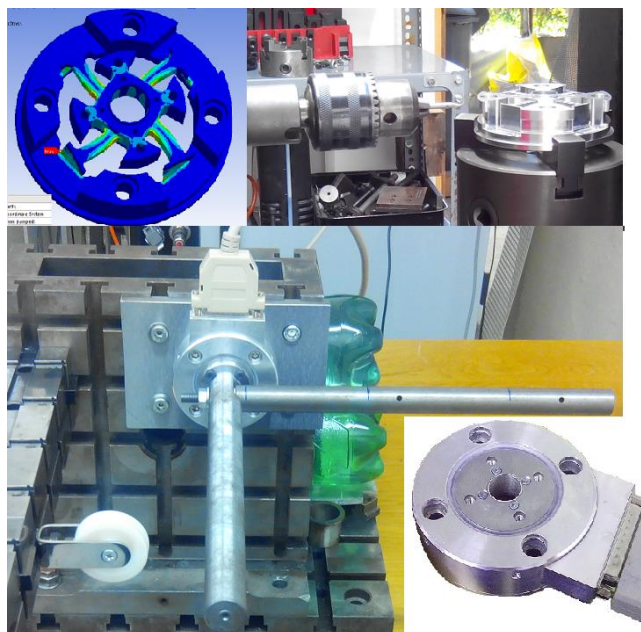


TDK DOLGOZAT

Hattengelyes erő-nyomatékmérő szenzor tervezése, gyártása, kalibrálása



Készítették: Bauer Márk Ottó (I. éves MSc hallgató)
Hodosán Zsolt (II. éves MSc hallgató)

Konzulens: Tóth András (Tudományos munkatárs)

.....
Bauer Márk Ottó

.....
Hodosán Zsolt

Budapest, 2014.

Tartalom

1.	BEVEZETÉS.....	2
2.	SZAKIRODALMI ELEMZÉS	3
2.1.	A TÖNKREMENT SZENZOR ELEMZÉSE	3
2.2.	SZENZORTEST GEOMETRIÁJÁNAK IRODALMI ÁTTEKINTÉSE.....	4
2.3.	NYÚLÁSMÉRŐ ELLENÁLLÁSOK SZAKIRODALMÁNAK ÁTTEKINTÉSE.....	7
2.4.	HATTENGELYES ERŐ- ÉS NYOMATÉKMÉRŐ SZENZOR KALIBRÁCIÓS MÁTRIXÁNAK SZAKIRODALMA	10
3.	SZENZORTEST GEOMETRIÁJÁNAK MEGTERVEZÉSE, LEGYÁRTÁSA.....	11
3.1.	A TERVEZÉS ITERÁCIÓI.....	12
3.2.	A GEOMETRIA MECHANIKAI ELLENŐRZÉSE.....	16
3.3.	SZENZOR ALKATRÉSZEINEK LEGYÁRTÁSA	18
3.4.	GYÁRTÁS SORÁN FELMERÜLŐ PROBLÉMÁK.....	21
4.	AZ ELEKTRONIKA MEGTERVEZÉSE, LEGYÁRTÁSA	23
4.1.	NYÚLÁSMÉRŐ BÉLYEGEK KIVÁLASZTÁSA.....	23
4.2.	A LEGYÁRTOTT SZENZORTEST FELBÉLYEGZÉSE	24
4.3.	ELSŐ ITERÁCIÓBAN TERVEZETT MÉRŐERŐSÍTŐ	27
4.3.1.	A megtervezett mérőerősítő megvalósítása	28
4.3.2.	A megépített rendszer hibái	29
4.4.	MÁSODIK ITERÁCIÓBAN TERVEZETT MÉRŐERŐSÍTŐ	30
5.	SZENZOR KALIBRÁLÁSA.....	35
5.1.	KALIBRÁLÁSHOZ SZÜKSÉGES MÉRŐCELLA BEMUTATÁSA	35
5.2.	A KALIBRÁCIÓS FOLYAMAT BEMUTATÁSA	37
5.3.	A KALIBRÁCIÓS MÁTRIX MEGHATÁROZÁSÁNAK ELMÉLETE	40
5.4.	A KALIBRÁCIÓS MÁTRIX KISZÁMÍTÁSA	43
6.	AZ ELŐÁLLÍTOTT SZENZOROK KIÉRTÉKELÉSE	46
6.1.	MŰSZAKI PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA	46
6.2.	KÖLTSÉGELEMZÉS.....	51
6.3.	ÖSSZEGZÉS	52
7.	TOVÁBBLÉPÉSI LEHETŐSÉGEK	54
8.	SUMMARY.....	55
9.	FELHASZNÁLT IRODALOM.....	56
	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	57

1. Bevezetés

Napjainkban a robotika fejlődése magas kitevőjű exponenciális trendet mutat, mely ágazatban a nagyfokú automatizáltság nélkülözhetetlenné teszi az erő- és nyomaték mérő szenzorok felhasználását. A legtöbb esetben elegendő a terhelő erő-nyomaték vektor egy, maximum két komponensét mérni, de sok esetben előfordulhat, hogy a szabályozni kívánt folyamat megfelelő vezérléséhez több tengely mentén történő, szimultán erő- és nyomaték mérés szükséges. Ipari robotikában szinte kizárólagos megoldás, hogy a szerszám és a szerelőkarima közé szerelt hattengelyes erő-nyomaték mérő szenzorral mérik a szerszámra ható terhelést. Ilyen szenzorok alkalmazásával valósult meg a *REHAROB gyógytornáztató berendezés erőszabályozása* is. Viszont ez utóbbi kategóriába eső szenzorok előállításával és forgalmazásával a világon kevés cég foglalkozik, így ennek megfelelően a piaci árak is elég borsos.

A TDK dolgozatunkban egy olyan hattengelyes erő és nyomaték mérésére alkalmas szenzor fejlesztését mutatjuk be, mely a Műszaki Mechanikai Tanszék és a Gyártástudomány és- technológia Tanszék COSMOSYS projektjében a fentebb említett gyógytornáztató rendszerben vesz részt. A házi fejlesztést az indokolta, hogy egy külső cégtől vásárolt, majd tönkrement szenzort költséghatékonyan és műszakilag a meglévő rendszerhez illeszthetően másképp nem tudtuk pótolni.

A szenzor kifejlesztéséhez szükséges volt első lépésben olyan követelményjegyzéket felállítani, ami a rendszerhez legjobban illeszkedő eszköz előállítását jelenti. Ehhez át kellett néznünk a témához köthető szakirodalmat, illetve a tönkrement szenzor mechanikai és elektronikai elemzését is végre kellett hajtánunk. Az így kapott információkat felhasználva sikerült a saját követelményeinknek megfelelő geometriát és elektronikát tervezni, majd kidolgozni a kalibrációs mátrix meghatározásához szükséges mérési eljárást.

Alvállalkozókon keresztül legyártattuk a bonyolultabb mechanikai alkatrészeket, míg az egyszerűbbeket mi magunk állítottuk elő. A nyomtatott áramkörök elkészítését is külső cégen keresztül oldottuk meg, viszont az elektronikai elemek beültetését szintén magunk hajtottuk végre. A felbélyegzett, bekábelezett, majd összeszerelt szenzor kalibrációs mátrixának meghatározásához a robotvezérlőben elhelyezett, erő adatokat feldolgozó kártya környezetében felépítettünk egy kalibrálásra alkalmas mérőcellát. A kapott nyers adatokat egy számítótáblába importáltuk, amibe a kalibrációs algoritmust előre feltöltöttük.

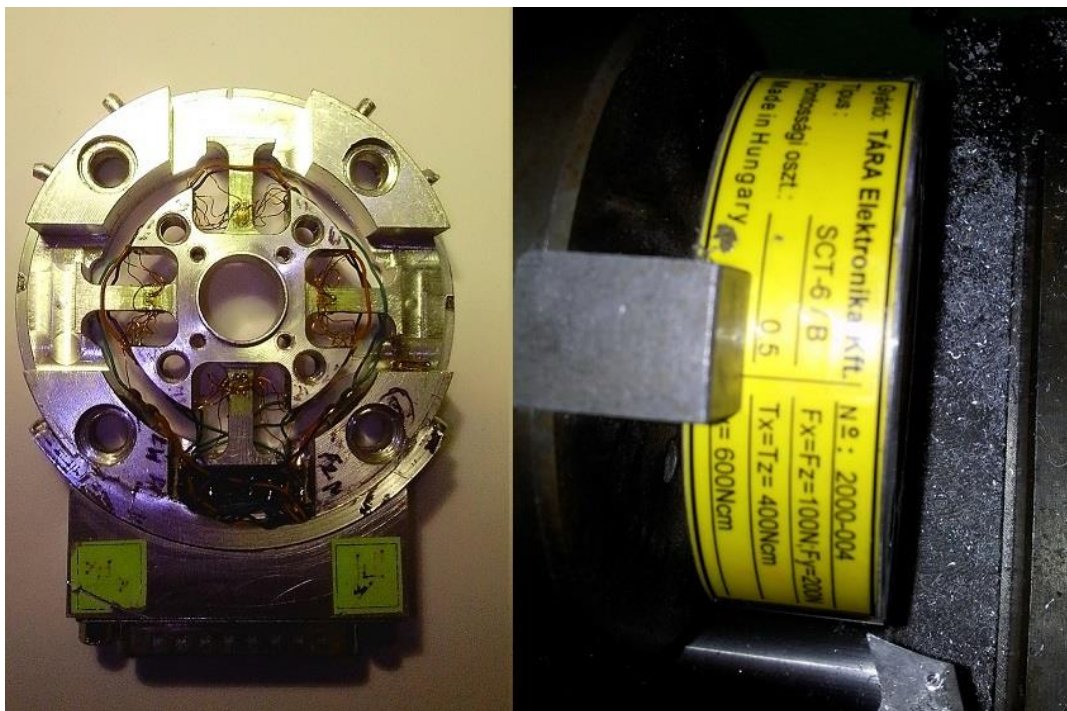
Végül méréssel ellenőriztük a szenzor műszaki paramétereit: a névleges, és a csúcsterheléseket, a linearitást, az ismétlési pontosságot, a felbontást, a tengelyenkénti nullpontkúszást. Költségelemzést végeztünk és elkezdtük a szenzor orvostechnikai tanúsításához szükséges információk összegyűjtését.

2. Szakirodalmi elemzés

TDK munkánk hangsúlyos részét képezte a hattengelyes erő- és nyomaték mérő szenzorok mechanikai- és elektronikai tervezésénél, legyártásánál figyelembeveendő információk összegyűjtését. Első lépésben a Tára Kft. által gyártott, majd tönkrement eszköz szétszerelésével, elemzésével foglalkoztunk. A konstrukció ohmos ellenállás változáson alapuló érzékelő. Számunkra azért volt ez előny, mert azon túl, hogy ez az egyik legkiforrottabb technológia erőérzékelésre, tapasztalattal is rendelkezünk a nyúlásmérő bélyegek felhasználása terén. Ezután áttekintettük a témához kapcsolódó szakirodalmakat és ezek alapján fejlesztettük tovább saját igényeinknek megfelelően a szenzor geometriai és elektronikai rendszerét. Több olyan irodalmat és szabadalmat is találtunk, amelyek segítettek minket a céljaink elérésében.

2.1. A tönkrement szenzor elemzése

A részletes villamos dokumentáció hiánya és a meglévő rendszerhez való megfelelés miatt szükségessé vált a meghibásodott szenzor megismerése. Az 1. ábra a burkolat eltávolítása után a szenzortestet és a gyári bélyegzést mutatja.

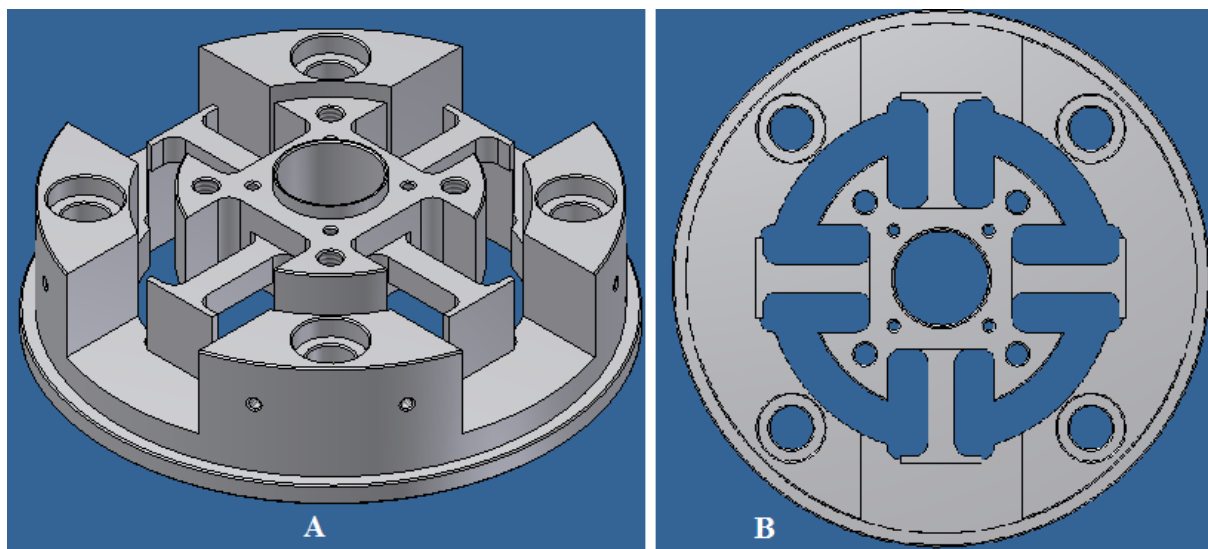


1. ábra A sérült szenzor

Ezt követően hozzáférhetővé vált számunkra a huzalozás és elkezdhattuk az egyes hidak kivezetéseinek egyesével történő, ellenállásmérésen alapuló visszafejtését. A négy oszlop egyenként 6-6 nyúlásmérő bélyeget tartalmaz, melyek páronként teljes hidat alkotnak, így

összesen 12 fél-híd került kivezetésre. Meghatároztuk az egyes fél-hidak és a DSUB-25 csatlakozó lábszámainak kapcsolatát. Irodalomkutatásunk alapján megállapítható [1], hogy az így történő kivezetés - a differenciál mérés alapján - megfelelő jel-zaj viszonyt eredményez hosszú kábelezés esetén is, ami a mi rendszerünkben jelen van.

Az elektronika feltárása után a mechanikai elemzés következett. Első lépésben bedigitalizáltuk a geometriát, a további elemzésekhez elkészítettük a CAD modellt (2. ábra).



2. ábra A létrehozott CAD modell

A geometria jellegzetessége a standard gyártástechnológia (esztergálás, marás). Továbbá átmenőfurattal rendelkezik, mely lehetővé teszi kábelek szenzoron való keresztülvezetését. Az alkalmazott falvastagságok bizonyíthatóan feltételezi egy stabil alapra történő szerelést.

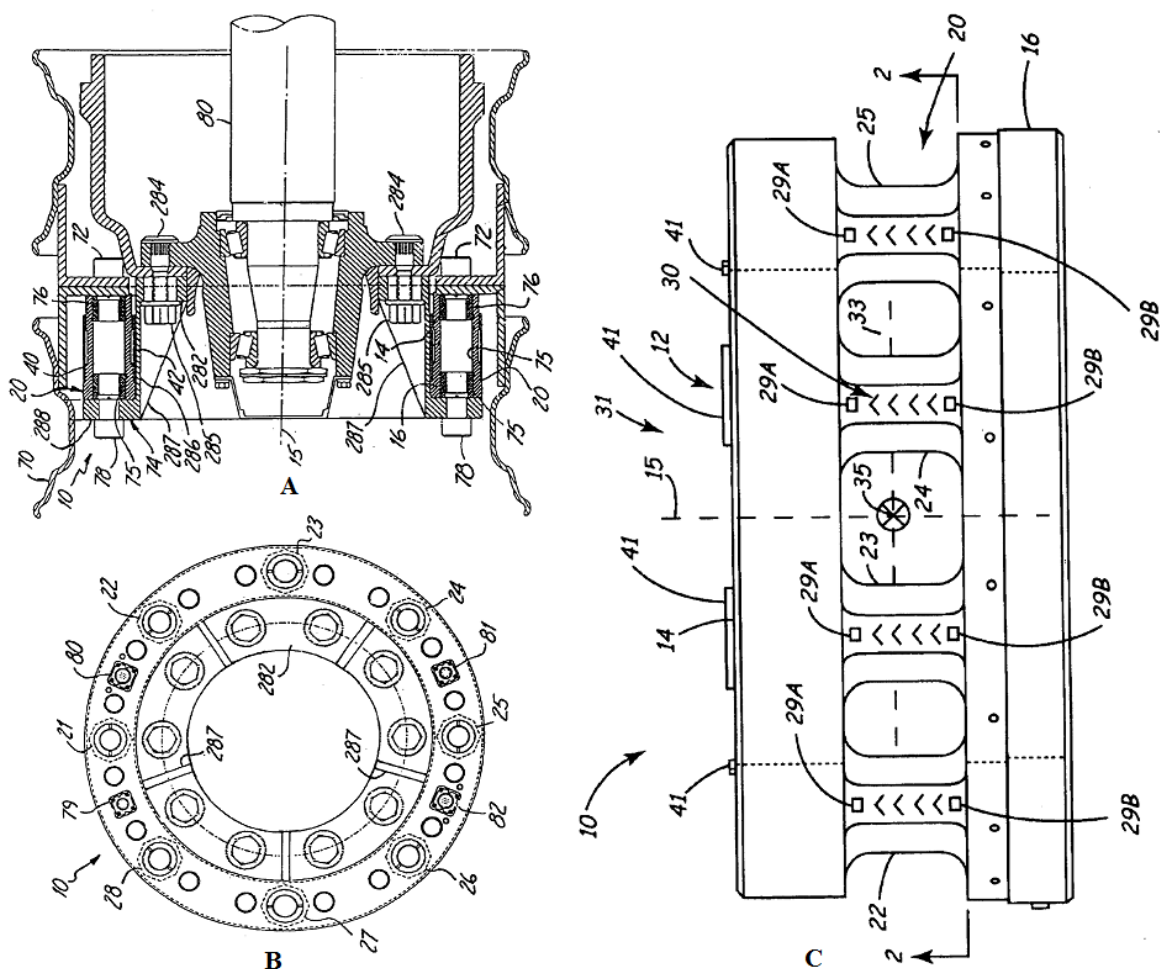
2.2. Szenzortest geometriájának irodalmi áttekintése

A meghibásodott szenzoron elvégzett elemzést követően ki kellett derítenünk, hogy a világban elterjedt, különböző geometriák milyen tulajdonságokkal rendelkeznek és ezekből számunkra melyek a kedvezőek. Több szabadalommal is találkoztunk, melyek különböző geometriák bemutatásával foglalkoznak. Természetesen csak olyan forrásokat tekintettünk át, amik kimondottan nyúlásmérő bélyegekhez kialakított geometriákkal foglalkoznak.

Richard A. Meyer és társai a szabadalmukban [3] egy olyan speciális szenzorról értekeznek, mellyel járműveken tudtak forgás közben tengelyterhelést mérni. A mérési elve az 3. ábrából érthető meg jól. Az ábra C részén megfigyelhető, hogy gyakorlatilag két tárcsát összeszereltek megfelelően méretezett rudakkal. Ezeken a rudakon mértek nyúlásmérő bélyegekkel deformációt, majd ebből következtettek rudakon ébredő terhelésekre. A 3. ábra B

részen a kerékhez és az agyhoz való csatlakozó felület látható, míg az A részen az összeszerelt konstrukció metszete.

Ez az elrendezési típus számunkra azért nem felelt meg, mert nyúlásmérő ellenállások két típusát is használja (egyirányú, kétirányú¹), amely számunkra körülményes és költséges megoldás lett volna.

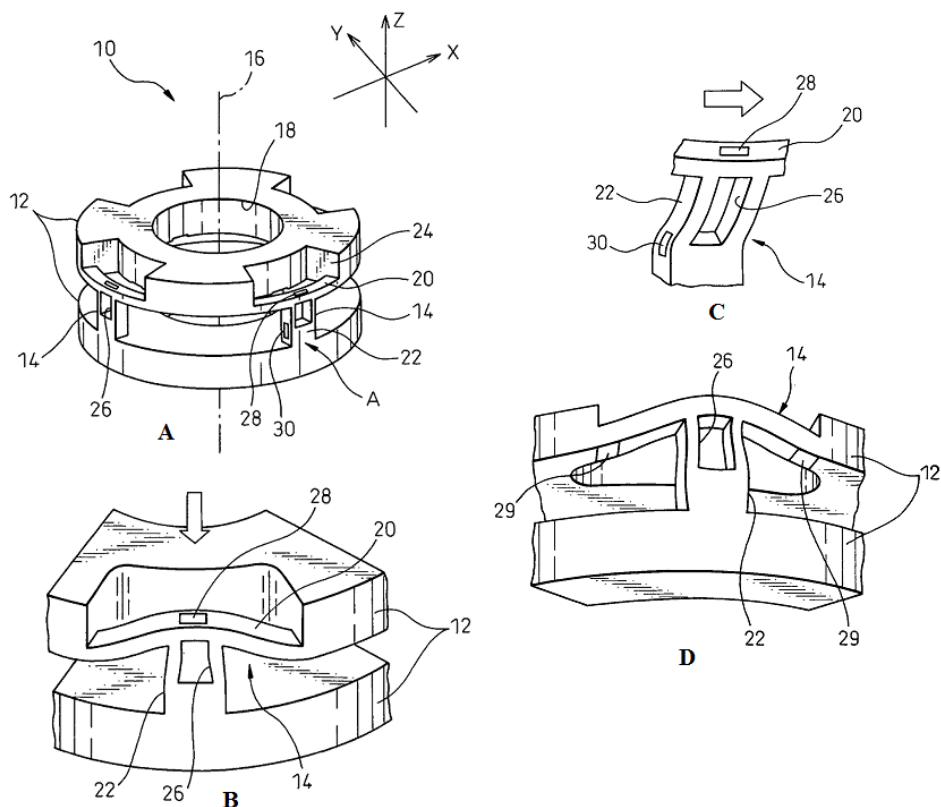


3. ábra Erőmérő szenzor jármű tengelyterhelésének meghatározására (forrás: [3], 1.-, 8. ábra)

Következő vizsgált geometriát Tetsuro Sakano szabadalmaztatta [5], mely a 4. ábrán látható keresztthidas megoldás. Ezen a szenzortesten kerületi irányban, szimmetrikusan helyezkednek el a speciális T-alakú oszlopok. Az oszlopok függőleges felületére felhelyezett nyúlásmérő ellenállások az axiális terhelést, míg a T-alak felső, vízszintes részére felragasztott bélyegek a radiális irányú komponenst mérik.

