. Mint a megnevezése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

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

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



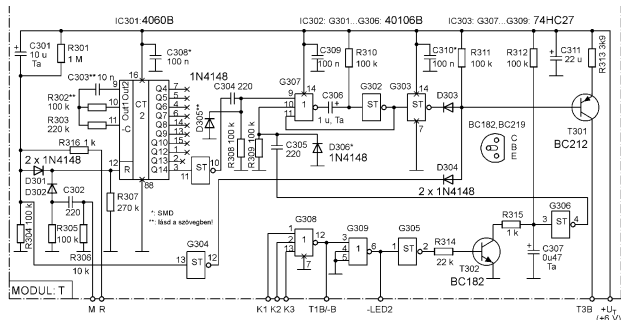
23. ábra: Mozgásérzékelő, összeszerelés előtt



24. ábra: A nyomtatott áramkört gyűrűbe ültetett mozgásérzékelő

### 3.3.2 A ciklusidőzítő modul működése

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



25. ábra: A ciklusidőzítő modul kapcsolási rajza

A kb. 40 s periódusidejű négyszögjelet az IC301 négyszöggenerátor + bináris osztólánc állítja elő, az R302, R303, C303 időzítőtag segítségével. A 40 s periódusidő előállításához magának az oszcillátornak névlegesen 409,6 Hz-en kellene rezegnie, amiből az utolsó osztófokozat a Q14 kimeneten (1:16 384 leosztás után) állítaná elő az 1/40 Hz-es szimmetrikus jelet. Bekapcsolás után az R304, C301 tag gondoskodik arról, hogy a 12. láb (*Reset*) egy időre **H**-ra kerüljön. Az időzítő tag a D301, D302, R307 diódás VAGY-kapu egyik bemenetén keresztül hat az *R* (*Reset*) bemenetre. Ezen időtartam alatt az oszcillátor inaktív, és az összes osztófokozat kimenete **L**. Az R301 kikapcsolás után lassan kisüti a C301-et.

Amint a *Reset* láb szintje **L** lesz, az oszcillátor elindul, és elkezdődik az időszámítás. 20 s elteltével a Q14 **H**-ra, a G301 kimenete **L**-re vált. Újabb 20 s múlva a G301 kimenetén ismét **H**-ra ugrik. Az **L**→**H** él hatására a C304, R308 differenciáló tag kimenetén, azaz a G307 9. lábán egy pozitív tüske keletkezik. Ez indítja a G307, G302, C306, R310 reléidőzítő monostabilt. Ekkor a G302 kimenetén egy kb. 80 ms-os pozitív négyszögimpulzus jelenik meg, amit a G303 invertál.

Ez utóbbi impulzus a D303, D304, R311 diódás ÉS-kapu egyik bemenetét erre az időre alacsony szintre húzza, miáltal a T301, R313 áramgenerátor 1,25 mA-es áramot folytat a T3B kimeneten át a T3 kapcsolófokozat báziskörébe. Közben az emittere és kollektora között 0,35 V mérhető, tehát tényleg analóg módban üzemel. A T3 telítésbe vezérlődik, és mindhárom MODUL A reléjét 90 ms-ra meghúzatja. Ez az időtartam normális esetben bőségesen elegendő a fotoáram-erősítők millivoltos nagyságrendű nullkorrekciójához. A műveletet az előlapi LED3 felvillanása jelzi.

Ez az áramgenerátoros meghajtás némi magyarázatot kíván. Eredetileg úgy képzeltem, hogy a T3 emittere -6 V-on lesz, a *J+* közösített pont pedig +6 V-on. Később jobbnak láttam a fent ismertetett megoldást, hogy a stabilizátorokat ne terheljem feleslegesen a jelfogók gerjesztésének viszonylag nagyáramú tranziensteivel. A MODUL T addigra elkészült, és nem kívántam már átalakítani.

A rendszer üzembe helyezésekor a nullhiba szélsőségesen nagy lehet, akár valamelyik tápfeszültséget is megközelítheti. Ezért a bekapcsolási *reset* során a G304 kimenete mintegy 600 ms-ra **L**-re kerül, amely szint hatására, a diódás ÉS-kapu másik bemenetén keresztül, az

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

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

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

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

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

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

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

A tapintószár nyugalmi helyzetében tehát a G308 kimenete **H**, a G309-é **L**, a G305-é iamét **H** szintű. A T302 ilyenkor telítésben van, invertál, így a kollektora alacsony szintű (az R312/R315 elvileg 10:1 feszültségosztás-aránya ehhez bőségesen elegendő). Közben a G306 kimenete ismét csak **H**, a C307 pedig kisütött állapotban van.