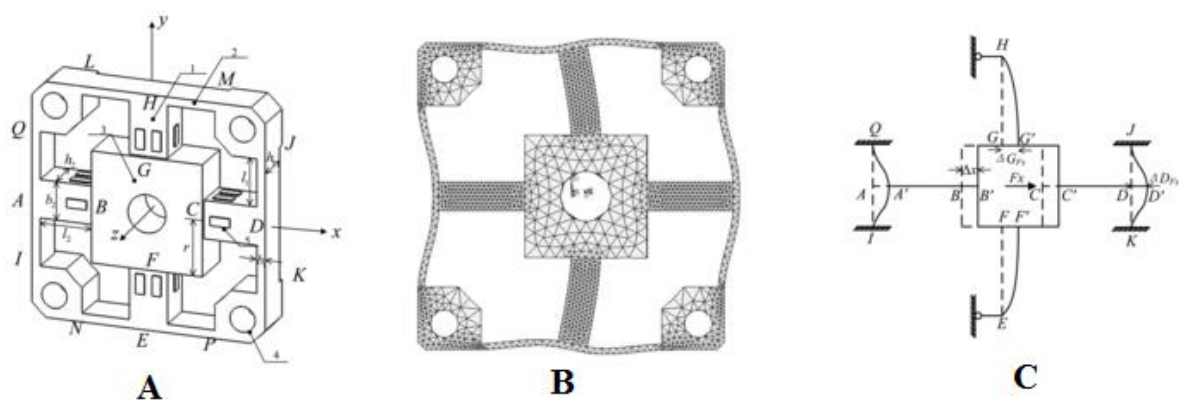
A számunkra elérhető gyártási technológiával nem valósítható meg költséghatékonyan az előállítás, illetve szenzortest kis befoglaló mérete miatt a bélyegzést csak körülményesen lehetett volna kivitelezni.

¹ <http://www.kaliberkft.hu/>



4. ábra Kereszthidas megoldás, T-alakú oszlopokkal (forrás: Tetsuro Sakano [5], 1-4 ábra)

A harmadik megvizsgált geometriát Junqing Ma és Aiguo Song publikálta [2]. Cikkükben a legelterjedtebb kereszthidas szenzortest (5. ábra) egy gyors becslésű matematikai modelljét alkották meg, amivel nagyon pontosan és gyorsan közelítették meg a numerikus iteráció végeredményét. Ezt vége-selemes módszer (VEM) és gyakorlati mérésekkel is bizonyították.

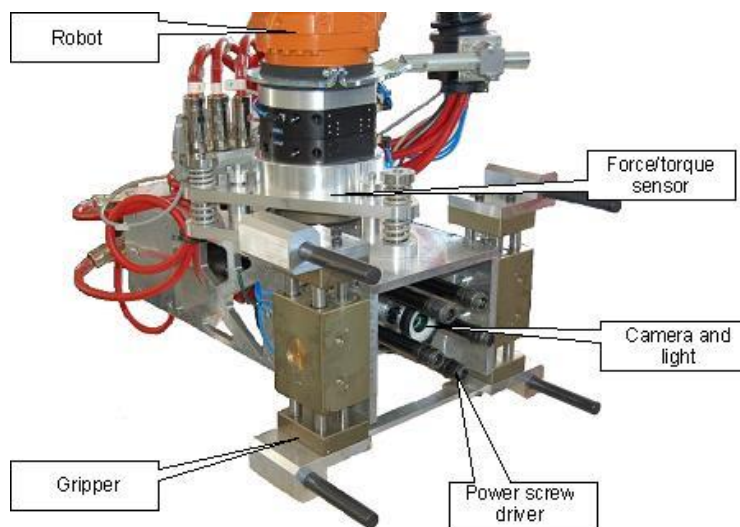


5. ábra Legelterjedtebb kereszthidas megoldás (forrás: Junqing Ma és Aiguo Song [2], 2.-, 4.-5. ábra)

A 5. ábra A részén a standard geometria fizikai kialakítása látható, a B részén a VEM analízise, míg a C részén a mechanikai modellje látható.

Ezt a geometriát alapvetően olyan szenzorokba építik bele, melyeket ipari robotok erőszabályozásánál használják. Mechanikai felépítésük alapvetően három részből tevődik

össze: a központi egység a robotmegfogóhoz, a ház részét alkotó külső gyűrű az end-effektorhoz, míg köztük lévő oszlopokon történik a többirányú terhelésmérés. Egy megvalósítási példát mutat a 6. ábra.



6. ábra Erőmérő szenzor beépítése robot end-effektora és a robotmegfogó közé²

A gyártási és szerelési korlátokat figyelembe véve ez a geometria adódott gazdaságosan és relatíve könnyen megvalósítható konstrukciónak.

2.3. Nyúlásmérő ellenállások szakirodalmának áttekintése

Mivel az általunk tervezett erő és nyomatékmérő szenzorban nyúlásmérő bélyegek felhasználásával határozzuk meg az egyes ágakban a terheléseket, így szükséges volt ezek szakirodalmának áttekintése is.

A BME Gyártástudomány és- technológia Tanszék oktatójának, dr. Alpek Ferencnek a jegyzete részletesen taglalja a bélyegek tulajdonságait, felhasználhatóságát, méretezését [1]. Mint azt a szerző mondja „a nyúlásmérő ellenállások (bélyegek) a fémek azon tulajdonságát használják fel érzékelésre, mely szerint a fém nyúlásának ($\Delta l/l \Rightarrow$ a hosszúság relatív változása és $dA/A \Rightarrow$ a keresztmetszet relatív változása) változása fajlagos és ohmos ellenállás változást eredményez”.

A nyúlásmérő ellenállások legfontosabb jellemzője bélyeg állandó (gauge factor, jele: g), mely megadja az összefüggést a mechanikai és a villamos kapcsolatok között: megmondja, hogy egységnyi fajlagos nyúláshoz mekkora ellenállásváltozás tartozik. A szakirodalomból ismert, hogy a nyúlásmérő bélyeg relatív ellenállás-változása (2.1.)[1,5]:

² Kép forrása: <http://www.robotic.dlr.de/210/>

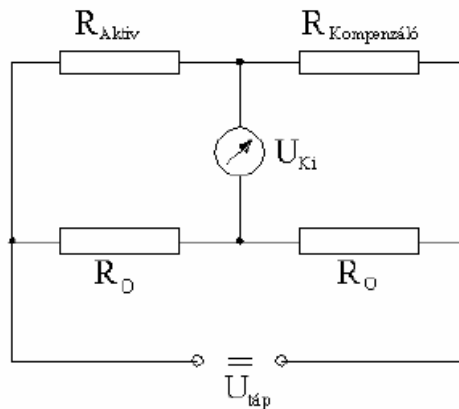
$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2.1.)$$

ahol: ν – Poisson tényező
 ε – fajlagos nyúlás
 ρ – fajlagos ellenállás

Így a bélyegállandó értéke (2.2.):

$$g = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = (1 + 2\nu) + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\varepsilon} \quad (2.2.)$$

A bélyegek deformációját a hőmérséklet rendkívüli módon befolyásolja, ezért ennek kiküszöbölésére szokták alkalmazni a különbségi mérés elvét felhasználó hídkapcsolást (7. ábra).



7. ábra Wheatstone hídkapcsolás nyúlásmérő bélyegekhez (Alpek [1], 13. oldal, 5. ábra)

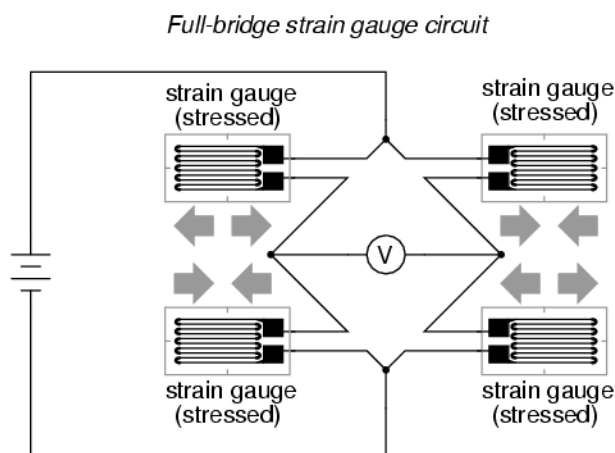
„Ha aktív és kompenzáló bélyeget, továbbá két azonos nagyságú kiegészítő ellenállást használunk, továbbá a próbatest keresztirányú méretváltozásától eltekintünk, akkor a kimeneti feszültség a mechanikai feszültséggel lineárisan változik, illetve a kimeneti feszültség a tápfeszültségtől és az aktív bélyeg relatív ellenállás változásától függ, és nem függ a hőmérsékletváltozástól, így teljes hőmérséklet kompenzációt sikerült megvalósítani. Létezik két aktív bélyeges illetve négy aktív bélyeges kapcsolás is.”[1] A szenzorban mi ez utóbbi megoldást alkalmaztuk (8. ábra). További előnye a nagyobb érzékenység.

Teljes hidas kivitelnél a terheléstől függő feszültséget a (2.3.) képlet alapján kapjuk meg[1,6]:

$$U_{ki} = U_{táp} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (2.3.)$$

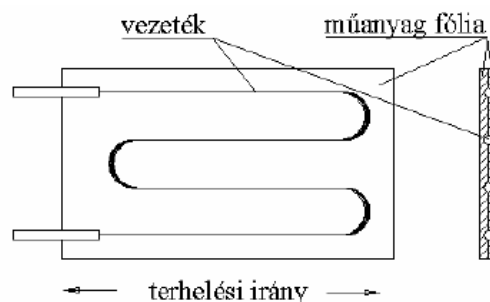
ahol: U_{ki} – kimenő feszültség
 $U_{táp}$ – tápfeszültség
 $\frac{\Delta R}{R}$ – relatív ellenállás

A teljes hidas kivitelnek, szemben a negyed, vagy fél hidas kivittel, a legnagyobb az érzékenysége, mivel negyed hidas kivitelnél néggyel, míg félhidas kivitelnél kétszer kell osztani a (2.3.) egyenlet jobb oldalát.



8. ábra Teljes hidas mérőcella³

A bélyegeket a mérendő testre, annak egy meghatározott részére ragasztják, aminek következtében a bélyeg a testtel együtt deformálódik. Felragasztás során biztosítjuk a terhelések tökéletes átvitelét, a bélyeg és terhelt test közötti szilárd kapcsolatot. A szenzort a test legnagyobb deformációját elszenvedő részére kell ragasztani a 9. ábrán látható orientációnak megfelelően.



9. ábra Nyúlásmérő ellenállás elvi vázlata és a felragasztás orientációja (Alpek [1], 11. oldal, 4. ábra)

„A nyúlásmérő ellenállások ragasztására használható ragasztóknak két nagy csoportja létezik: szerves -, illetve kormaiikus kötőanyagok. A szerves ragasztó csoportjába a nitrocellulóz, sellak, akril, poliészter, epoxi, fenolgyanta stb. bázisú ragasztók tartoznak, a keramikus típusok pedig szilikát, foszfát, fémoxid, ill. üvegbázisú kötőanyagok.

Döntő mozzanat a felragasztásra kiszemelt felület előkészítése, a gyártó által ajánlott kötési idő (ami lehet néhány perctől 72 óráig) és nyomás betartása. Fontos a felületet csiszolópapírral némileg érdesíteni, hogy a ragasztó nagyobb kötési erőt tudjon kifejteni.”[1]

³ Kép forrása: <http://electronics.stackexchange.com/questions/103846/hacking-a-four-load-sensor-based-personal-weighing-scale>

2.4. Hattengelyes erő- és nyomatékmérő szenzor kalibrációs mátrixának szakirodalma

A nyúlásmérő bélyegekből nyerhető feszültség szinteket egyértelműen össze kell rendelni számunkra megfelelő erő és nyomaték értékekre, viszont a mérések során a tengelyek között jelentkező áthallás miatt nem kapunk független erő és nyomaték értékeket, ezért szükségünk van egy olyan matematikai műveletekre, mely ezt kompenzálja. Ezen műveletek eredménye a kalibrációs mátrix.

Takeshi Ohsato és Yusuke Hirabayashi a szabadalmukban [4] egy félvezető alapú hattengelyes erő és nyomatékmérő szenzort fejlesztettek és relatíve részletesen ismertetik a kalibrációs mátrixának a meghatározását. Mi ebből a tanulmányból csak a mátrix meghatározásának matematikai módszereit használtuk fel, azokat ismertetjük itt.

Mint írják a hattengelyes erő- és nyomatékmérőnek 6 komponensű terhelővektora van ($F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$), melyet Ők $F_1 \dots F_6$ jelölnek (F_i). Erre a terhelővektorra hat feszültségjelet produkál a szenzor, melyet Ők $Sig_1 \dots Sig_6$ jelölnek ($S_1 \dots S_6; S_i$). A két mennyiség között a következő kapcsolat áll fent vektoregyenlet formájában:

$$(F_i) = (m_{ij}) \times (S_j) \quad (i,j=1..6) \quad (2.4.)$$

Az (2.4.) egyenletben az m_{ij} mátrix a keresendő kalibrációs mátrix. Viszont ebben a formában, közvetlenül nem meghatározható, mivel sokkal több ismeretlen van, mint amennyi egyenletet kapunk. Ők a következő matematikai trükköt alkalmazták: az egyenletet átrendezték a (2.5.) egyenletnek megfelelően, ahol a kalibrációs mátrix inverzét vesszük.

$$(S_j) = (m_{ij})^{-1} \times (F_i) \quad (i,j=1..6) \quad (2.5.)$$

Ezután „már csak” arról kell gondoskodni, hogy kalibrálás során az F vektorban csak egy helyen szerepeljen 0-tól különböző érték. Mivel ez csak nagyon szélsőséges esetben kivitelezhető, ezért a mechanikában ismert szuperpozíció elvét alkalmazták, mely kimondja, ha egy erőrendszer egyensúlyban van, akkor azok ugyanazzal a konstanssal történő szorzását követően is egyensúlyban maradnak.

Összegzésként leírják, hogy ezzel a megoldással egy kellően biztonságos és megfelelő kalibrációs mátrixot lehet elérni.

3. Szenzortest geometriájának megtervezése, legyártása

A felhalmozott információk és tapasztalatok alapján összeállítottunk egy a tervezést meghatározó követelményjegyzéket, melyben egy jelentős helyen a mechanikai túlterhelés védelem szerepelt.

A méretezés megadta a híd oszlopainak geometriai méretét, az oszlopok a belső gyűrű magasságával szimmetrikusan helyezkednek el. Az alásüllyesztés (10. ábrán zöld nyilakkal jelölve) a bélyegezhetőség miatt fontos, hiszen az oszlop felső részére is bélyeg kerül, amit be kell tudni kábelezni, a kivezetés és a pára záró gyűrű között szigetelési távolságnak kell maradni.

A méretezésnél célunk volt a lehető legnagyobb felbontás (érzékenység) megvalósítása. A műszaki gyakorlatban ezt úgy biztosítják, hogy a deformálódó elemet (amire a bélyeget ragasztjuk) egy meghatározott feszültségre méretezik. Nagyságrendileg 50-100[MPa] közé. A túlterhelések és a többtengelyű feszültségállapot esetleges kialakulása miatt szükséges biztonsági tartalék beiktatása is. A méretezésnél ellenőriztük a maximális elmozdulás értékét és a geometriát úgy alakítottuk ki, hogy túlterhelés esetén a belső gyűrű előbb felfeküdjön, mint ahogy az alumínium eléri folyáshatárát.

Tervezésnél és gyártásnál figyeltünk a bélyegek megfelelő kiválasztására és elhelyezésére. A geometriából adódóan az oszlopok a belső gyűrű közelében szenvedik a legnagyobb alakváltozást, itt alakul ki a legnagyobb feszültség. A tartó alakja ugyan nem egyenszilárdságú, de a kis bázishosszúságú bélyegek, azok szimmetrikus elhelyezése, valamint a differenciális mérés biztosítja, hogy többtengelyű feszültség változás esetén is megfelelően mérjünk. Fontos megjegyezni a bélyegek felhelyezési pontosságának szükségességét, ugyanis a bélyegek a hosszukból adódóan a tartón ébredő feszültséget átlagolják, a hídágak így csak akkor kompenzálják egymást, ha mindkét oldalon egyformán helyezük el a hídágakat alkotó nyúlásmérő ellenállásokat. Pl. az oszlop csavarodik, akkor a szimmetrikus elhelyezés miatt a szemben lévő hidak egyforma deformációt mérnek (mindkét oldalon azonos a húzás- nyomás mértéke), a különbségi elvből adódóan a kimenő feszültség állandó értékű marad.

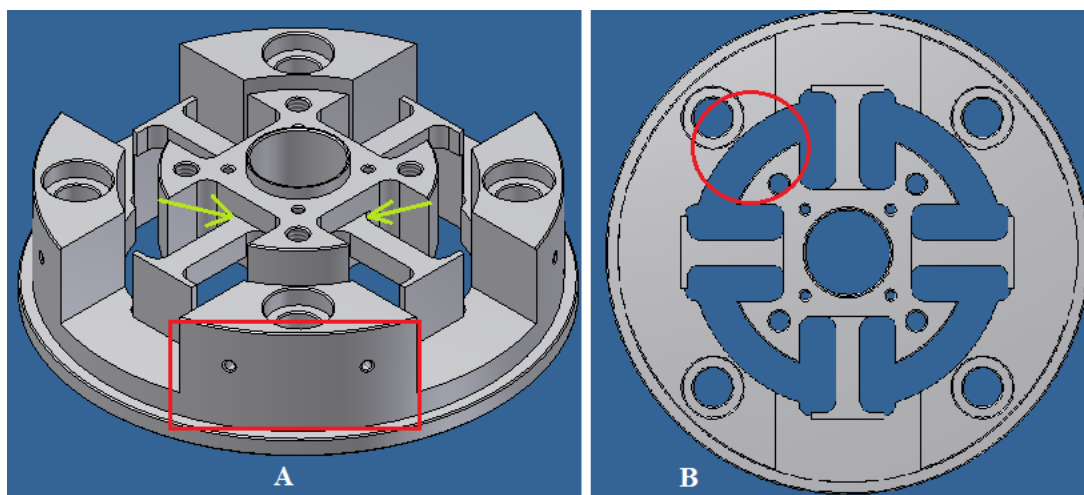
A tervezés során olyan geometriát alkottunk, mely korszerű (szikraforgácsolás) gyártástechnológiával hatékonyan és egyszerűen gyártható. A túlterhelés védelmet mind axiális, mind radiális irányban megoldottuk, ezáltal többszörösen túlterhelhető geometriát alkottunk. Ez számunkra különösen előnyös, mert gyógytornáztatás során esetenként

előfordul, hogy a robot környezetében lévő tárgyakba (pl. asztal, szék) ütközünk. További fontos követelmény volt a kábelezés biztonságos elvezetése.

3.1. A tervezés iterációi

Az fent említettek alapján, több iterációban elvégeztük a legmegfelelőbb geometria megtervezését. A befoglaló méretek kötöttsége miatt első iterációs lépéshez a tönkrement szenzort használtuk fel, s fejlesztettük tovább.

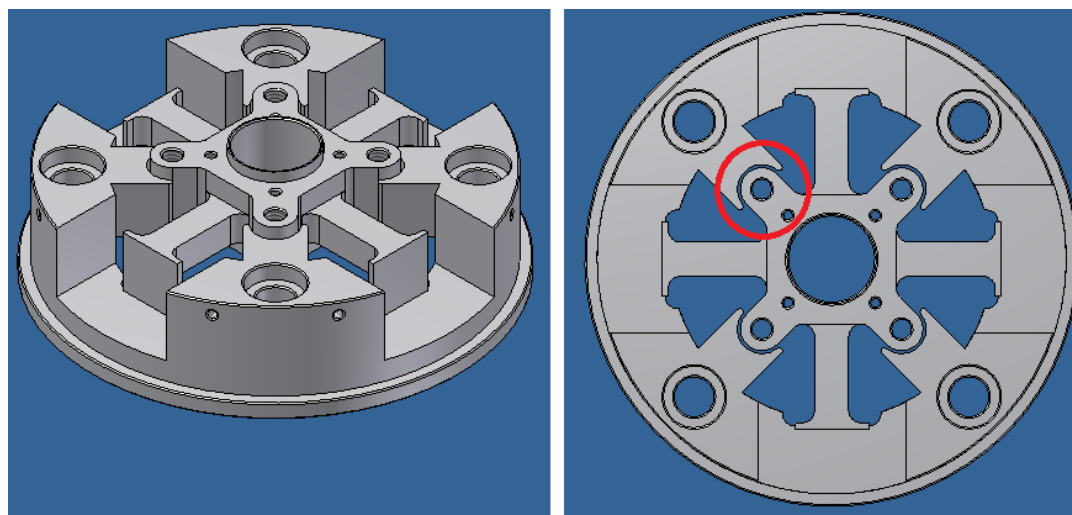
A 10. ábra az eredeti szenzor CAD modellje látható a szükséges módosítások jelölésével.



10. ábra Eredeti szenzor CAD modellje

Látható a túlterhelés védelem teljes hiánya (*B rész*) és a kábelezés belső gyűrűn való elvezetése (*A rész* tömörsége). Megfigyelhető a standard gyártástechnológia minden jellemző hátránya (pl. sarokrádiuszok minimális mérete -> feszültséggyűjtő hely).

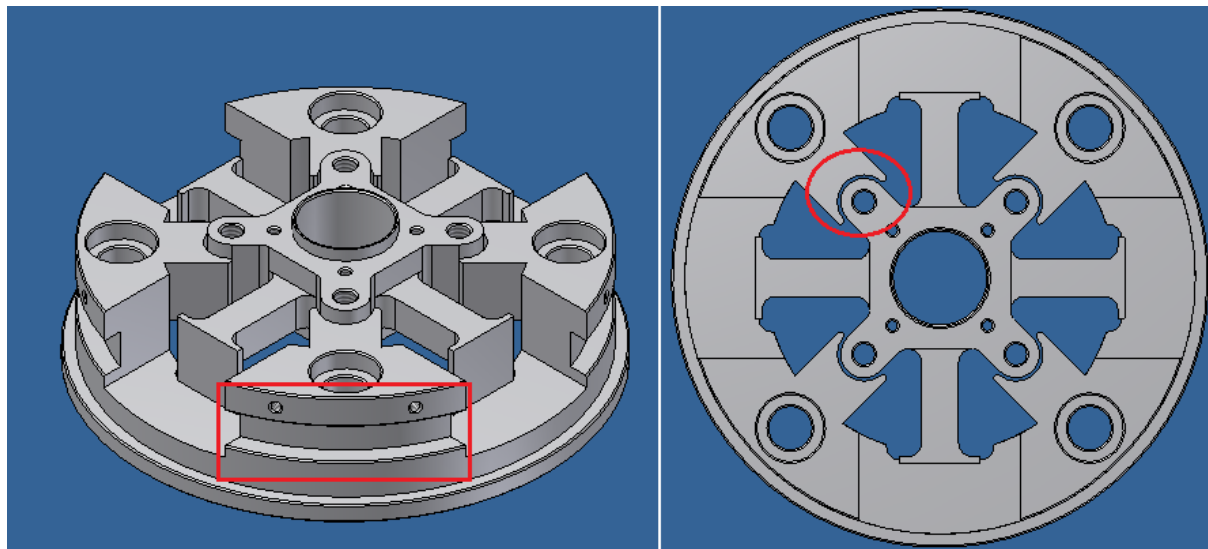
Az iterálás első lépcsőjét mutatja be a 11. ábra.



11. ábra Első iterálás eredménye

Itt már megfigyelhető a konstrukciós előrelépés, a túlterhelés védelem beépítése, ami csak radiális irányban oldotta meg a védelmet. További hátránya, hogy nem jut elég hely a kereszthidak bélyegzésére. A kábelelvezetés itt már nem megoldott.

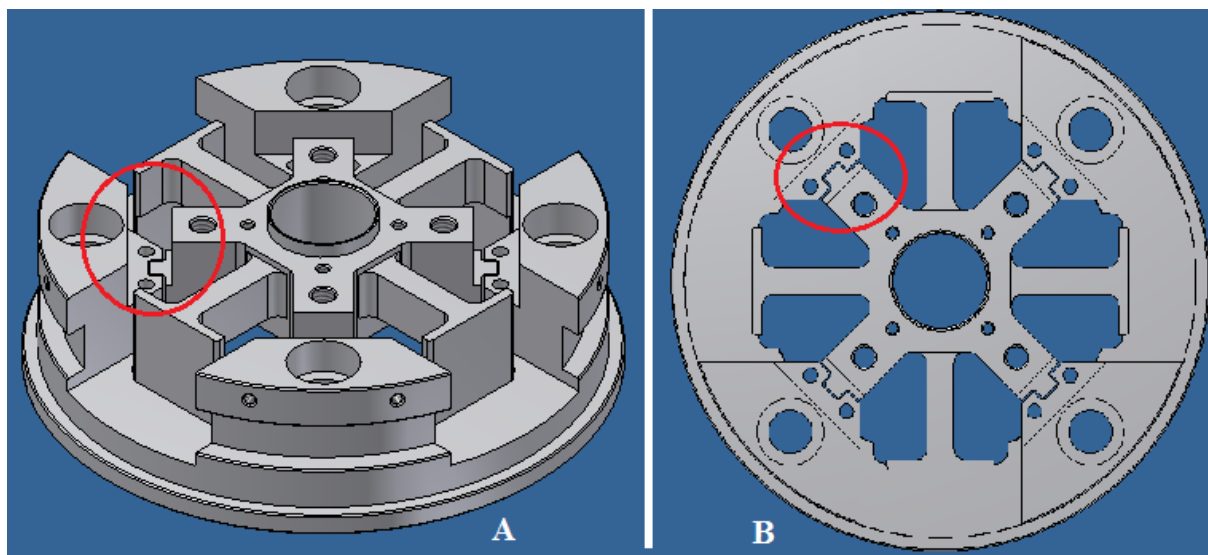
Az iterálás második lépcsőjét mutatja be a 12. ábra.



12. ábra Második iterálás eredménye

Lehetővé tettük a kábelezés megvalósítását (külső palást beszúrás).

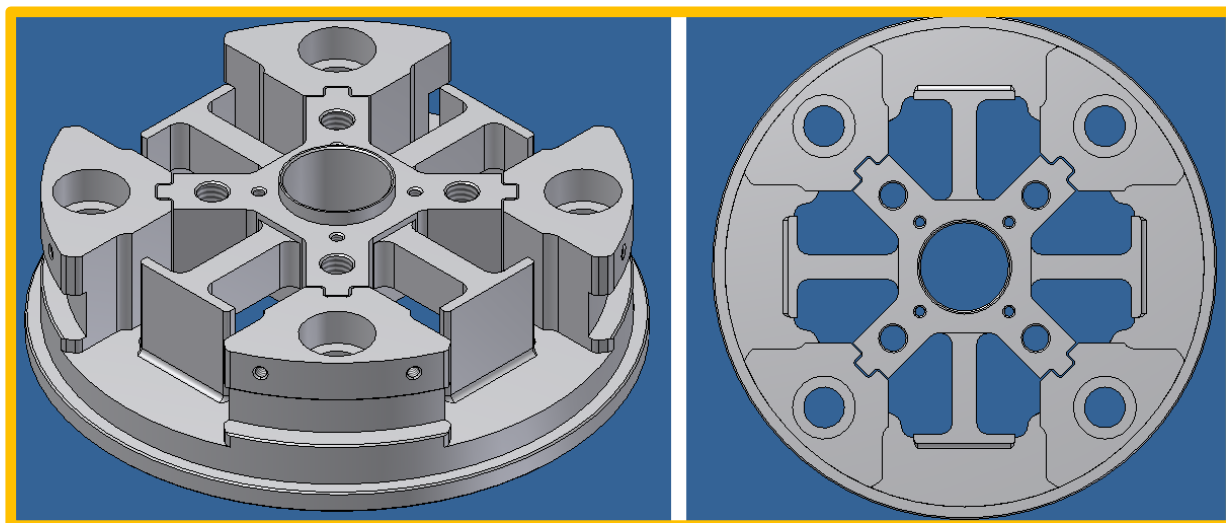
Az iterálás harmadik lépcsőjét mutatja be a 13. ábra.



13. ábra A harmadik iteráció eredménye

Az axiális túlterhelés gátlást próbáltuk megoldani, de szerelés és gyártás szempontjából korántsem volt optimális megoldás. A jelölt terület felső és alsó homlokfelületére egy-egy lemezt csavaroztunk volna, amely a belső elemet közrefogja. Tiszta axiális terhelés gyakorlati valószínűsége nagyon alacsony, ezért ezt a változtatás elvetettük.

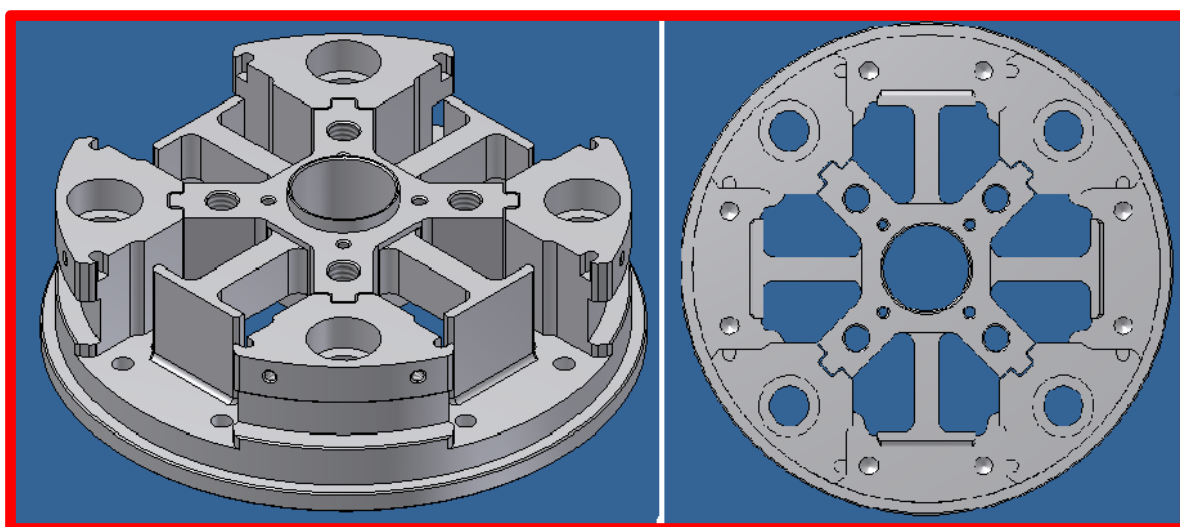
Az iterálás utolsó előtti lépéseként megkaptuk az első legyártott darabot (14. ábra).



14. ábra Az először legyártott geometria

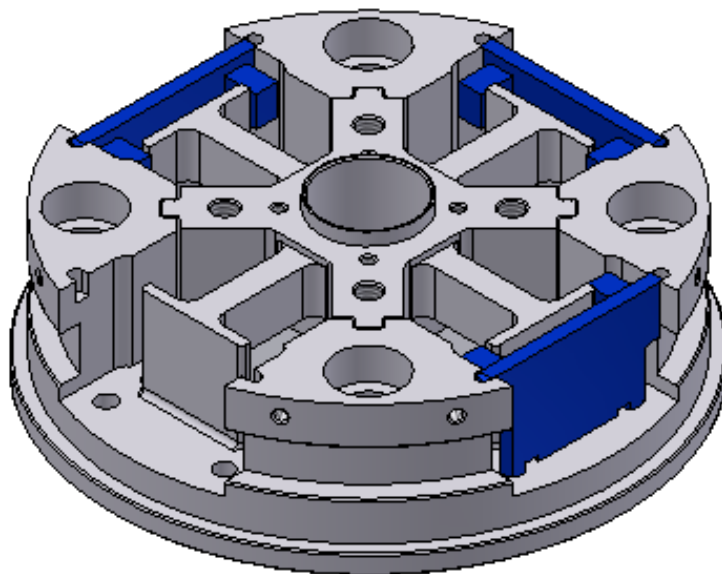
Ezen a geometrián az axiális túlterhelés védelemre szánt lemezes megoldást elhanyagoltuk (összevontuk a por és páravédő felső- és alsógyűrűkkel lásd 17. ábra).

Az iterálás utolsó lépésében megkaptuk a másodjára legyártott szenzortestet (15. ábra).



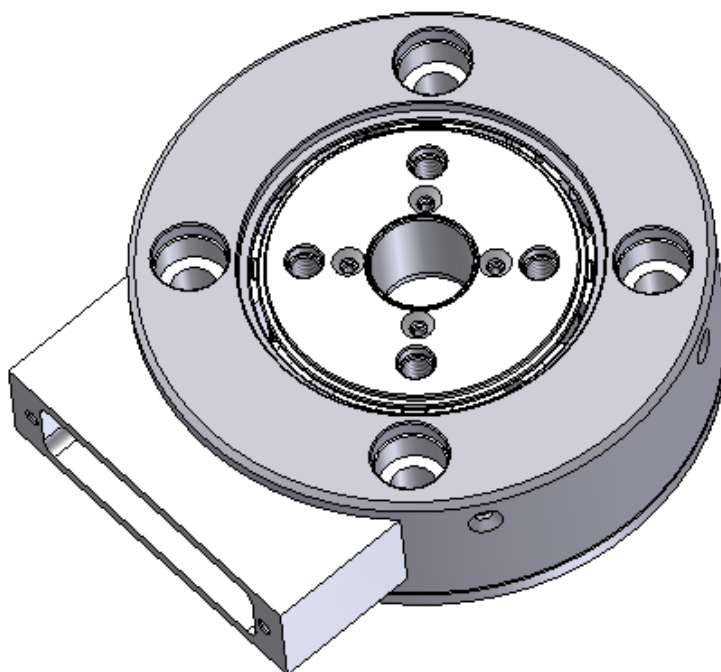
15. ábra Másodjára gyártott szenzortest

A belső elektronika helye is kialakításra került. A 16. ábrán látható a másodjára elkészített szenzor a beépített nyomtatott áramkörökkel (kék téglalapok).



16. ábra Szenzor a beépített nyomtatott áramkörökkel

A 17. ábrán látható alsó- és felsőgyűrűk funkciója az axiális túlterhelésgátlás és a külső por és pára elleni szigetelés (a nyúlásmérő ellenállások érzékenyek a légköri páratartalomra).



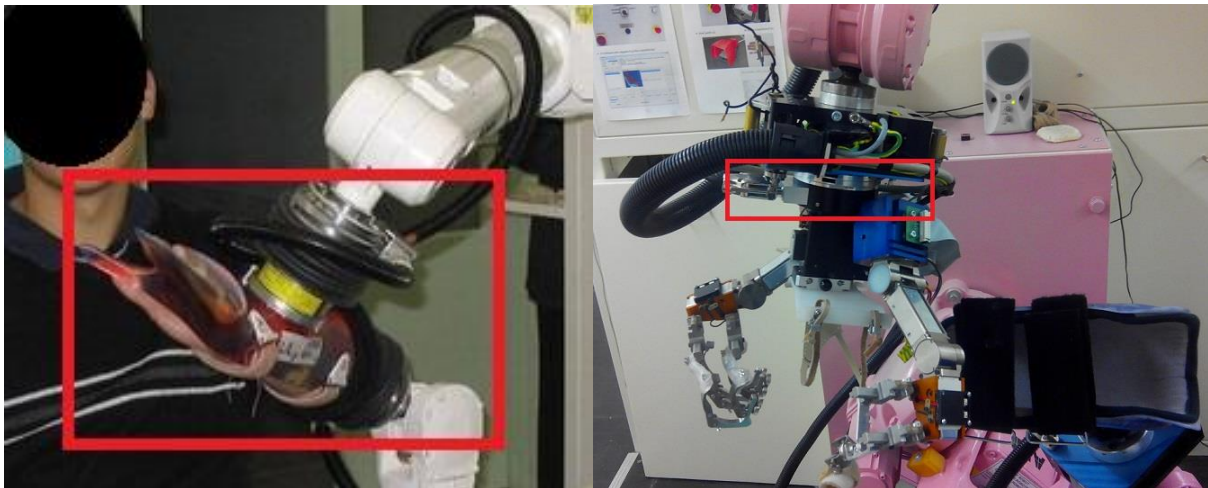
17. ábra Megvalósított szenzorok teljes CAD modellje

Elmondható, hogy a megtervezett szenzor mind megbízhatóság szempontjából, mind esztétikailag egy továbbfejlesztett konstrukció.

3.2. A geometria mechanikai ellenőrzése

A geometria tervezése mellett párhuzamosan végeztük a végeleemes feszültség és alakváltozás elemzést. A tervezés során az oszlopok, a függőleges rugalmas elemek (oszlopok és a ház csatlakozási pontja) keresztmetszeti és azok sarokrádiuszának iterációja történt. A végeredményeket a 19. ábrától a 22. ábráig láthatjuk. A VEM-es ellenőrzést **Inventorban** és **ANSYS-ban** is elvégeztük, amely során gyakorlatilag egyező eredményeket kaptunk. Ezúton szeretnénk megköszönni Magyar Bálintnak, a BME Műszaki Mechanikai Tanszék munkatársának az eredmények lektorálását.

Fejlesztésünk során egy fontos követelmény volt, hogy magasabb méréshatárú szenzort hozzunk létre, mivel a roboton a rendszer továbbfejlesztésének hatására nagyobb tömeget kellett mozgatni (kézfejmodul, 18. ábra). A gyógytornák során gyakran előfordult, hogy a tönkrement szenzor névleges értékei felett dolgoztunk, időnként túlterheltük, de még a mérnöki tartalékon belül. Ezért volt szükségünk nagyobb terhelhetőségű mérőelemre.

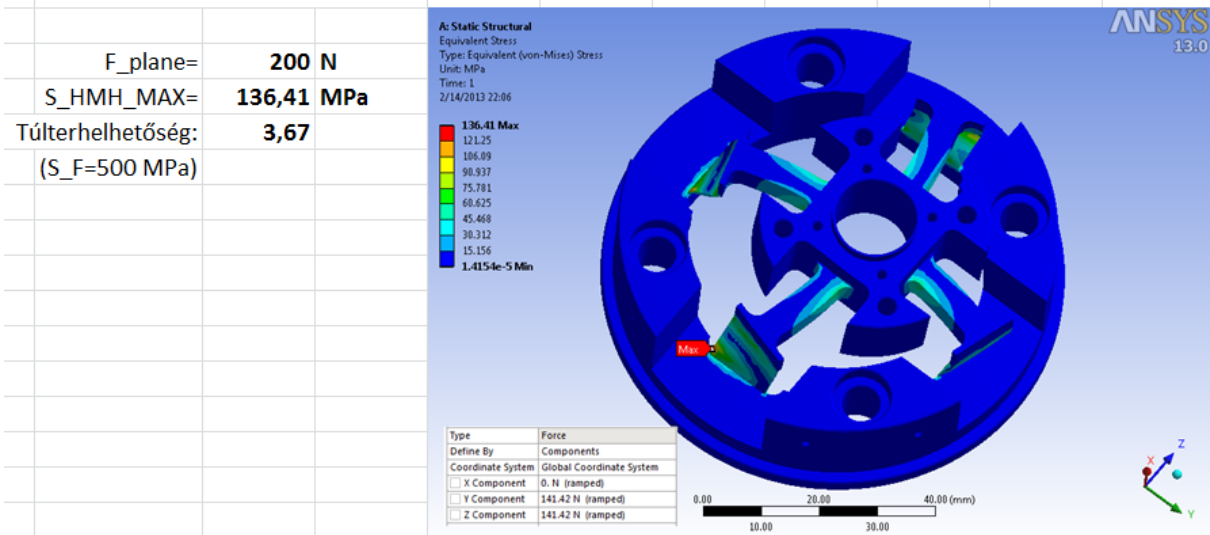


18. ábra Bal oldalon a régi rendszer⁴ a régi szenzorral, jobb oldalon az új rendszer az új szenzorral

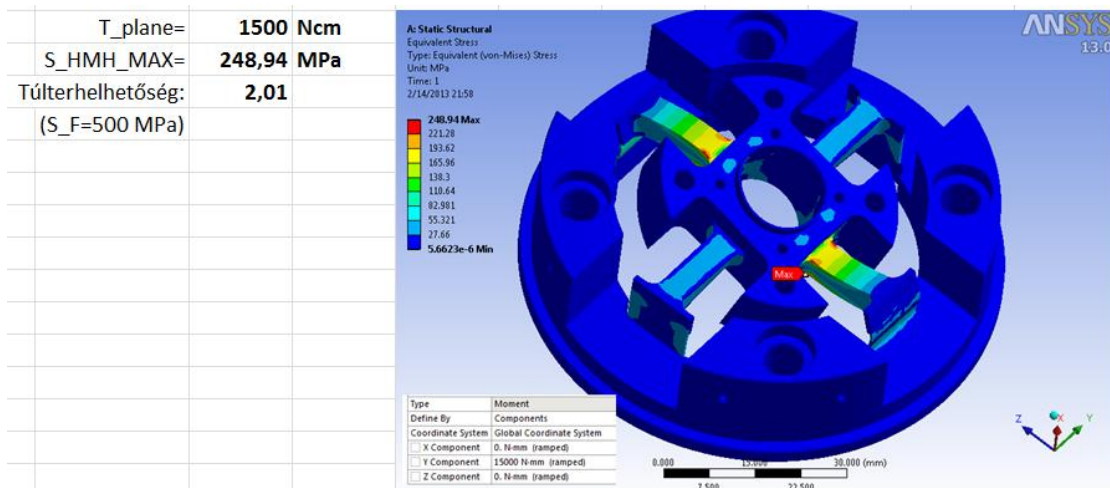
A 18. ábra bal oldalán a régi rendszer látható az időközben cserélt szenzorral. Megfigyelhető, hogy statikus terhelésre a kar súlya és a kart tartó műanyag ortézis jelentkezik csak. Ezzel szemben a jobb oldalon már látható az elmúlt évek fejlesztése, a komplett kézfej modul, melyek az ujjak mozgására is képes. A szenzor piros téglalappal jelöltük, mert a fekete eloxálás miatt beleolvad a környezetébe.

⁴ Kép forrása: http://mediq.blog.hu/2007/03/12/az_orvoslas_es_a_robotika_sebeszet_a_jov

Síkban terhelve

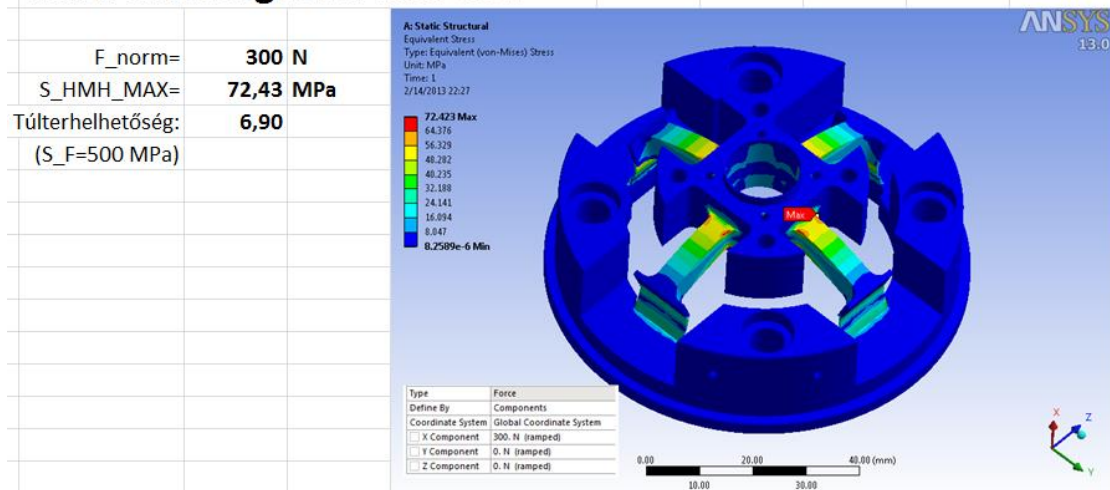


19. ábra A koordináta rendszer szerinti YZ síkban erővel terhelve

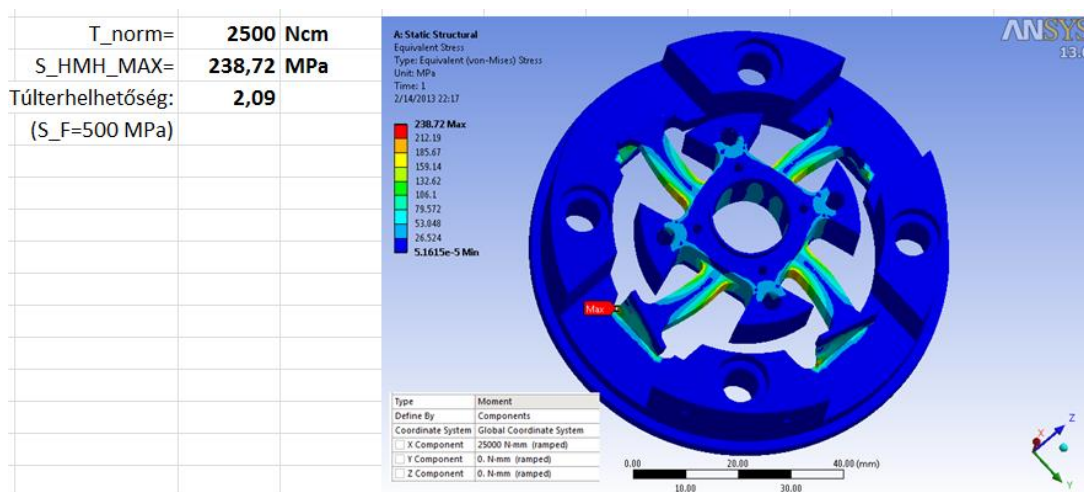


20. ábra A koordináta rendszer szerinti Y mentén nyomatékkal terhelve

Síkra merőlegesen terhelve



21. ábra A koordináta rendszer szerinti X mentén erővel terhelve



22. ábra A koordináta rendszer szerinti X mentén nyomatékkal terhelve (csavarva)

A VEM háromszögelési erőforrásigénye miatt a számításokat a legegyszerűbb geometriai modellen futtattuk, viszont a modell lényeges elemei (gerendák és az alakváltozó felületek) a végleges geometria szerintiék. Azért tehettük meg, mert az alakváltozás csak ezen, két lényegi elemen jön létre.