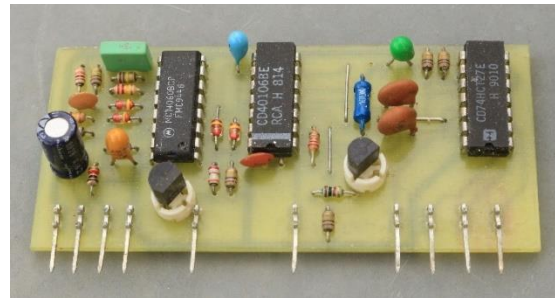
A tapintószár kimozdításakor a T302 lezár, a C307 az R312-n keresztül  $+U_T$ -re töltődik, a G306 kimenete pár milliszekundum elteltével **L**-re vált. Amint a munkadarab felületétől eltávolodik a mérőgömb, ismét helyreáll az alapállapot: a T302 az R315-ön keresztül kisüti a C307-et (közben ismét eltelik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

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

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

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

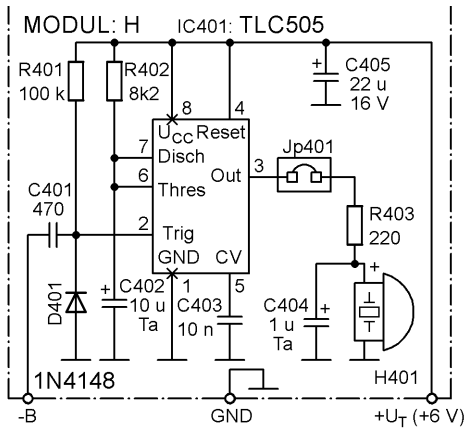
Az elkészült ciklusidőzítő fényképét a 26. ábrán láthatjuk.



26. ábra: A ciklusidőzítő fényképe

### 3.4 Hangjelző modul (MODUL B)

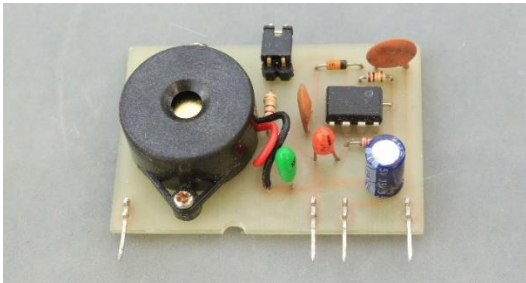
A koordinátamérőgépek és a szerszámgépekhez illeszthető gyári TTP-k jelkondicionálói érintéskor rövid sípoló hangjelzést adnak. A hangjelző modul (kapcsolási rajz: 27. ábra) feladata ennek előállítás, ha netán olyan berendezéshez csatlakoztatjuk tapintófejünket, ami nem generál ilyen hangot. Az egyszerű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



27. ábra: A hangjelző modul kapcsolási rajza

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

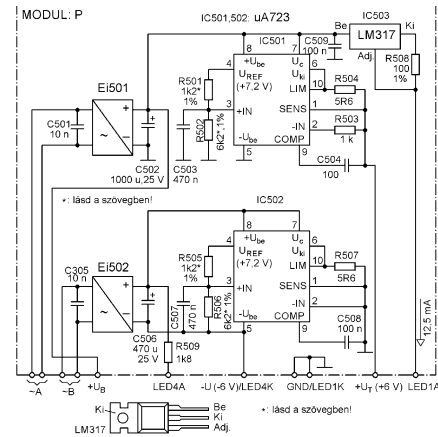
Az egyszerű áramkör a tapintó mozgó részének visszatérésekor keletkező kimeneti tranzienst hatására is generálhat jelzést. Ennek elkerülésére az [1] 24. ábráján szereplő komplex pergésmentesítő rendszert kellene beiktatni a MODUL T T1B pontja és a kimeneti fokozat közé. A mintapéldányból kihagytuk, de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