A kritikus az 1500 [Ncm]-es síkba eső nyomaték, akkor, ha a nyomaték párhuzamos az Y vagy Z iránnyal. A maximális egyenértékű feszültség 250 [MPa], ez adja 2[-]-es a biztonsági tényezőt (tehát kétszeresen túlterhelhető megfolyásig). Az X irányú 2500 [Ncm]-es torziós nyomatékra 2,1 [-]-es a biztonsági tényező. Síkbéli erővel terhelve a legnagyobb feszültség akkor adódik, ha az erő hatásvonala a két borda között 45 fokban fut, 200 [N] volt az előírt terhelés, erre 3,7[-]-szeres a biztonság. Függőleges (X irányú) erővel szemben adódik a legnagyobb biztonsági tényező, 300 [N]-nál 6.9[-].

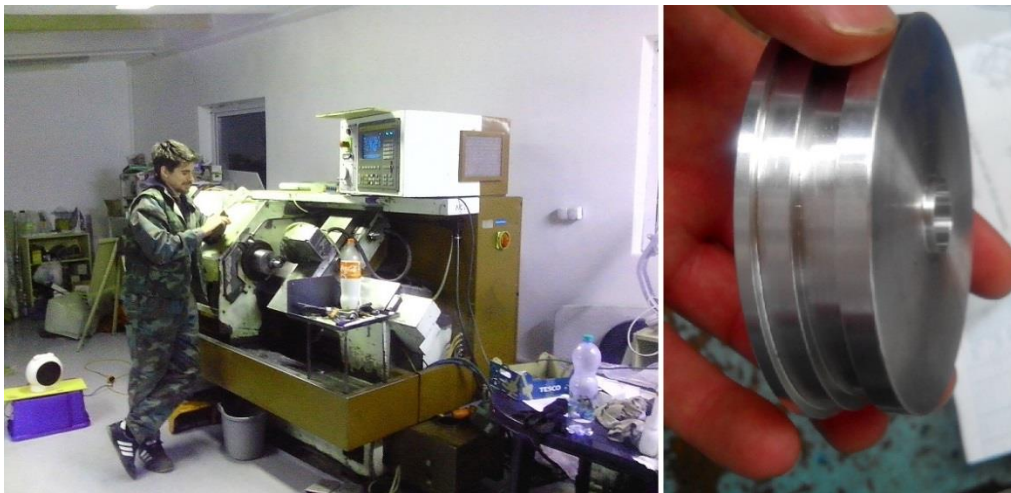
Elmondható, hogy a kitűzött követelményeket sikerült az iterációk során elérnünk. A szenzortest anyagául a repülőgépiparban használt, nagy szilárdságú és könnyen megmunkálható certál (AL7075T6) típusú alumíniumot használtuk, annak ára, beszerezhetősége és szakítószilárdsága miatt.

3.3. Szenzor alkatrészeinek legyártása

A CAD modellek alapján elkészítettük a gyártási dokumentációt. A költségvetés korlátossága miatt a standard gyártástechnológiával elkészíthető alkatrészek gyártását saját magunk végeztük, a korszerű gyártástechnológiát igénylő, komplexebb szenzortestet alvállalkozó bevonásával készítettettük el.

A szenzortest összesen 7 felfogásban készült el, aminek a teljes gyártási technológiáját nekünk kellett elkészíteni a költséghatékonyság miatt. Az előesztergálás két felfogását

magunk hajtottuk végre, a maráshoz szükséges 3 felfogást, illetve a huzalszikrázást alvállalkozóval végeztettük. A 23. ábrán látható az esztergálási művelet és az előgyártmány látható.



23. ábra Az esztergálási művelet és az elkészült előgyártmány

Az esztergálási művelet után HAAS TM2 típusú 3-tengelyes CNC megmunkálóközponton végrehajtottuk a marási műveleteket. Az NC programot **EdgeCAM** nevű CAM szoftverben generáltuk, amit a helyszínen korrigáltunk. Gyártási folyamat aktív résztvevői voltunk, technológiai paraméterek meghatározásában segítettünk.



24. ábra A marási műveletek végeredménye

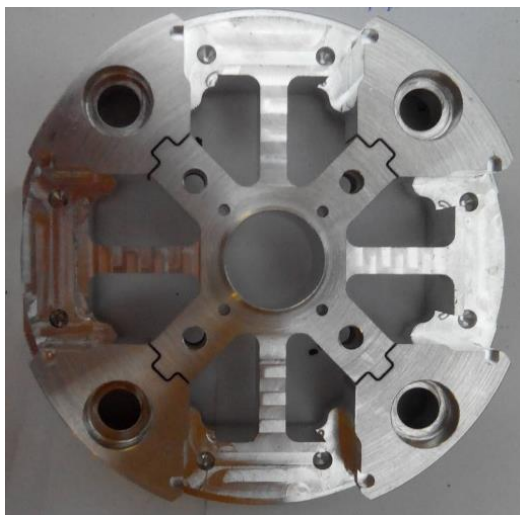
A 24. ábrán látható az alvállalkozónál előállított félkész termék. Első felfogásban a központi furat segítségével lefogtuk a munkadarabot, megmunkáltuk a két oldalsó síkot. Ezek a következő felfogáshoz szükséges technológiai felületek. A következő két befogás során a megmunkálás satuban történt. Ekkor a szenzor homlok- és hátfelületét forgácsoltuk ki.

Háromtengelyes megmunkálás következménye, hogy a szenzortestben található radiális furatok elkészítésére nincs lehetőség, ezt utólagosan mi magunk végeztük (25. ábra). A furatok a burkolat rögzítését hivatottak megoldani (szerelhetőség).



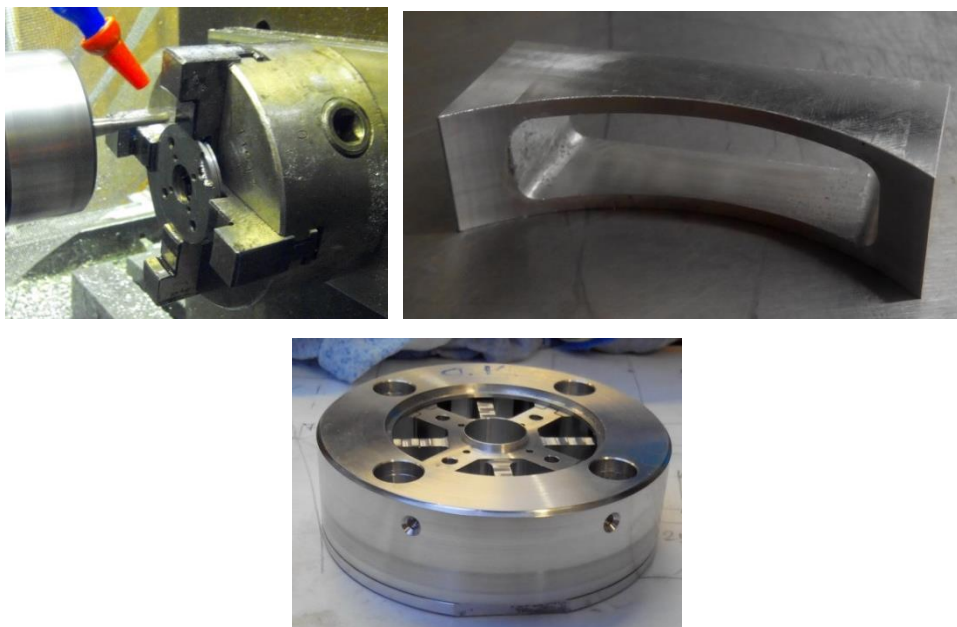
25. ábra Palást furatok elkészítése B-tengellyel

A fúrást követően, huzalszakra forgácsoló alvállalkozó bevonásával 0,25[mm] szikraközzel elkészült a belső híd átvágása. A 26. ábrán a végleges szenzortest látható.



26. ábra Az elkészült szenzortest

A cellához szükséges többi alkatrész gyártását teljes egészében magunk végeztük. Szükség volt még az alsó és felső burkolat elemekre, a lezáró és túlterhelés gátló, rozsdamentes gyűrűkre, a kábelkivezetés csatlakozó házára. A felsorolt alkatrészeket a 27. ábrán mutatjuk be.

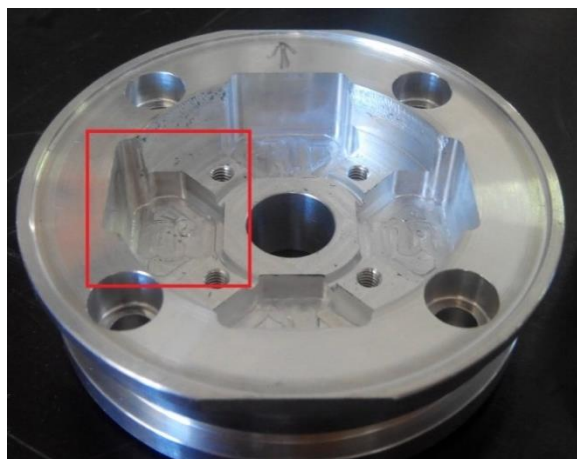


27. ábra Bal felső sarokban a rozsdamentes gyűrű megmunkálása, jobb felső sarokban a csatlakozó ház, míg az alsó ábrán az elkészült burkolat látható

Az elkészült alkatrészek végeredményben magas minőséget képviselnek, de a gyártási folyamat során néhány esetben problémába ütköztünk. A gyártás kiváló lehetőséget biztosított az elméleti tudásunk gyakorlati elmélyítésében.

3.4. Gyártás során felmerülő problémák

Az egyetemi tanulmányaink során szerzett információk ellenére megpróbáltuk a költségeket radikális mértékben csökkenteni, néhány esetben sikertelenül. Az első probléma abból adódott, hogy a marás során nem megfelelő szerszámozást választottunk. Először HSS maróval próbáltuk meg a simítást, aminek a végeredménye a 28. ábrán látható. Megfigyelhető a rossz felületi minőség, melynek oka a kis merevség és nagy l/d viszony miatt bekövetkező szerszámkihajlás.



28. ábra A rossz felületi minőségű, selejtes munkadarab

A második munkadarabot a simítási technológiának megfelelő, keményfém szerszámmal munkáltuk meg, így megfelelő felületi minőséget kaptunk. A selejtes munkadarabot a burkolat radiális furásánál készülékként használtuk.

A következő nagyobb probléma a felső burkolat radiális furatainak megmunkálásakor adódott. Az osztás miatt a munkadarabot tokmányba fogtuk be, de a külpontosság miatt a készülékre szorítás elve teljes egészében nem valósult meg. Ennek következményét a 29. ábrán figyelhetjük meg.



29. ábra A burkolat megmunkálása közben fellépő probléma

Központ furatok fúrásánál a munkadarab a befogásból kimozdult, a szerszám beletört a darabba, a fúrótokmány súlyos sérüléseket okozott a felületen. A problémát csak új alkatrész legyártásával tudtuk orvosolni. Figyelve az itt tapasztaltakra, csökkentettük az előtolás értékét. További, másodlagos felhasználása itt nem jöhetett szóba, mert a készüléket csak a munkadarab szétroncsolásával tudtuk visszanyerni.

4. Az elektronika megtervezése, legyártása

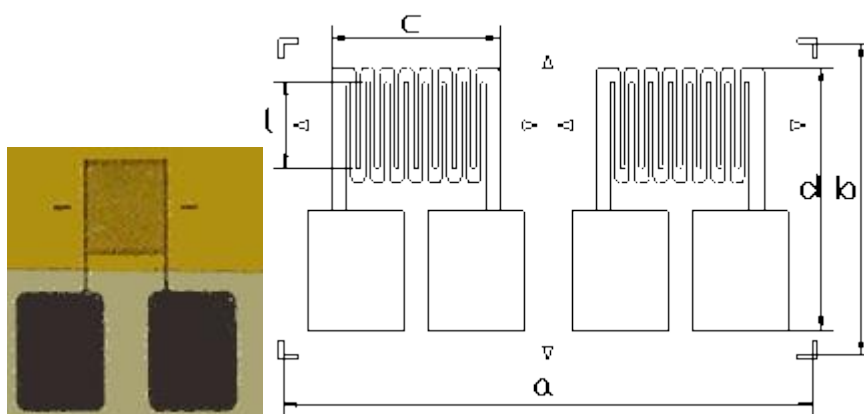
A szakirodalmak áttekintéséből és a tönkrement szenzor elemzéséből szerzett információk alapján meghatároztuk az ott alkalmazott nyúlásmérő bélyegek típusát. Mivel alapvetően a szenzor kis érzékenységgel rendelkezik, szükség volt a jelszintek erősítésére, melyet egy általunk tervezett erősítő áramkörrel valósítottunk meg.

4.1. Nyúlásmérő bélyegek kiválasztása

A szenzor geometriai sajátossága miatt azonos típusú – egyenes rácsú – nyúlásmérő ellenállások kerültek alkalmazásra. Nagy előnye, hogy a gyártóktól válogatott ellenállások beszerezhetők, így az egyes hidak kiegyenlítése külső alkatrész felhasználása nélkül megoldható.

A mechanikai tervezésnél meghatározott méréshatárok miatt az eredeti szenzorhoz képest, az általunk tervezett szenzor deformálódó elemeinek geometriája módosult. Az oszlopokon nagyobb hely állt rendelkezésre a bélyegzéshez, így lehetőségünk adódott nagyobb aktív rácshosszú bélyegek alkalmazására, melyeknek előnye, hogy nem teljesen pontos elhelyezés (ragasztás) esetén sem jelentős az ebből adódó hiba.

Felvettük a kapcsolatot nyúlásmérő ellenállások gyártására szakosodott cégekkel. Tapasztalataink azt mutatták, hogy az egyes cégek között jelentős ár/érték aránybeli különbség mutatkozik. Egyaránt kértünk árajánlatot külföldi és magyar vállalatoktól is. Végül a magyar tulajdonban lévő Kaliber Kft. mellett döntöttünk. A szenzorban a 30. ábrán látható bélyegeket alkalmaztuk. A műszaki paramétereit az 1. táblázat sorolja fel.



30. ábra KMT-LIAS-06-1.5/350-6EL :egyenes rácsú, 1.5mm bázishosszúságú, 350 ohmos, fedett nyúlásmérő ellenállás[7]

Konstrukciónkban a régebbi típusú 120[Ω] helyett, a modernebb 350[Ω] ellenállású bélyegek mellett döntöttünk. A nagyobb ellenállás lehetővé tette, hogy tovább csökkentsük a híd feszültségéből kialakuló disszipációt, ami nagyobb termikus stabilitást eredményez.

1. táblázat Az alkalmazott nyúlásmérő ellenállás műszaki paraméterei [7]

betűjel	megnevezés	mm
a	hordozó szélesség	10,08
b	hordozó hossz	6,5
l	aktív bélyegrács hossz	1,52
c	Rácsszélesség	1,65
d	teljes rácshossz	5,8
Mérőrács anyaga		konstantán
Mérőrács vastagsága		4,5 mm
Hordozó anyaga		poliimid
Hordozó vastagsága		25 mm
Fedőréteg anyaga		poliimid
Fedőréteg vastagsága		25 mm
Névleges ellenállás		350 ohm ± 0,5 %
Átalakítási tényező		k = 2,05 ± 1 %
Átalakítási tényező hőm. együtthatója		120 x 10 ⁻⁶ /°C
Hőmérséklettartomány		-40 +95 °C
Kúszáskompenzáció		1-10
Maximális nyúlás		± 2 %
Élettartam		± 1500 me esetén több mint 10 ⁷ ciklus
Alkalmazható hidegen keményedő ragasztók		cianoakrilát alapú ragasztók : pl. IS, LOCTITE
Alkalmazhatók kétkomponensű ragasztók		pl. ARALDIT 106, 138
Alkalmazható melegen keményedő ragasztók		pl. EP250 (HBM), M- BOND 610(VISHAY)

4.2. A legyártott szenzortest felbélyegzése

A bélyeg kiválasztás mellett fontos kritérium az alkalmazott ragasztó minősége és tulajdonságai. Ezen ragasztóknak többféle típusa is alkalmazható a szenzortest anyagától függően. A ragasztás megvalósítható melegen és hidegen keményedő ragasztókkal egyaránt. Mivel mi alumínium szenzortesttel dolgoztunk ezért a hőre keményedő ragasztás nem megvalósítható a termikus feszültségek kialakulása miatt. Ezért az egyetlen járható útnak a

hidegragasztás találtuk. Továbbá fontos megjegyezni, hogy feszültségmentesítő hőkezelést a szenzortest méretezett geometriájának esetleges deformációja miatt nem alkalmaztunk.

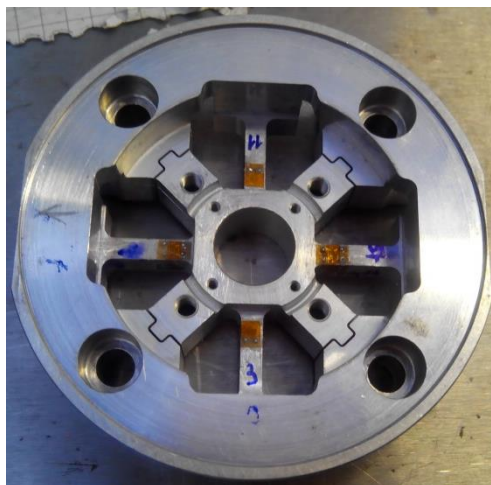
A bélyegek felhelyezésénél nagy figyelmet kell fordítani a pontos elhelyezésre, a ragasztóanyag vékony és egyenletes rétegvastagság felhordására. A ragasztó száradása során a légnedvességet magába zárja és emiatt a kialakult kötés szilárdsága és mechanikai tulajdonságai nagymértékben romlanak, ezáltal a ragasztás minősége nagymértékben függ a környezeti paraméterektől, így szükséges a megfelelő klíma betartása.

A ragasztás körülményességét növeli, hogy nagy figyelemmel kell lenni a felület előkészítésre, mivel a felületi egyenlőtlenségek alakja és nagysága befolyásolja a mechanikai adhézió mértékét. A legnagyobb kötésszilárdság nagyságrendileg 12 és 25[μm] közötti felületi érdesség esetén alakul ki. A megfelelő felületi érdesség elérése érdekében csiszolással, homokfúvással történhet a felület kezelése. Ezt mi mechanikai csiszolással valósítottuk meg. A mechanikai felületkezelést követte a szennyeződések oldószeres eltávolítás (pl. hűtővíz maradék, csiszolópor).

A leírtakból következik, hogy a bélyegragasztás a szenzor gyártástechnológiájának egyik legkritikusabb és leg időigényesebb, nagy gyakorlatot igénylő művelete. A ragasztást tovább bonyolítja, hogy hibázásra nincs lehetőség, mivel a bélyegeket a hidaknak megfelelően párosítják (kinullázás megvalósíthatósága), így egy bélyeg elrontása esetén a híd csak külsőleg, offseteléssel nullázható.

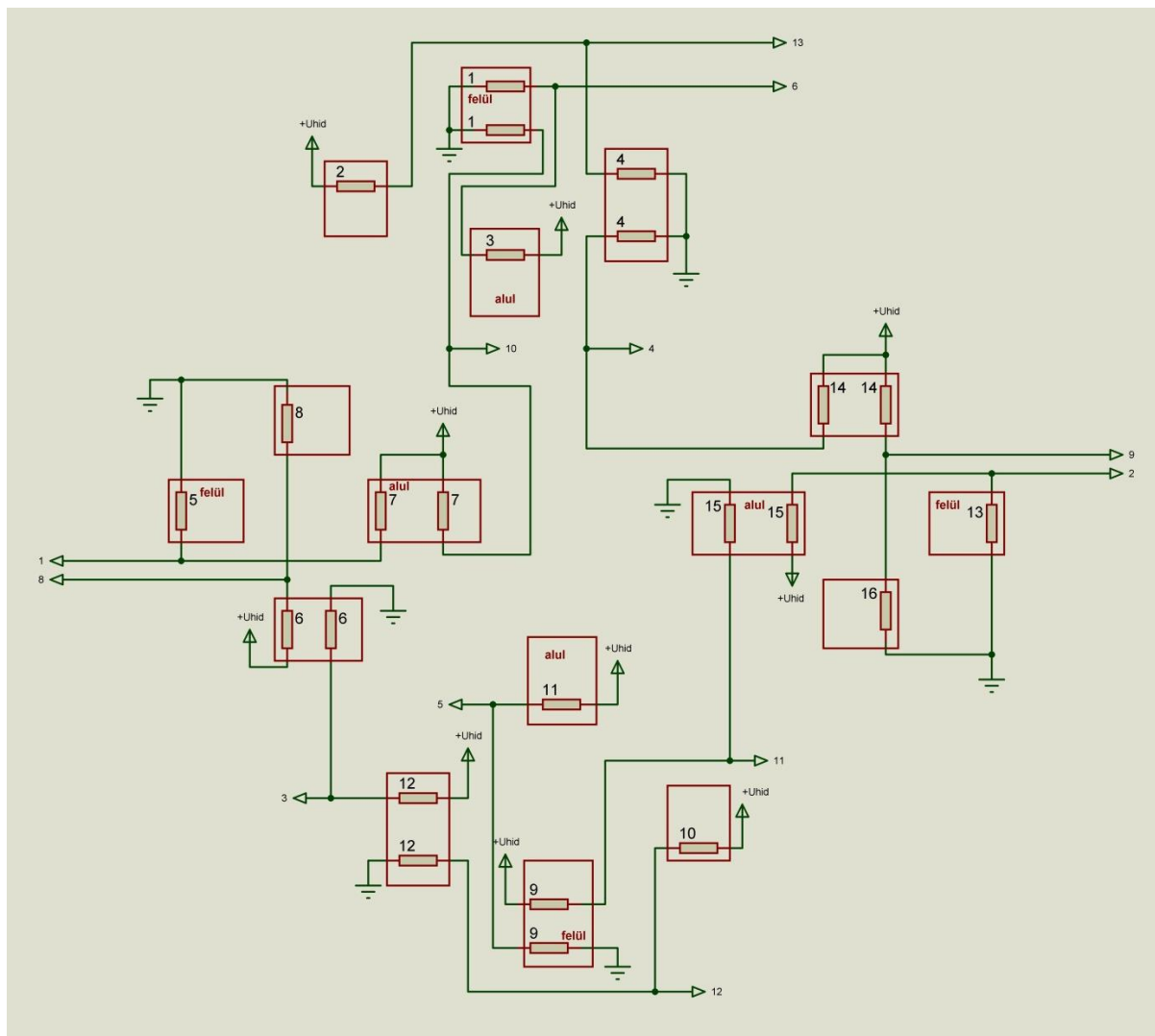
A leírt problémák miatt a ragasztást és a bélyeg felhelyezést a szenzor testen a megfelelő pozíció kijelölésével kell kezdeni. Emiatt ezt a műveletet csak mikroszkóp alatt tudtuk elvégezni.

A 31. ábrán látható felbélyegzett szenzor, amit a 32. ábrán látható huzalozási terv alapján vezetékeltük be.



31. ábra A felbélyegzett szenzor

A szenzorban négy deformálódó, téglalap keresztmetszetű oszlop található. Ezen oszlopok egyenként hat-hat darab nyúlásmérő ellenállást hordoznak, melyek páronként teljes hidat alkotnak. Mivel a szenzor felépítése szimmetrikus, ezért a szemben lévő félhidak (pl. 5,7 – 13,15) alkotnak egy teljes hidat. A huzalozáskor figyeltünk, hogy a hidak tápellátása azonos ágról történjen.



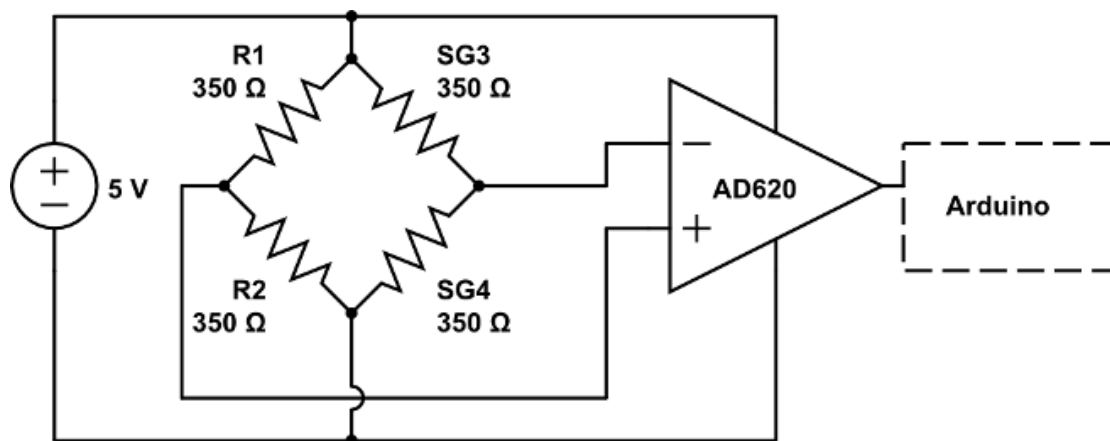
32. ábra A bélyegelrendezés és huzalozás sematikus ábrája

Mivel a szenzorunk kimenete a félhidak közös pontja és mivel az ellenállás változás $[m\Omega]$ nagyságrendű, ezért fontos a forrasztóanyag maradék folyasztószereinek eltávolítása. A folyasztószerek tulajdonságai időben változnak és ellenállás változásuk összemérhető a deformációból adódó jelszinttel, ezért jelentősen rontják a szenzor villamos tulajdonságait.

4.3. Első iterációban tervezett mérőerősítő

A szenzorban négy aktív belyeges Wheastone-hidat alkalmaztunk, ezért differenciál elven működő erősítő fokozatot terveztünk. A tervezés során fontos szempont volt a minimális torzítás, nagyfokú zaj elnyomás, a termikus- és időbeli stabilitás, a külső villamos terekre való nagyfokú érzéketlenség. A gyakorlatban ehhez különféle megoldások állnak rendelkezésre. Mi egy kevés külső alkatrészt tartalmazó elrendezést fejlesztettünk.

Az áramkört egy AD620 típusú műveleti erősítő köré építettük (33. ábra). Ennek az IC-nek az erősítési tényezője egyetlen külső ellenállással beállítható, mivel felépítéséből adódóan tartalmazza a részerősítő fokozatokat. Nagy sávszélességgel és jó zajcsillapítással rendelkezik, minimális a hőmérsékleti driftje és nagyon jó lineáris karakterisztikával rendelkezik. Ezt a terméket kifejezetten nyúlásmérő belyeges applikációkhoz fejlesztették.



33. ábra AD620 alkalmazási példa⁵

A mi megvalósításunk a 33. ábrán látható példánál jóval összetettebb megoldás.

Az IC további alkalmazási előnye, hogy beépített szinteltolással rendelkezik, így a hidak esetlegesen maradó kiegyenlítése egyszerűen megoldható. Ezt a tulajdonságát mi fokozottan felhasználtuk, mivel a hidakat nem sikerült teljesen kiegyenlítenünk. Az erősítő fokozatot még továbbá kiegészítettük szűrőáramkörökkel.

Az egység egy külső dobozban foglal helyet a robothoz közel, de a szenzortól relatíve távol. Azért került így kialakításra a rendszer, mert a szenzor mellett nem maradt hely az elektronika elhelyezésére, így a szenzor jeleit a roboton lévő védőcsőbe helyezett kábelben továbbítjuk a robotvezérlőnél elhelyezett mérőerősítőhöz.

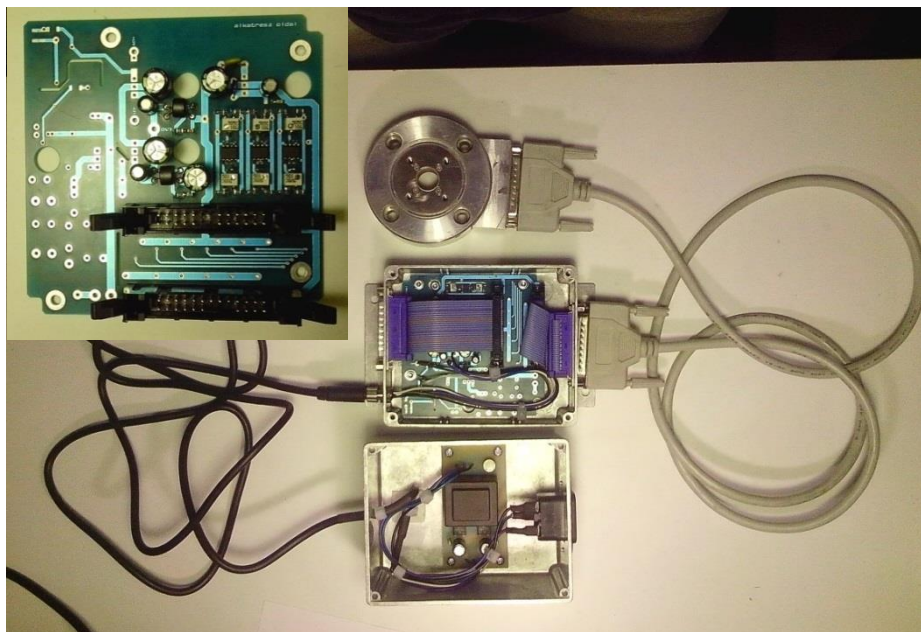
⁵Kép forrása:

<http://cta.if.ufrgs.br/projects/instrumentacao fisica/wiki/Documenta%C3%A7%C3%A3o?version=1>

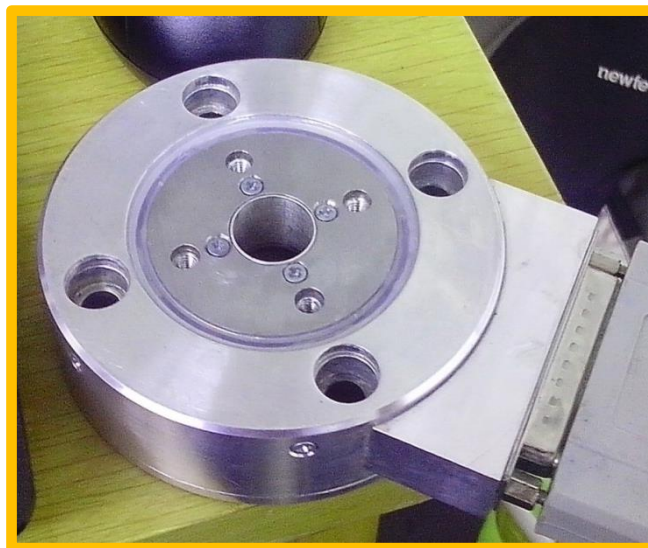
Az erősítést követően az analóg jelek feldolgozását a robotvezérlőbe integrált Acromag digitalizáló kártyával dolgozzuk fel. A későbbiekben tárgyalt (5.4. fejezet) kalibrációs mátrix is itt fut.

4.3.1. A megtervezett mérőerősítő megvalósítása

A megtervezett erősítő kétoldalas nyomtatott áramköri lapon került legyártásra, melyet az Elekterv Kft kivitelezett (34. ábra). Az elkészült szenzort a 35. ábra szemlélteti.



34. ábra Elkészült mérőerősítő a hozzátartozó szenzorral



35. ábra Az első elkészült szenzor

A nyomtatott áramköri lapot ültettük, dobozoltuk, majd működőképességét és villamos paramétereit ellenőriztük. Néhány egyszerűen kivitelezhető mérést végeztünk, mint pl. az időben stabilitás, hőmérséklet függés vizsgálata. Vizsgáltuk a szenzorkábel külső villamos

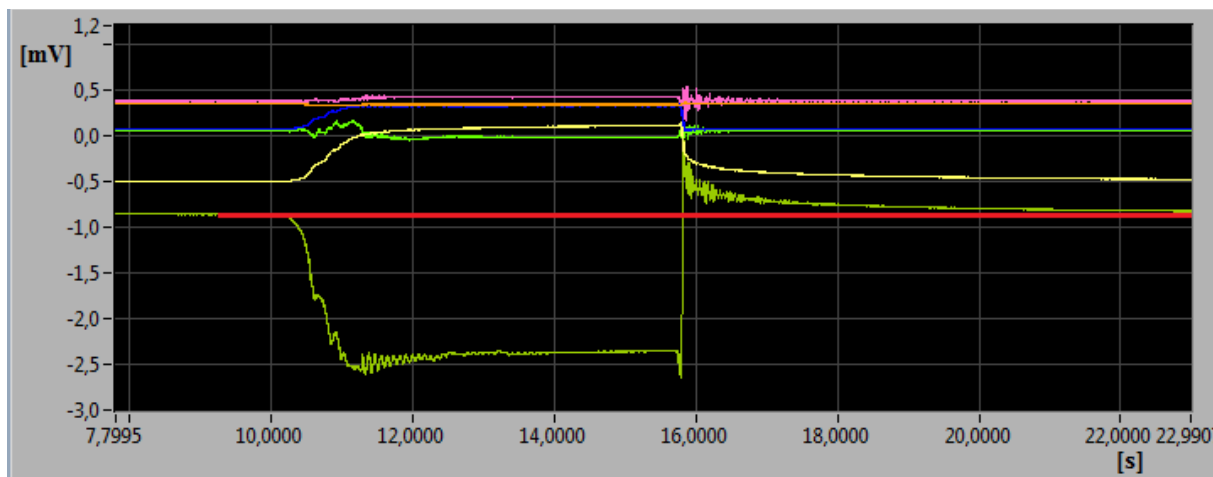
terekre való érzékenységet és a kontaktok mechanikai elmozdulásra történő villamos jelváltozását.

4.3.2. A megépített rendszer hibái

A legyártott komponenseket integráltuk a gyógytornáztató rendszerbe és méréseket végeztünk rajta. Az alábbi hibákat állapítottuk meg:

- A szenzoron lévő DSUB-25-ös csatlakozó mechanikai behatása jelentős ellenállás változást generál, ami a kimenő erősített jelekben jelentős változást okoz. Ezt a rendszer gyakorlatilag erő-, nyomatékingadozásnak érzékeli. Hátrányos, mivel a gyógytorna során az esetleges csatlakozóval történő érintkezéskor az erővisszacsatolás miatt a robotpályában érzékelhető elmozdulás tapasztalható, amely mind a páciensek mind a gyógytornászok számára a bizonytalanságot jelent, a szenzor használat lehetetlen.
- Mivel a védőcsőbe helyezett szenzorkábel a roboton jelentős hosszúságot tesz meg a vezérlőig (kb. 5-7[m]), ami alatt a robot erősáramú kábelezése közelében halad el, ezért a szórt villamos és mágneses tér hatására zajt indukál. Ezt a differenciál mérés csak részben kompenzálja.

Az előbb felsorolt két pontot a kábel árnyékolásának csillagpontos földelésével és a csatlakozó megfelelő mechanikai rögzítésével orvosoltuk, viszont a szenzorban alkalmazott ragasztóanyag az Araldit AW 106 - szobahőmérsékleten keményedő, kétkomponensű, epoxi bázisú ragasztó – időben kúszással rendelkezik (36. ábra). Ezt a mérések során tapasztaltuk és nagyobb erőhatások pillanatszerű megszűnésekor nagy fent maradó időbeni lefutással rendelkezik.



36. ábra A szenzor egységugrásnyi fel- és leterhelésekor adott válasza

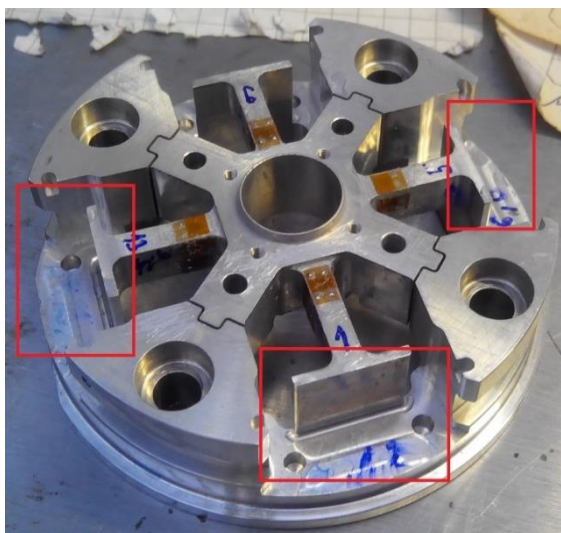
A 36. ábrán feltüntetett piros vonal segítségével jól megfigyelhető, hogy a leterhelést követően több, mint 6 másodperc szükséges az eredeti jelszint visszanyerésére. A leterheléskor megfigyelhető „túllendülés” a hirtelen tömegeltávolításkor keletkező, rezgőrendszer hatása. A méréseket a **Test Signal Viewer** szoftverrel hajtottuk végre.

A felmerült konstrukciós hibák teljes megszüntetése miatt egy teljesen új szenzor került kifejlesztésre és legyártásra.

4.4. Második iterációban tervezett mérőerősítő

A második szenzor megvalósításánál az első szenzoron tapasztalt hibákat már figyelembe vettük, s annak megfelelően állítottuk össze a követelményjegyzéket. Az első szenzorhoz képesti fő változások:

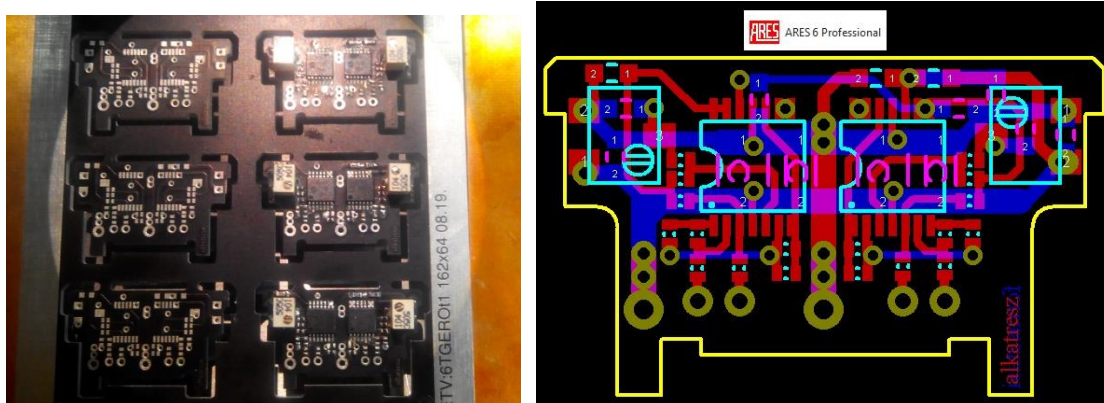
- A nagy kúszást eredményező Araldit AW 106-os ragasztót a Loctite 496 típusú Cianoakrilát alapú pillanatragasztó váltotta fel.
- A csatlakozások ellenállás változását beépített mérőerősítő felhasználásával szüntetjük meg, mivel ellenállás változás helyett feszültség szinteket továbbítunk, így a csatlakozáson esetlegesen bekövetkező [mΩ] nagyságrendű változások a már erősített jelszintben nem okoznak problémát.
- A jel-zaj viszony is kevésbé érzékeny a külső elektromos és mágneses terekre.
- A szenzorba integrált erősítők miatt az elektronika termikus stabilitását is javítottuk.
- A régebben nem használt belső helyeken kerültek kialakításra az erősítők foglalatai (37. ábra).
- Esztétikusabb megjelenést kölcsönzött az eloxált burkolat.



37. ábra Az új szenzor geometria a kialakított belső erősítők helyeivel (három NYÁK került elhelyezésre, a negyediknél a csatlakozó van)

A ragasztás technológiát leszámítva a bélyegezés és huzalozása ugyanúgy történt, mint az első szenzornál (4.2. fejezet). A Cianoakrilát típusú ragasztóval gyorsabban lehetett dolgozni, ugyanis percek alatt megkötött, szemben az Araldittal, ami a teljes kötősszilárdságát szobahőmérsékleten kb. 10 óra alatt éri el. Hátránya viszont, hogy minimális hibázási lehetőséget ad, a bélyeg felhelyezését elsőre jól kell elvégezni.

A 4.3 fejezetben ismertetett AD620-as műveleti erősítőt egy kisebb méretű, MCP664 típusra cseréltük. Ezen műveleti erősítő táptól tápig (rail-to-rail) kimenettel rendelkezik. Ez a szenzorba építésnél nélkülözhetetlen volt, mivel a cella csak egy tápfeszültségről működik, ellentétben a korábbi külső erősítővel szemben, ami szimmetrikus tápfeszültségről üzemelt. Ez egy sokkal modernebb műveleti erősítő, mint az AD620, mert beépített kimeneti áramkorlátozással (zárlatvédelemmel) és nagy kimenő áramú kimenettel rendelkezik (70[mA]), ami ilyen szinten nem szokványos érték. Sokkal kisebb (TSSOP14) tokban elérhető, mint a korábbi. Ugyan több külső alkatrész szükséges egy mérőerősítő kialakításához, viszont a villamos paraméterei és átviteli tulajdonságai teljes mértékben megfelelnek a felhasználási követelményeknek (38. ábra).

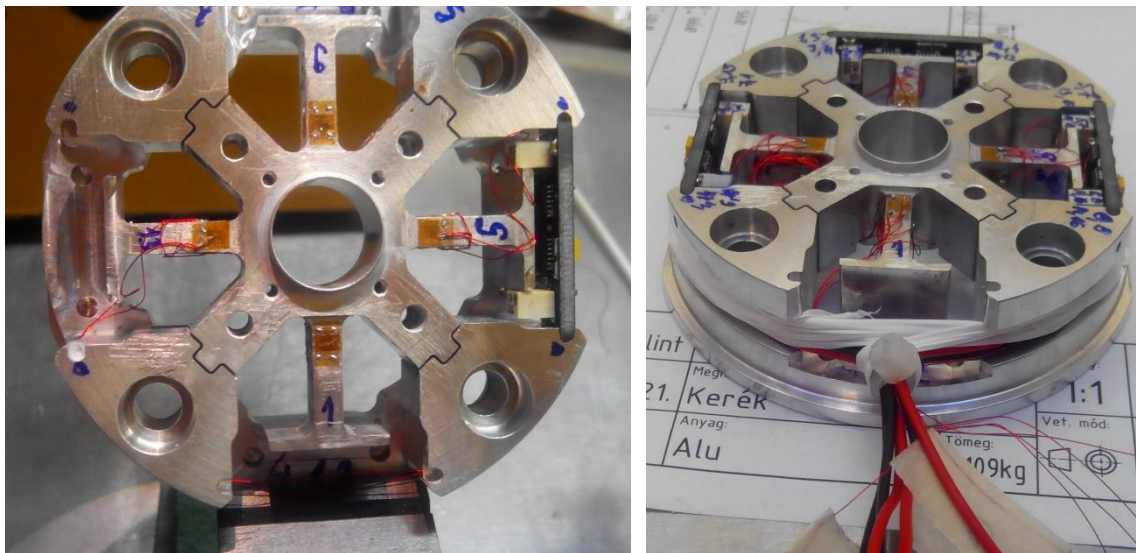


38. ábra A beültetett erősítő, illetve annak NYÁK terve

A konstrukciós kialakítás és a geometriai méretek miatt a huzalozás és a mérőerősítők elhelyezése időben nem elkülönülő folyamat. A szenzorban összesen három mérőelektronika került elhelyezésre, így egy modulon két full-híd jelének erősítését végezzük, ezért látható a 38. ábra jobb oldalán (NYÁK terv) két IC (türkiz szín), melyek tokonként négy műveleti erősítőt tartalmaznak. Mivel ezek az erősítők tagonként nem offszetálhatók, ezért a NYÁK-on e két, kisméretű cermet helitrimmer (precíziós potméter). Ezekkel végezzük a hidak kiegyenlítését.