28. ábra: A hangjelző modul fényképe

### 3.5 Tápstabilizátor modul (MODUL P)

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



29. ábra: A tápstabilizátor modul kapcsolási rajza

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

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

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

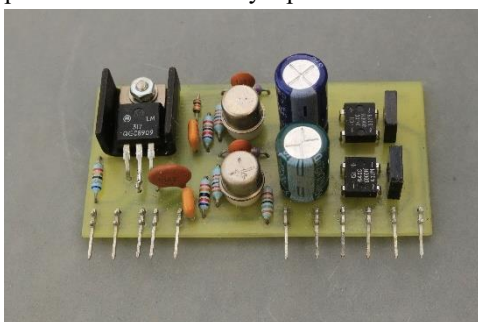


A negatív tápfeszültség terhelése csekély (a prototípusnál 15,5 mA-t mértem), a stabilitása sem kritikus. Csak megszokásból stabilizáltam ezt is egy 723-mal, e helyett egy 78L06, sőt egy 78L05 is megteszi. A 723-as alapú tápágak az R504-nek és az R507-nek köszönhetően már  $I_{lim} = 0,65/5,6 = 0,116$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

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

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

A tápstabilizátor modul fényképét a 30. ábrán láthatjuk.



30. ábra: A tápstabilizátor modul fényképe

### 3.6 Alaplap

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

#### 3.6.1 Dobozolás

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



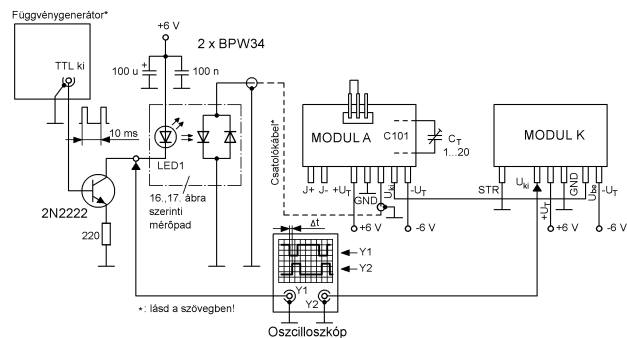
31. ábra: Elektronikadoboz, burkolat nélkül

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

## 4 BEÁLLÍTÁS

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

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



32. ábra: A jelkésleltetés mérési összeállítása

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

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

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

#### 4.2 Az érzékelőrendszer végleges beállítása, ellenőrzése

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

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

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

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

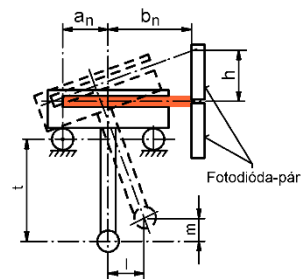
Bár mind az alkatrészek elkészítésénél, mind az összeszerelésük során az elérhető legnagyobb pontosságra törekszünk, a fotodióda-párok lapkái közötti eltérő távolság, az álló- és mozgó rész elkészítési és szerelési pontatlanságai jelentős eltérést okozhatnak a három csatorna eredő átviteli tényezői között.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

Végleges összeszerelés közben a görgős ülőpárokat vonjuk be vékonyan műszerolajjal!

## 5 VÁRHATÓ ÉRZÉKENYSÉG

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

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



33. ábra: A mozgó egység kinematikai vázlata

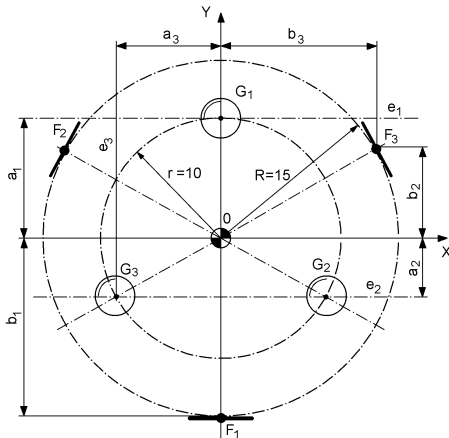
Az elfordulás következtében a két fotodiódát eredetileg egyenlő mértékben megvilágító fénysáv  $h$  mértékben fölfelé elmozdul, előidézve a nullánál nagyobb eredő fotoáramot.

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

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

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

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



34. ábra: Az érzékelőrendszer geometriai viszonyai

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

1. táblázat

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

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

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

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

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

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

$$t_{max} = (a_2 + b_2) \cdot l / h = 12,5 \cdot 1 / 0,2 = 62,5 \text{ mm}.$$

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

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

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

#### IRODALOMJEGYZÉK

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