A 39. ábra a felbélyegzett és behuzalozott, új szenzortestet mutatja. A baloldalon csak egy NYÁK került beültetésre, míg a jobb oldali ábra a teljes kiépítettséget mutatja.

A szenzorban csak a jelek két dekád nagyságú erősítését végezzük (részletes erősítés), mivel a szenzor 5[V]-ról üzemel. A robotos rendszerben külső okok miatt nekünk $\pm 10[V]$ kimenő jelszintre van szükségünk, ezért egy külső fokozattal szinteltolást és további erősítést valósítunk meg. A megoldás nagy előnye a már említett jel-zaj viszony javulása, illetve a már önmagában is használható kimeneti feszültséggel rendelkezik.



39. ábra Felbélyegzett és behuzalozott, új szenzortest

A 40. ábra az elkészített, komplett szenzort ábrázolja, a 41. ábra pedig az üzemeltetési körülményét.

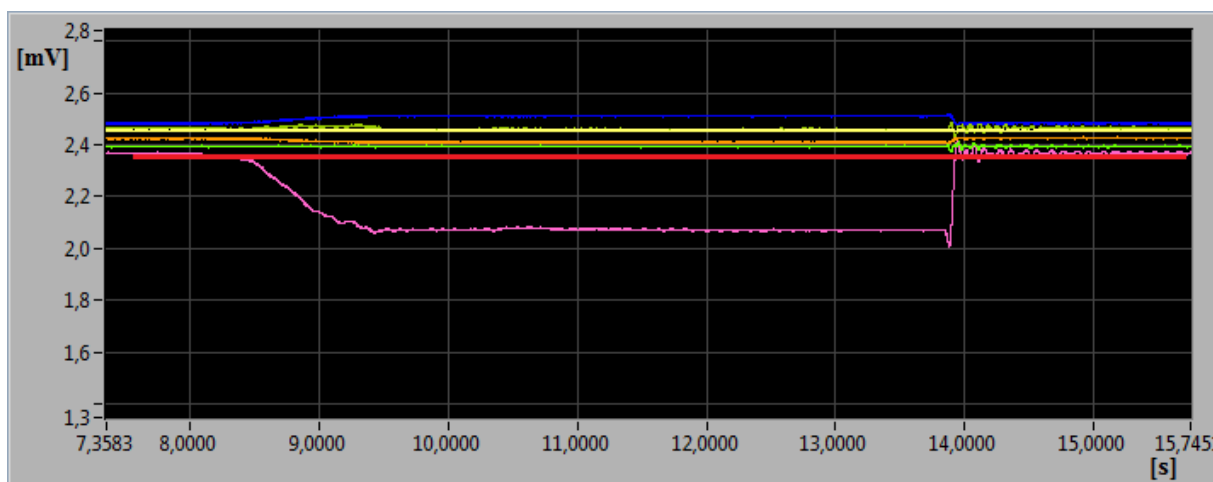


40. ábra A végleges konstrukció



41. ábra Mindkét szenzor alkalmazási környezete (piros keretben a beépített erősítővel rendelkező szenzor, míg narancssárga keretben a beépített erősítőt még nem tartalmazó szenzor látható)

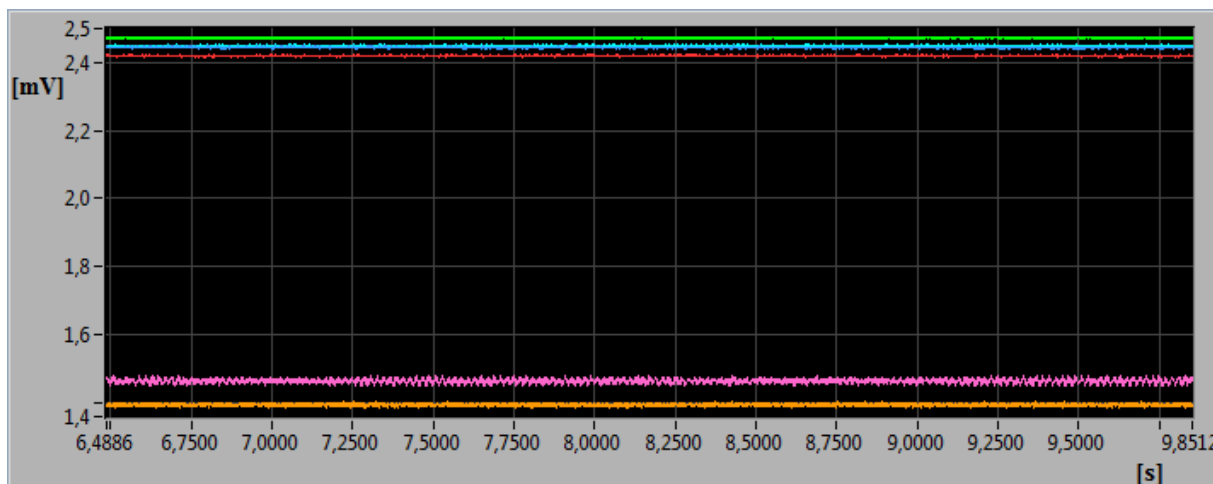
Az új szenzorral is végeztünk méréseket, és azt tapasztaltuk, hogy a Cianoakrilát alapú ragasztóval történő rögzítés megszüntette a kúszást. Névleges terhelésen történő leterheléskor gyakorlatilag azonnal visszanyeri a terhelés nélküli értékét (42. ábra). Az IRB1600 (41. ábrán a plafonról lógó robot) szenzorának kábele három méterrel hosszabb, mint a kisebbé, de a feszültség szinten történő kommunikáció miatt mégsem jelentkezik az elektromágneses zaj okozta zavar.



42. ábra Az új szenzor fel- és leterhelése

A piros vonal a diagramon a jól szemlélteti, hogy a hirtelen leterhelést követően gyakorlatilag azonnal visszanyerte az eredeti jelszintet.

A 43. ábrán feltüntetett diagramon szemléltetjük a két szenzor közötti, általunk „szórózásnak” hívott jelenség különbségét. A felső jelek a beépített erősítővel rendelkező szenzoré, míg az alsó a másik, általunk gyártott eszközé. A jelenség a hosszú robotkábelben történő jelátvitelből adódik.



43. ábra A szenzor jelek "szórózése" közötti különbség

A 2,4-2,5 [mV] közötti jelek az új szenzoré, míg az 1,4 [mV] körüli, a régi szenzor jelei. Azonnal észrevehető, hogy a régi szenzor ezen tulajdonsága jóval rosszabb, mint az új szenzoré, így kijelenthető, hogy ezt a problémát is sikerült orvosolni. Megjegyzésként megemlítendő, hogy azért nem látszik mind a 12 jel (szenzoronként hat), mert az egy diagramon történő ábrázolásakor (a skálázási hibát kiküszöbölve) nem fért volna el az összes.

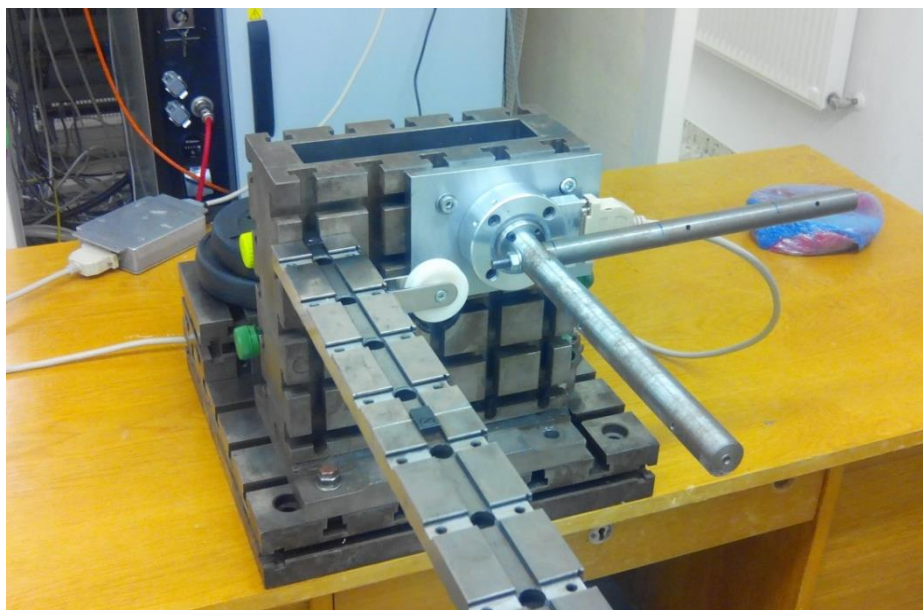
Összességében kijelenthető, hogy az új szenzor műszakilag minden paraméteren jelentősen javított.

5. Szenzor kalibrálása

A kalibrálás célja a nyúlásmérő bélyegeken mért feszültségek és a terhelőerők közötti összefüggés meghatározása. A kalibrációs mátrix meghatározásához a robotvezérlőben elhelyezett, erő adatokat feldolgozó kártya környezetében kellett felépítenünk egy kalibrálásra alkalmas mérőcellát. A cella elemekből összerakható készülékekből (EÖK) épült, melyet a BME Gyártástudomány és – technológia Tanszék biztosított számunkra. Mindkét szenzor kalibrációja ugyanazon elven és módszerrel történt.

5.1. Kalibráláshoz szükséges mérőcella bemutatása

Az EÖK egy nagy pontossággal megmunkált, egymással szinte minden esetben összeépíthető moduláris készülékelemek halmaza. Az összeállított mérőcella a 44. ábrán látható.

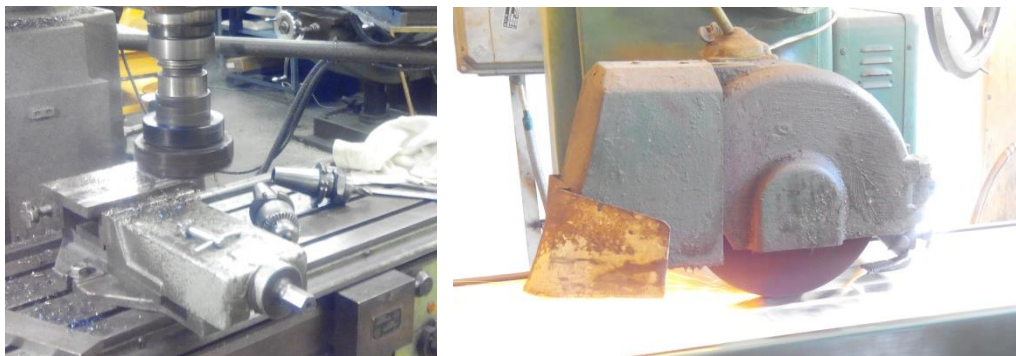


44. ábra Az felépített kalibráló cella

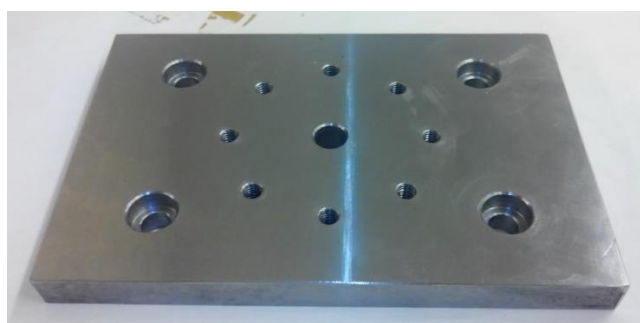
A mérőcella működési elve, hogy ismert tömegekkel terheljük a szenzort ismert távolságokra és feljegyezzük az arra adott válaszát. A gravitáció ismeretében a súlyerő könnyen meghatározható.

A szenzor központi furatán keresztül, egy általunk készített ún. kalibráló rúdrendszert rögzítettünk. Ez két, egymásra merőleges acélrúdból állt, melyen meghatározott távolságonként jelöléseket helyeztünk el. A kalibrálás során a jelöléseknek megfelelően lógattuk fel a tömeget. A szenzor megfelelő működése csak abban az esetben érhető el, ha gondoskodunk megfelelő alátámasztásról. Ezért gyártanunk kellett egy nagy merevséggel és keménységgel rendelkező, köszörült felületű alátétet (45. ábra, 46. ábra). Az alátétet

vízszintesen beállítva garantáltuk, hogy a szenzort mindig a számunkra megfelelő pozícióba forgathassuk.

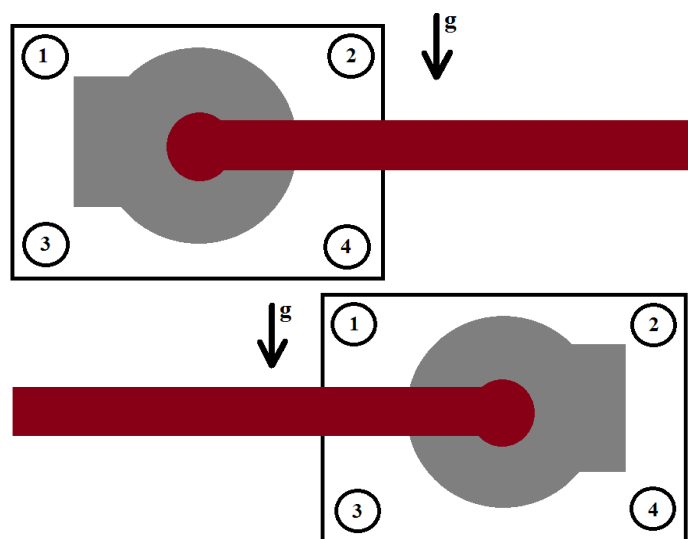


45. ábra Az alátét marása és köszörülése



46. ábra Az elkészült alátét

A középben látható 8 menetes furat 45 fokként van elhelyezve, a szenzoron lévő osztókör átmérőjével megegyezően. Ezek segítségével tudtuk azt elérni, hogy a megfelelően beállított alátét elmozdítása nélkül is tudtuk a szenzort az általunk megkívánt pozícióba forgatni (47. ábra).



47. ábra Sematikus rajz a kívánt pozícióba történő forgatásról. A számok az alátét rögzítési pontja, melyekből egyértelműen kiderül, hogy csak a szenzor volt forgatva.

Az alátétet egy nagy tömegű és merevségű, derékszög EÖK elemre rögzítettük, amit egy szintén nagy tömegű és merevségű alaplapra csavaroztunk. Az alaplapra azért volt szükség, hogy a rendszert ellensúlyokkal biztosítani tudjuk a felborulás ellen.

A 44. ábrán látható még egy, a derékszög elemből kinyúló elem, melyen egy csiga került elhelyezésre. A mérési folyamat tervezésénél arra a következtetésre jutottunk, hogy a kalibrálás felgyorsítható, ha a csigán átvetve a tömeget, a gravitációs vektorra merőlegesen is mérünk, redukálva ezzel a szenzor forgatását az alátéten. Menet közben viszont ezt a lehetőséget elvetettük, mivel úgy ítéltük meg, hogy a csiga elhelyezésével és a benne keletkező csapsúrlódással jelentős mérési hibát vinnénk az eredményekbe.

Összegzőként elmondható, hogy a mérőcella gyorsan elkészíthető, a vele megoldható mérési elv egyszerűen kivitelezhető volt.

5.2. A kalibrációs folyamat bemutatása

Ahogy az 5.1. fejezetben is említettük, a mérési elv a következő volt: ismert tömegekkel, a szenzort ismert távolságokra megterheljük a kalibrációs rudazaton keresztül, majd az arra adott válaszjeleket feljegyezzük.

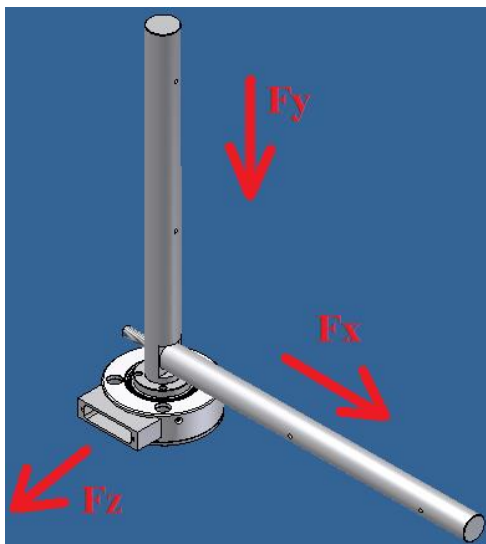
Első lépésként nagy pontossággal ismert tömegeket kellett szereznünk. Mivel hitelesített tömegek beszerzésére nem volt módunk, így más alternatívát választottunk. Kereskedelembe kapható súlyzókészletet vettünk (egy szettben 4-4[db] 1[kg] és 2,5[kg] névleges tömegű súlyok voltak), melyeket hitelesített élelmiszer mérlegen ± 5 [g] pontossággal lemértük. A súlyokat vezetékek segítségével akasztottuk a kalibráló rudakra, melyek tömegét szintén meghatároztuk. A 48. ábrán egy mérési folyamatot láthatunk.



48. ábra A szenzor terhelés közben

A szenzort hozzacsatlakoztattuk a robotvezérlőben található erőadat feldolgozó kártyához, majd belső hálózaton keresztül rácsatlakoztunk a Test Signal Viewer szoftverrel.

Megvártuk, amíg a tömeg felveszi az egyensúlyi helyzetét, majd a programban elindítottuk a mintavételezési folyamatot. Minden mintavételezés 5-6 másodpercig futott a megfelelő mennyiségű adatkinyerése érdekében.



49. ábra A szenzoron értelmezett koordinátarendszer

A 49. ábrán látható a szenzoron értelmezett koordinátarendszer. Ennek megfelelően a 2. táblázatban van összefoglalva, hogy melyik síkon, milyen távolságra és mennyi tömeggel terhelve kaptunk meg egy adatsort.

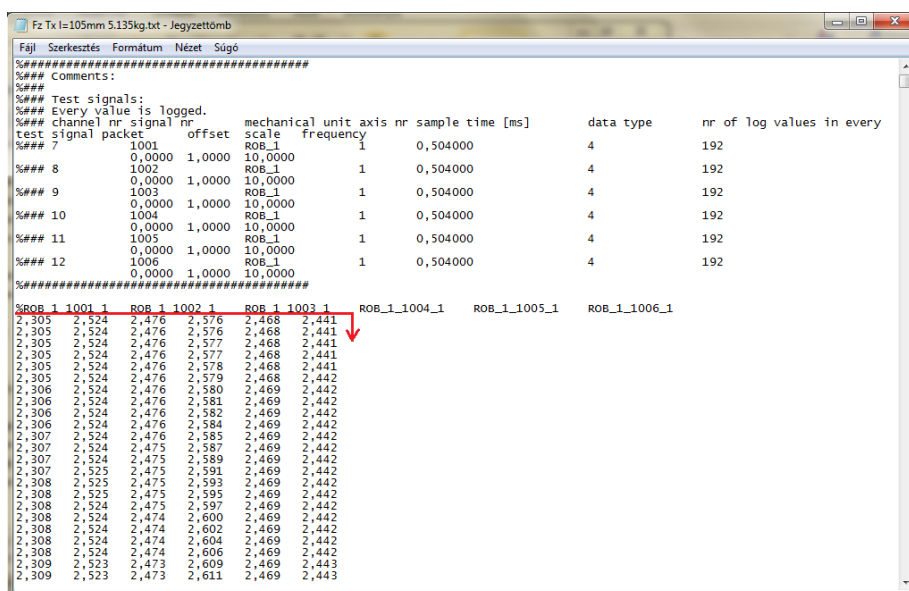
2. táblázat A különböző mérési pontok adatai

Sík	Ébredő terhelés	Tömeg [kg]	Távolság [mm]
XY	$F_Z ; M_X$ (Y tengely mentén felfüggesztve a tömeg)	2,532	15
			105
			210
		5,135	15
			105
			210
	$F_Z ; M_Y$ (X tengely mentén felfüggesztve a tömeg)	2,532	16
			121
			226
		5,135	16
			121
			226

2. táblázat Folytatás

Sík	Ébredő terhelés	Tömeg [kg]	Távolság [mm]
YZ	$F_X ; M_Z$ (Y tengely mentén felfüggesztve a tömeg)	2,532	15
			105
			210
	5,135		15
			105
			210
XZ	$F_Y ; M_Z$ (X tengely mentén felfüggesztve a tömeg)	2,532	16
			121
			226
	5,135		16
			121
			226

A táblázat első oszlopa azt a síkot tartalmazza, amelyre a gravitációs vektor merőleges (tehát a vízszintes). A következő oszlop az adott síkra fordított szenzoron ébredő mechanikai terhelést mutatja. Például az „ F_X ” az X - tengellyel párhuzamos erőt, míg a „ M_Z ” a Z - tengely körül forgatónyomatékot jelenti. Az utolsó két oszlop tartalmazza, hogy az adott tömeggel milyen távolságokon terheltünk. Megjegyzendő, hogy minden síkban egy terheletlen állapotot is mértünk, így ehhez hozzáadva a távolság oszlop sorainak a számát kiderül, hogy összesen 27 [db] .txt kiterjesztésben megkapott adathalmazunk volt.



50. ábra A mérések során kapott adathalmaz formátuma

Egy ilyen adathalmazra példa a 50. ábra, melyen a piros nyíl jelöli, honnantól vannak a feldolgozandó adatok, melyeket az 5.4. fejezetben részletezett számítótáblába importáltunk.

5.3. A kalibrációs mátrix meghatározásának elmélete

Az irodalomkutatásaink és Jurák Mihály kollégánk segítségével olyan információkhoz jutottunk, melyek nagyban hozzájárultak jelen szenzorok kalibrációs mátrixainak a meghatározásához.

A 2.4. fejezetben taglaltak szerint itt is felírható az (5.1.) egyenlet, mely egyértelműen definiálja a problémát.

$$\bar{F} = \bar{T} \cdot \bar{q} \quad (5.1.)$$

ahol: $\bar{F}$ – ismert terhelővektor

$\bar{T}$ – keresendő kalibrációs mátrix

$\bar{q}$ – adott terhelésre kapott feszültségjel vektor

Az (5.1.) vektoregyenletet mátrixos formája (5.2.):

$$\begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \\ M_X \\ M_Y \\ M_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} & T_{15} & T_{16} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} & T_{25} & T_{26} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} & T_{35} & T_{36} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} & T_{45} & T_{46} \\ T_{51} & T_{52} & T_{53} & T_{54} & T_{55} & T_{56} \\ T_{61} & T_{62} & T_{63} & T_{64} & T_{65} & T_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix} \quad (5.2.)$$

Az egyenlet bal oldalán szerepel az ismert tömegekkel létrehozott terhelésvektor ($\bar{F}$), amelyet a jobb oldalon lévő mátrix ($\bar{T}$), a keresendő **kalibrációs mátrix** és a szenzor által, megadott terhelésre szolgáltatott feszültségjelek szorzatából adódik.

A $\bar{T}$ mátrixot ebben a formában közvetlen mérésekkel nem lehet meghatározni, ezért a (5.3.) egyenlet szerint kell átalakítanunk az (5.1.) egyenletet.

$$\bar{q} = \bar{B} \times \bar{F} \quad (5.3.)$$

A (5.3.) egyenletben szereplő $\bar{B}$ mátrix a kalibrációs mátrix inverze, azaz $\bar{B} = \bar{T}^{-1}$.

Viszont ebben az esetben sem tudjuk még közvetlenül meghatározni a $\bar{B}$ mátrixot, mivel elvégezve a szorzásokat, több ismeretlent kapnánk, mint amennyi egyenletünk lenne. A (5.4.) egyenlettől kezdve egy egyszerűbb példán mutatjuk be a problémát, s annak a megoldását.

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F \\ M \end{bmatrix} \quad (5.4.)$$

A szorzást elvégezve a következőt kapjuk:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} \cdot F + B_{12} \cdot M \\ B_{21} \cdot F + B_{22} \cdot M \end{bmatrix} \quad (5.5.)$$

Az (5.5.) egyenletből egyértelműen látszik, hogy két egyenletet kaptunk, viszont négy ismeretlenünk van. Az egyenletrendszer alulhatározottságát a következőképpen lehet kiküszöbölni:

Első esetben (5.6.) csak tisztán erővel terheljük a rendszert, azaz $\mathbf{M} = \mathbf{0}$.

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.6.)$$

A szorzást elvégezve a következőt kapjuk (5.7.):

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} \cdot F + B_{12} \cdot 0 \\ B_{21} \cdot F + B_{22} \cdot 0 \end{bmatrix} \quad (5.7.)$$

Ebből azonnal látszik, hogy a példa mátrix első oszlopát meg is kaptuk (5.8.) és (5.9.):

$$B_{11} = \frac{q_1}{F} \quad (5.8.)$$

$$B_{21} = \frac{q_2}{F} \quad (5.9.)$$

Második esetben (5.10.) is hasonlóan járunk el, viszont itt csak tisztán nyomatékkal terheljük a rendszert, azaz $\mathbf{F} = \mathbf{0}$.

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ M \end{bmatrix} \quad (5.10.)$$

Ismételten elvégezve a szorzást, a következőt kapjuk (5.11.):

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} \cdot 0 + B_{12} \cdot M \\ B_{21} \cdot 0 + B_{22} \cdot M \end{bmatrix} \quad (5.11.)$$

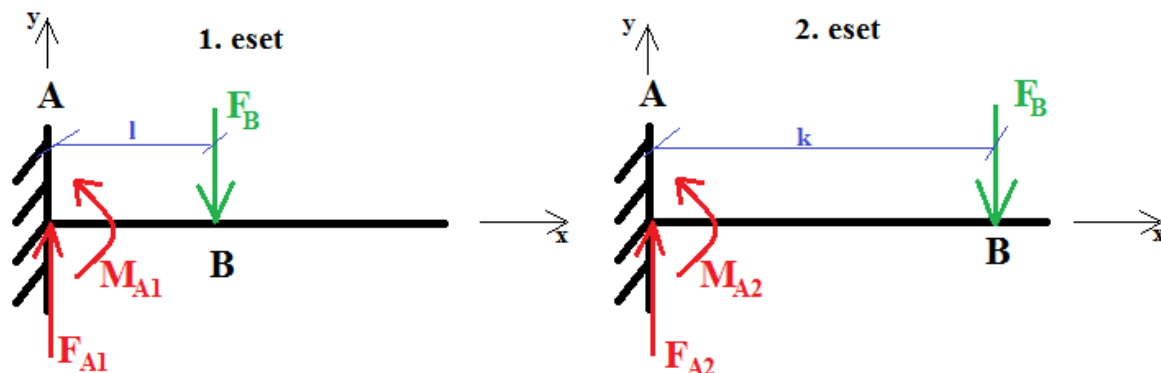
Innen ugyancsak azonnal látható, hogyan alakul a mátrix másik két elemének a meghatározása (5.12.) és (5.13.):

$$B_{12} = \frac{q_1}{M} \quad (5.12.)$$

$$B_{22} = \frac{q_2}{M} \quad (5.13.)$$

A kalibrációs cella mérési elvét megvizsgálva, felvetődik a következő kérdés: *Hogyan tudunk csak tisztán erő- vagy csak tisztán nyomatékterhelést előállítani?* A **megoldást** a mechanikában ismert **szuperpozíció** elve adja. A lényege, hogy **két tetszőleges erőrendszerre** adott **eredő reakció** megegyezik a **külön-külön alkalmazott erőrendszerek reakcióinak összegével**. Mindez lineáris rendszerek és konstans szorzás esetén is igaz.

Az 51. ábrán egy sematikus rajzot láthatunk a szenzor terheléséről és az ébredő reakcióerőkről.



51. ábra Szenzor egy síkban történő terhelése két esetben súlytalan tartó esetén

Az 1. esetben ismert F_B terhelést helyezünk a befogástól (szenzortól) l távolságra. Ekkor a befogásban egy F_{A1} reakcióerő és M_{A1} reakciónyomaték ébred. Statikai ismereteinkből tudjuk, hogy

$$F_{A1} = F_B \text{ és } M_{A1} = F_B \cdot l$$

A 2. esetben ugyanazzal az F_B terheléssel terhelünk, de most a befogástól k távolságra. Ahogy az előző esetben, itt is egyszerűen meghatározhatjuk a reakcióerőt és –nyomatékot:

$$F_{A2} = F_B \text{ és } M_{A2} = F_B \cdot k$$

A (5.4.) és (5.5.) egyenletet felhasználva kapjuk a következőket:

$$\begin{bmatrix} q_{11} \\ q_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{A1} \\ M_{A1} \end{bmatrix} \quad (5.14.)$$

$$\begin{bmatrix} q_{21} \\ q_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{A2} \\ M_{A2} \end{bmatrix} \quad (5.15.)$$

A (5.14.) és (5.15.) egyenlet különbségét képezve kapjuk az alábbiakat:

$$\begin{bmatrix} q_{11} \\ q_{12} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} q_{21} \\ q_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{A1} \\ M_{A1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{A2} \\ M_{A2} \end{bmatrix} \quad (5.16.)$$

A (5.16.) egyenletet rendezve, illetve felhasználva, hogy az F_{A1} és az F_{A2} egyenlő, a (5.17.) egyenletet kapjuk:

$$\begin{bmatrix} q_{11} - q_{21} \\ q_{12} - q_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ M_{A1} - M_{A2} \end{bmatrix} \quad (5.17.)$$

A (5.11.), (5.12.) és (5.13.) egyenletet felhasználva, továbbá, hogy a q_{11} , q_{12} , q_{21} , q_{22} , M_{A1} , M_{A2} ismeretek, a B_{12} és B_{22} könnyedén meghatározható:

$$B_{12} = \frac{q_{11} - q_{21}}{M_{A1} - M_{A2}} \quad (5.18.)$$

$$B_{22} = \frac{q_{12} - q_{22}}{M_{A1} - M_{A2}} \quad (5.19.)$$

A (5.18.) és (5.19.) egyenletben kapott értékeket behelyettesítve a (5.14.) vagy (5.15.) egyenletbe, majd azt megoldva, megkapjuk a példa kalibrációs mátrix inverzét. Tehát az utolsó műveletként a kapott $\bar{\bar{B}}$ mátrixot invertálni kell (5.20.).

$$\bar{\bar{B}}^{-1} = \bar{\bar{T}} \quad (5.20.)$$

A valós esetben egy 6x6-os mátrixot keresünk, amelyet a fent levezetett példa analógiájára meghatározhatók.

A 2. táblázatban ismertetett terhelések az inverz mátrixnak a következő oszlopait adják meg.

$$\bar{\bar{T}}^{-1} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} & T_{15} & T_{16} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} & T_{25} & T_{26} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} & T_{35} & T_{36} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} & T_{45} & T_{46} \\ T_{51} & T_{52} & T_{53} & T_{54} & T_{55} & T_{56} \\ T_{61} & T_{62} & T_{63} & T_{64} & T_{65} & T_{66} \end{bmatrix}$$

$$\{F_Z | M_X\}$$

$$\{F_Z | M_y\}$$

$$\{F_x | M_z\}$$

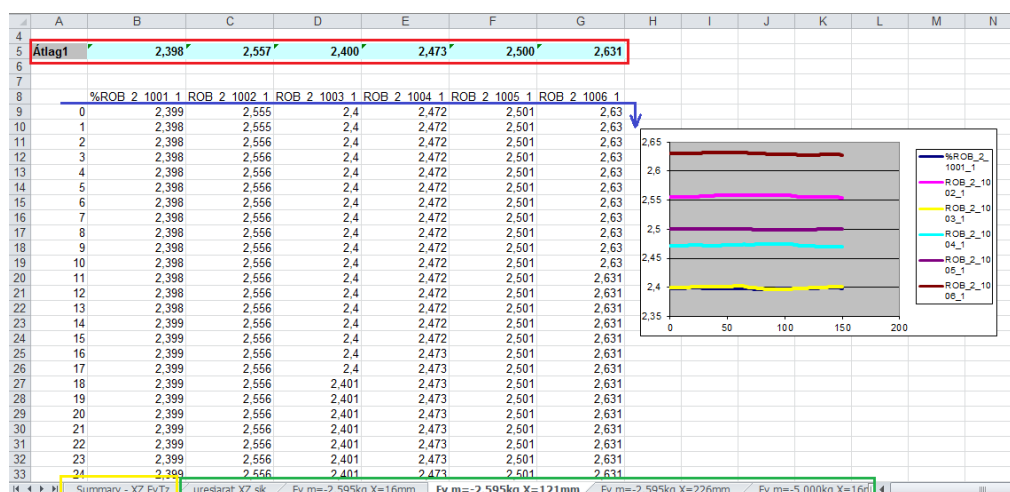
$$\{F_y | M_z\}$$

Azért vannak duplán szereplő értékek (F_Z , M_Z), mert ennyi mérésből tudunk minden szükséges adatot megkapni, továbbá önellenőrzésre, átlagképzésre felhasználhatók.

5.4. A kalibrációs mátrix kiszámítása

Az 5.3. fejezetben részletezett elméletre elkészítettünk egy Excel számítótáblát, melybe feltöltve az adatokat, megadja a kalibrációs mátrixot.

Ehhez első lépésben a kapott *.txt fájlokból (49. ábrán) kimásoljuk, majd a megfelelő helyre beillesztjük (52. ábra) az utolsó 100-150 adatsort. Ennek indoka, hogy a mintavételezett adatok eddigre biztosan állandósulnak, nagy kiugrások nem szerepelnek köztük.



52. ábra A számítás első lépése, adatok feltöltése a táblába

Alul a zöld keretezett részben látható, hogy minden egyes méréshez (adott sík, súly, távolság) tartozik egy Excel munkafüzet, ahova az oda való mérési adatokat beimportáljuk

Az 53. ábrán a már említett „Summary” munkafüzet látható. A pirossal keretezett táblázat rész az előző munkafüzetek átlagai átmásolva ide (adott terhelésre és távolságra lebontva). Alatta narancssárgával az üresjáratú terhelés során adott feszültségjelekhez viszonyított, relatív jelek figyelhetők meg. A zölddel jelölt részen a számított reakcióerők és – nyomatékok szerepelnek. A világoskékkel keretezett táblázatban az 5.3. fejezetben bemutatott példa alapján, a (18.) és (19.) egyenleteknek megfelelően meghatároztuk az adott nyomatéki értékhez tartozó oszlopot (M_Z). A nyomatéki értékekhez tartozó táblázatot felhasználva meghatároztuk az adott erőértékhez tartozó inverz kalibrációs mátrix oszlopát (F_Y).

53. ábra Az inverz kalibrációs mátrix egy erő és egy nyomatéki oszlopának a meghatározása

{ 44 }

Az így kiszámolt értékeket egy új Excel táblázatba importáltuk, ahogy az 54. ábrán is látható. A kapott sorokat a pirossal keretezett táblázat megfelelő oszlopába kell beírni. A narancssárga kerettel jelölt táblázat az Excel „INVERZ.MATRIX{)” függvény felhasználásával invertálja mátrixot, így **megkapjuk az abszolút kalibrációs mátrixot**.

Viszont a robotprogramba a szenzor méréstartományát is figyelembe vett kalibrációs mátrixot kell feltölteni, így a zölddel jelölt (3.2. fejezetben részletesen ismertetett) határértékek segítségével kiszámoltuk az inverz kalibrációs mátrix relatív értékeit (világoskék keret), majd ebből az invertáló függvény segítségével **előállítottuk** a robotprogram számára is hasznosítható **relatív kalibrációs mátrixot** (sötétkék keret).

Ez a relatív mátrix jól tükrözi a kalibráció és a szenzor megfelelőségét. Mivel a kivezérlés és a terhelés is relatív értékekkel van ábrázolva, így a főátló értékeinek kell a fő komponenseket tartalmaznia. A diagonálison kívüli nagy értékek vagy hibás bélyeg felragasztást, vagy rossz mérést, illetve kalibrációs számítást tükröznek

Force - Raw transformation			Absolute Transformation Matrix						
raw data	scale		Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	
60,268	1		0,60	0,02	0,18	3,59	0,24	4,81	
-3,598	1		-0,04	0,56	-0,02	0,07	-0,10	0,62	
9,715	1		0,10	-0,08	0,82	-3,28	0,43	-3,67	
-6,926	1		-0,07	0,03	1,29	43,85	1,73	0,73	
-14,259	1		-0,14	-0,04	0,01	-1,30	42,31	0,73	
-102,182	1		-1,02	-0,08	0,04	0,03	-0,21	46,74	
			[mV/N]	[mV/N]	[mV/N]	[mV/Nm]	[mV/Nm]	[mV/Nm]	

Raw - Force transformation			Absolute Transformation matrix (F/V)						
Force	scale		Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	
-6,97	1		1,403	-0,088	-0,115	-0,123	-0,003	-0,150	
-372,69	1		0,056	1,794	0,041	-0,004	0,004	-0,026	
-48,49	1		-0,017	0,163	1,095	0,083	-0,013	0,084	
1,75	1		0,002	-0,006	-0,032	0,020	-0,001	-0,003	
-0,25	1		0,004	0,001	-0,002	0,000	0,024	-0,001	
-2,24	1		0,031	0,001	-0,003	-0,003	0,000	0,018	

Force						
100	0	0	0	0	0	0 [N], [Nm]
200	-300	200	15	-25	15	range
50,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	

[V]		[rel]		Relative Transformation Matrix						
Output	scale	Output		Fx	Fy	Fz	Tx	Ty	Tz	
0,060	1	0,0603		0,121	-0,007	0,037	0,054	-0,006	0,072	
-0,004	1	-0,0036		-0,007	-0,167	-0,004	0,001	0,003	0,009	
0,010	1	0,0097		0,019	0,024	0,164	-0,049	-0,011	-0,055	
-0,007	1	-0,0069		-0,014	-0,008	0,258	0,658	-0,043	0,011	
-0,014	1	-0,0143		-0,029	0,011	0,002	-0,020	-1,058	0,011	
-0,102	1	-0,1022		-0,204	0,025	0,008	0,001	0,005	0,701	

[N]		[rel]		Relative Transformation matrix (relF/V)						
Force	scale	Force		Fx	Fy	Fz	Tx	Ty	Tz	
-6,97	200	-0,0349		7,014	-0,439	-0,573	-0,617	-0,014	-0,751	
-372,69	-300	1,2423		-0,188	-5,980	-0,137	0,014	-0,012	0,087	
-48,49	200	-0,2425		-0,087	0,817	5,475	0,413	-0,067	0,422	
1,75	15	0,1170		0,134	-0,404	-2,149	1,348	-0,036	-0,197	
-0,25	-25	0,0098		-0,172	-0,042	0,063	-0,009	-0,945	0,038	
-2,24	15	-0,1496		2,053	0,072	-0,227	-0,186	0,004	1,199	

54. ábra A kalibrációs mátrix meghatározása

A kalibrálási műveletek és a kalibrációs mátrixok meghatározásában nagyon nagy segítségünkre volt kollégánk, Jurák Mihály, a REHAROB rendszer fő szoftvermérnöke.

6. Az előállított szenzorok kiértékelése

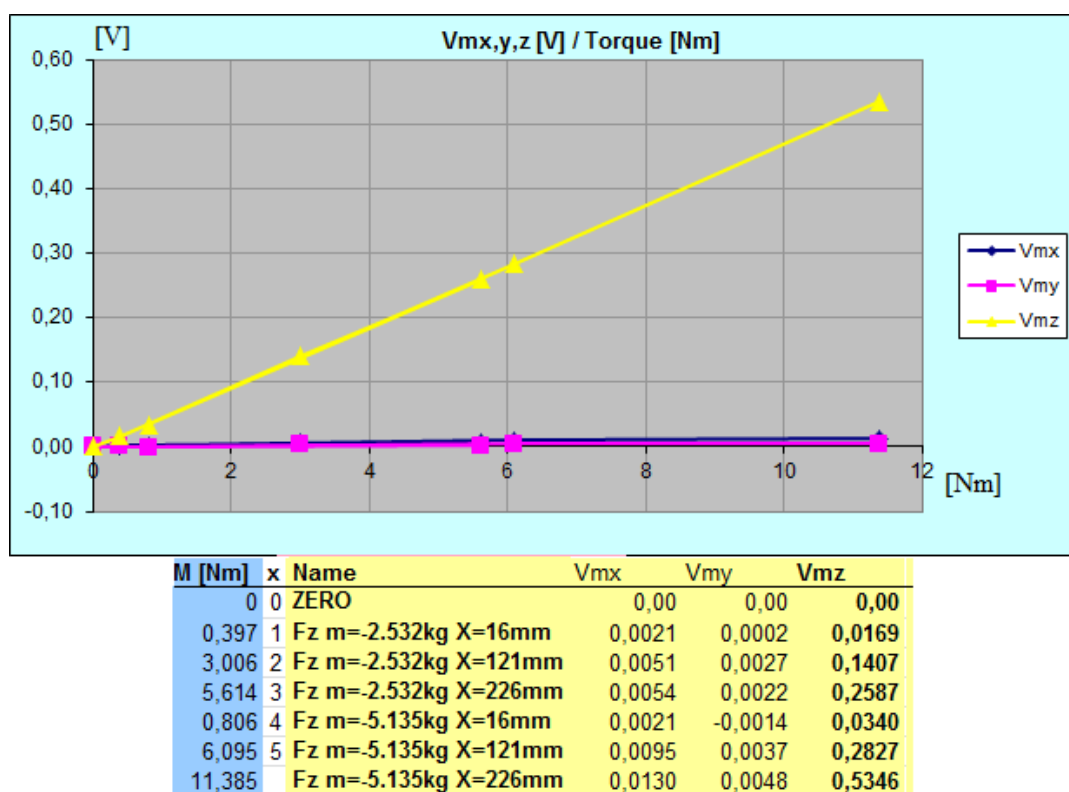
A kalibrációs mátrixok a robotprogramba történő feltöltését követően tudtuk tesztelni az előállított szenzorok működőképességét. Folyamatos használat során problémák nem adódtak, csupán a mátrixot kellett a robotprogramban finom hangolni. Erre azért volt szükség, mert a kalibrációs folyamat során olyan apróbb mérési hibákat vittünk a folyamatba, melyek a végső számításokig jelen maradtak.

A tesztelések és mérések során több műszaki paramétert is meghatároztunk, illetve részletes költségelemzést hajtottunk végre, hogy megbizonyosodjunk a szenzorok általunk történő kifejlesztésének létjogosultságáról.

6.1. Műszaki paraméterek meghatározása

Fontos volt leellenőrizni, hogy az elkészített szenzorok az elméletnek megfelelően működnek, így különböző tesztek, számításokat végeztünk el. Viszont idő hiányában csak a belső erősítővel rendelkező szenzort vetettük alá különböző vizsgálatoknak.

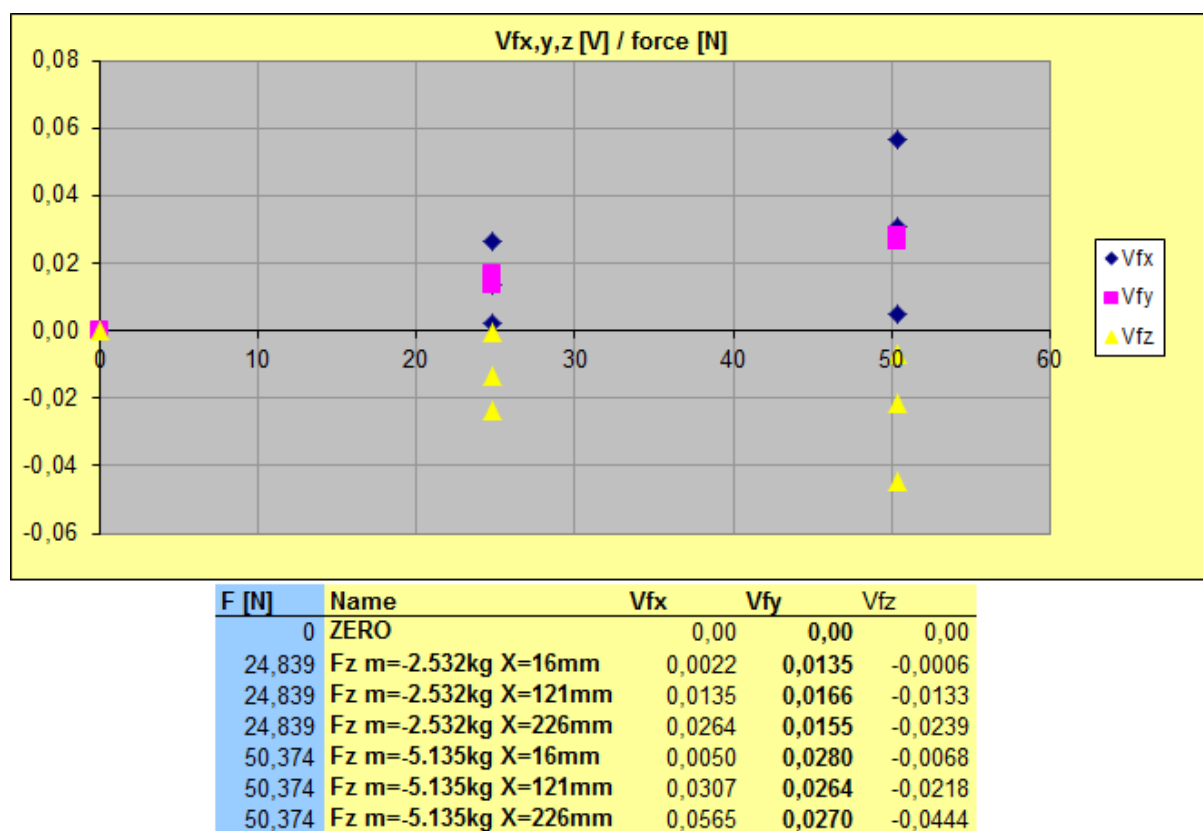
Első lépésben megvizsgáltuk a szenzor *linearitását*. A linearitás azon tulajdonságát mondja meg az eszköznek, hogy adott terhelés kétszeresét véve a szenzor is kétszeres jelszint növekedést produkál. Az 55. ábrától az 61. ábráig látható diagramok jól szemléltetik a különböző irányú terhelések és távolságok függvényében adott szenzorválaszt.



55. ábra XZ síkon történő nyomatékmérések eredménye

Az 55. ábrán megfigyelhető, hogy az adott síkon csak a Z tengely körüli nyomaték változik, illetve az értékek lineárisak. Például a 3,006[Nm]-re adott szenzor válasz 0,1407[V], míg a közel kétszeres nyomatékra (6,095 [Nm]), közel kétszeres szenzorválasz érkezett (0,2827 [V]).

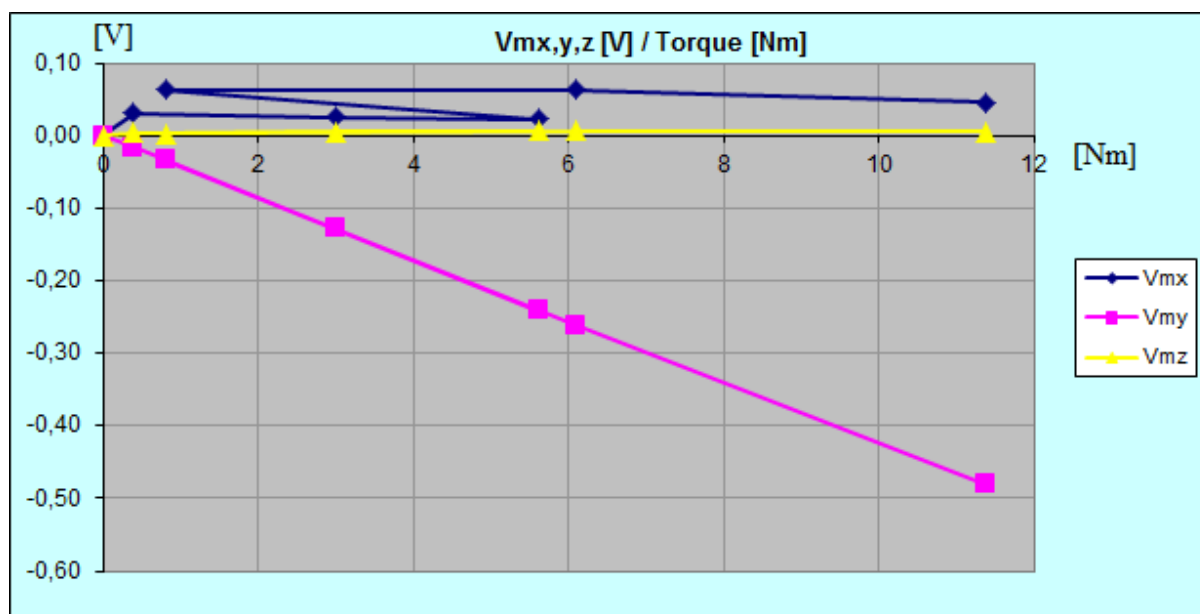
Az 56. ábrán az XZ síkon regisztrált erőkomponensek értékeit, és azok változását láthatjuk. Megfigyelhető, hogy a mérni kívánt Y irányú komponens lineárisan változik a terhelő súly függvényében (viszont a távolságtól függetlenül), míg a többi komponens függ a távolságtól is.



56. ábra XZ síkon regisztrált erő értékek és azok megváltozásai

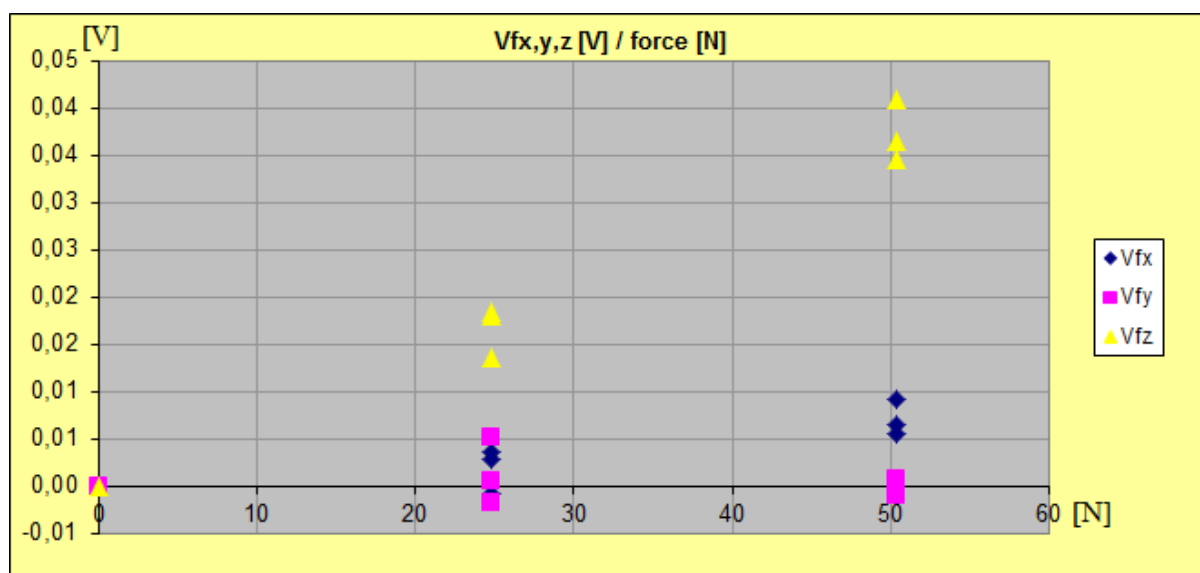
Az 57. ábrán az XY síkban mért, különböző komponensű nyomatékváltozásokat mutatja. Itt is megfigyelhető, hogy az itt keresett Y tengely körüli nyomatékváltozás lineáris, a többi komponens viszont közel állandó. A kisebb eltérések a mérési pontatlanságból adódnak.

Az 58. ábrán az XY síkon mért erővektor komponenseinek megváltozása figyelhető meg. Az itt meghatározandó Z erőkomponens 6 értékéből 2-nél látható jelentősebb eltérés. Ennek okát tartósabb vizsgálatok során kell majd kideríteni.



M [Nm]	x	Name	Vmx	Vmy	Vmz
0	0	ZERO	0,00	0,00	0,00
0,397	1	Fz m=-2.532kg X=16mm	0,0300	-0,0167	0,0036
3,006	2	Fz m=-2.532kg X=121mm	0,0253	-0,1281	0,0051
5,614	3	Fz m=-2.532kg X=226mm	0,0222	-0,2408	0,0058
0,806	4	Fz m=-5.135kg X=16mm	0,0635	-0,0335	0,0023
6,095	5	Fz m=-5.135kg X=121mm	0,0624	-0,2614	0,0059
11,385		Fz m=-5.135kg X=226mm	0,0452	-0,4811	0,0045

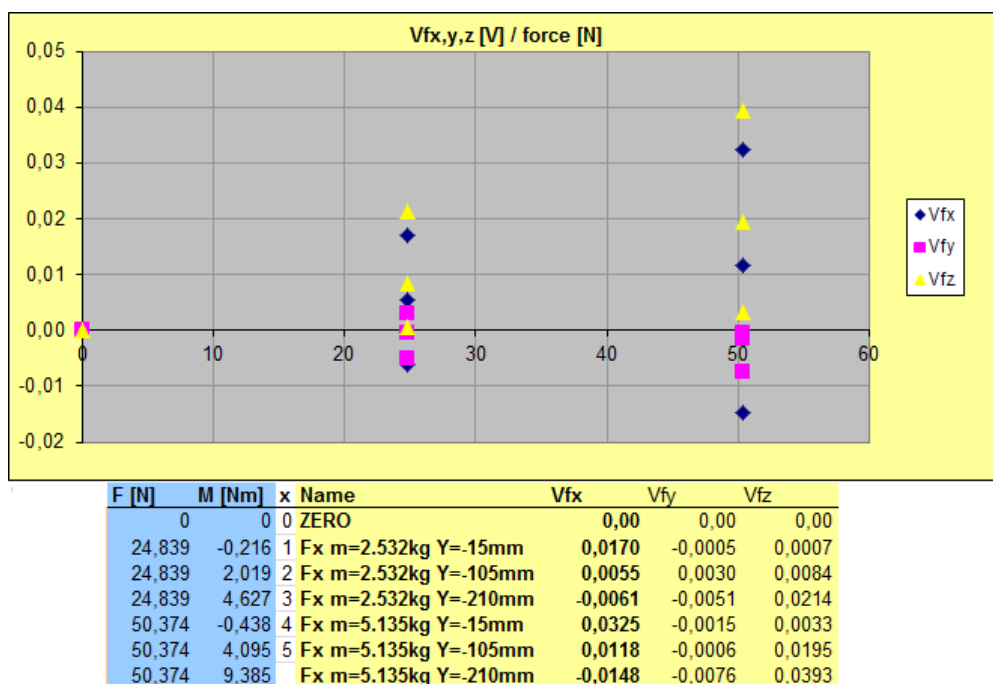
57. ábra XY síkban mért nyomatékvektor komponenseinek változása



F [N]	Name	Vfx	Vfy	Vfz
0	ZERO	0,00	0,00	0,00
24,839	Fz m=-2.532kg X=16mm	0,0029	-0,0017	0,0183
24,839	Fz m=-2.532kg X=121mm	0,0035	0,0006	0,0180
24,839	Fz m=-2.532kg X=226mm	-0,0010	0,0052	0,0136
50,374	Fz m=-5.135kg X=16mm	0,0090	-0,0010	0,0409
50,374	Fz m=-5.135kg X=121mm	0,0054	0,0006	0,0346
50,374	Fz m=-5.135kg X=226mm	0,0065	0,0001	0,0364

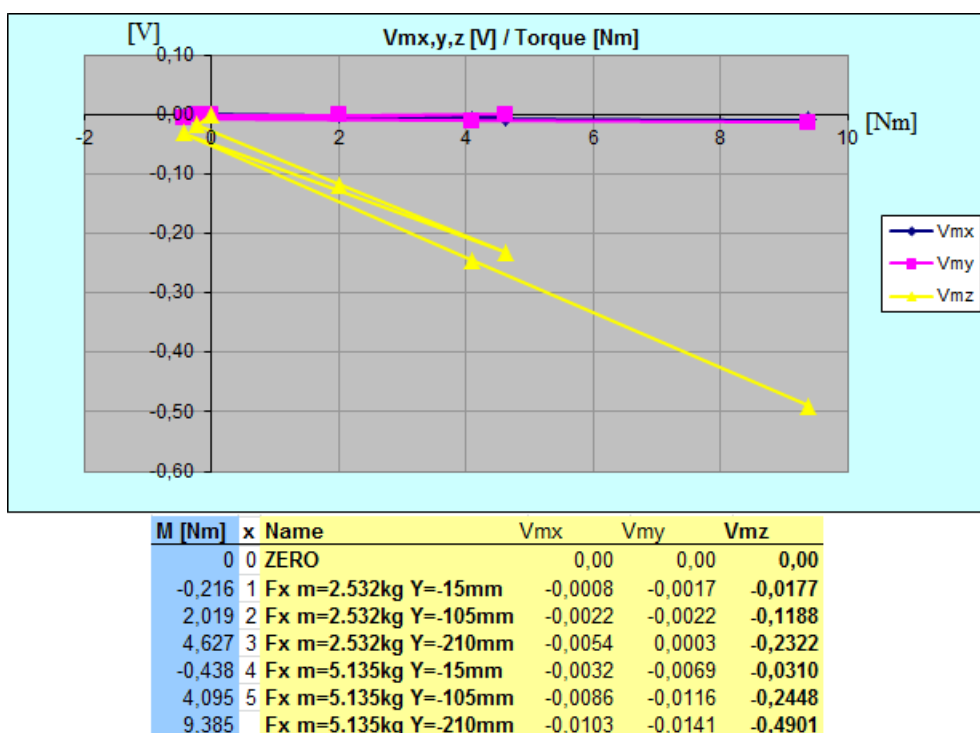
58. ábra XY síkban mért erőkomponensek és azok megváltozásai

Az 59. ábrán az YZ síkban mért erőkomponensek változásai látszanak. Látható, hogy viszonylag nagy eltérések vannak az egyes összetartozó értékek között. A rendellenes viselkedés kiderítése további vizsgálatot igényel.



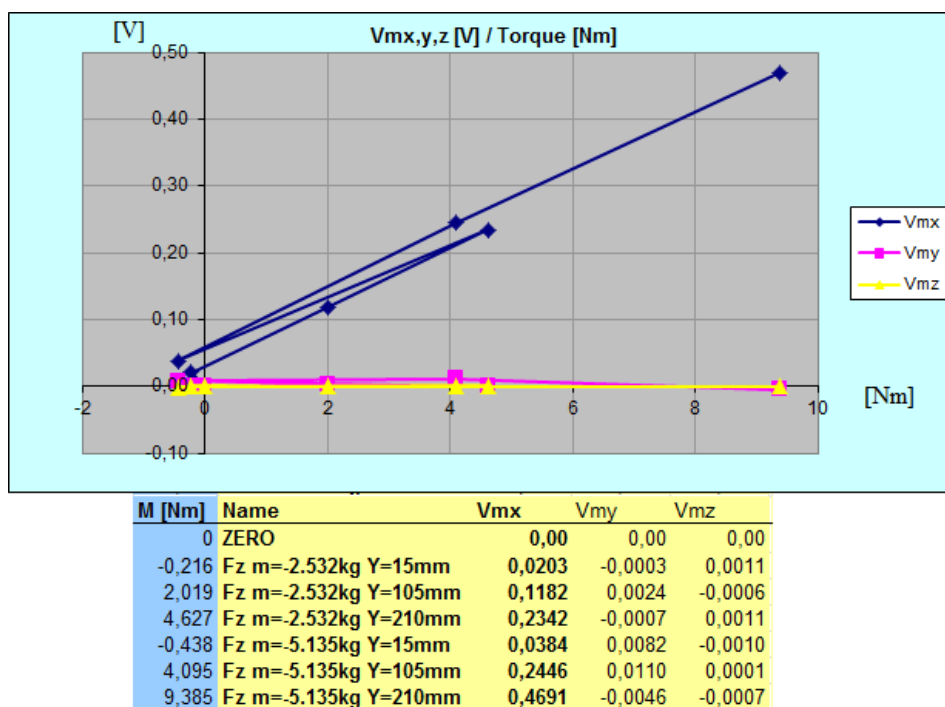
59. ábra YZ síkban mért erőkomponensek értékei

A 60. ábrán az YZ síkban mért nyomatékkomponensek értékeit lehet látni. Itt elmondható, hogy a keresett Z tengely körüli nyomaték közel lineárisan változik, míg a többi gyakorlatilag változatlan maradt.



60. ábra YZ síkban mért nyomatékkomponensek értékei

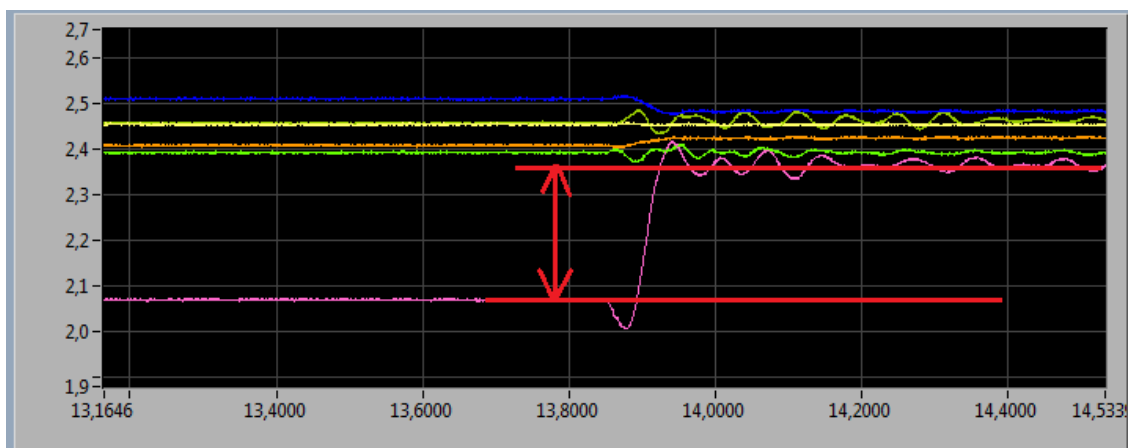
A 61. ábrán az XY síkon mért nyomatékvektor komponenseinek a megváltozását lehet megfigyelni. Látható, hogy a keresett X tengely körüli nyomaték közel lineárisan változik, míg a többi komponens gyakorlatilag állandó marad.



61. ábra XY síkon mért nyomatékvektor komponensei

A szenzor linearitásának pontos meghatározásához még több vizsgálatra és mérésre van szükség, továbbá különös figyelmet kell szentelni a kiugró értékek okának a meghatározására.

A szenzor *érzékenységét* a terhelendő súly és az arra adott feszültségjel különbség hányadosa adja meg. A 62. ábrán látható, piros nyíllal vett távolság az eszköz felbontásának abszolút értéke.



62. ábra Felbontás meghatározásához szükséges jelszint különbség

A terhelendő tömeg 2,532 [kg] volt, ami 24,839 [N] terhelő erőnek felel meg. A piros nyíl $2,35 \text{ [V]} - 2,09 \text{ [V]} = 0,26 \text{ [V]}$. Így tehát az *érzékenység* $\frac{0,26}{24,839} = 0,01 \left[\frac{\text{V}}{\text{N}} \right]$.

A rövidtávú kúszás jelenségével már a 4.3.2. – és 4.4. fejezetben (36.- és 42. ábra) foglalkoztunk. Itt kiderült, hogy a belsőerősítőt nem tartalmazó szenzor rövidtávú kúszása jelentős (5 - 6 [s]), viszont a belső erősítővel rendelkező szenzoré már gyakorlatilag az egységugrás függvénynek megfelelő (kevesebb, mint 0,1 [s]).

A hosszú távú terhelésből és környezeti hőmérséklet (termikus) megváltozásából adódó kúszást eddig nem állt módunkban elvégezni, viszont továbbiakban elsők között szerepel ennek meghatározása.

6.2. Költségelemzés

A dolgozatunk során többször is említettük, hogy az egyik legfontosabb oka az általunk elvégzett munkának a költséghatékonyság volt. A 3. táblázat a két szenzor együttes anyag illetve gyártási költségét szemlélteti. Fontos megjegyezni, hogy munkabérrel nem számoltunk, mivel nem vonzott maga után többletköltséget.

3. táblázat Szenzorok előállítási költsége (a feltüntetett mennyiségek két szenzorra vonatkoznak)

	Megnevezés	Mennyiség	Költség (nettó) [Ft]
Elektronika	Kaliber Kft (bélyeg, KMT-LIAS-06-1.5/350)	60 [db]	96600
	Elekterv (nyákgyártás, szenzor belső erősítői)	8 [db]	32000
	Lomex (alkatrészek)	-	35612
	Tme (alkatrészek)	-	53301
	Összesen		217513
Mechanika	CNCPart.hu Bt, 6tg erőmérő szenzor előgyártmány készítés		126000
	geometriaesztergálás	3 [db]	
	huzalszikra forgácsolás	3 [db]	
	felső burkolatesztergálás	2 [db]	
	alsó gyűrűesztergálás	2 [db]	
	túlterhelés védő lemezköszörülés, esztergálás	4 [db]	
	Amari, Certál alapanyag	Ø90x1000 [mm]	27000
	Célgép és CNC Kft, Erőmérő cella kontúrmarása	2 [db]	190497
	Összesen		343497
Elektronika + Mechanika			561010

A táblázatból egyértelműen adódik, hogy **egy darab szenzor** előállítási költsége nettó **280505 Forintra** adódott, így az előzetesen kitűzött **nettó 300000 Ft költséglimitet sikerült tartani.**

A kapott szenzorköltséget összevetettük két piacvezető hattengelyes erő- és nyomatékszenzorokat gyártótól kapott árajánlatokkal.

Az egyik ilyen szenzorgyártó az amerikai **ATI Industrial Automation** cég, mely az általunk gyártottra hasonló specifikációjú, **9105-TIF-GAMMA/ SI-130-10** típusú szenzorért **~3500\$,** míg **a hozzá tartozó elektronikáért plusz ~2000 \$ kért.** Természetesen erre rárakódnak a szállítási és vám költségek. A gyártó többi termékének az ára ettől csak magasabbak voltak.

A másik cég, akitől árajánlatot kértünk, a kaliforniai székhelyű **JR3 Inc.** vállalat volt. Az általuk küldött ajánlatban, a hasonló tulajdonságokkal rendelkező, **90M40A-I50 400N25** típusú szenzorért **kértek ~3000\$-t.** Ez az eszköz volt az árajánlatban szereplő szenzorok közül a legolcsóbb. Természetesen ehhez is szükséges **elektronika,** melyet a cég **~1500\$-os** áron kínált.

Fontos megemlíteni, hogy mindkét gyártó minimum 6 hetes szállítási idővel vállalata az eszközök eljuttatását Magyarországra.

Az **általunk készített szenzorok** bruttó előállítási költségét (~350000 Ft/db) átszámítva dollárra (egy elég gyenge, 240 Forintos valutaárfolyamon), megkapjuk a **~1500 \$ értéket,** mely már **tartalmazza a szükséges elektronika költségét is.**

Az előállított szenzorok tervezési-, legyártási-, kalibrálási ideje kb. 2,5 - 3 hónap volt, amely több a gyártók által vállalt szállítási időtől, mégis elmondhatjuk, hogy a költségeket olyan mértékben sikerült leredukálni, hogy megérte saját tervezésű és gyártású szenzorokkal foglalkozni.

6.3. Összegzés

A TDK dolgozatunkban bemutatott az általunk fejlesztett hattengelyes erő- és nyomatékmérő szenzorokat, melyeket a REHAROB Gyógytornáztató berendezése erőszabályozásának megvalósítására használtunk fel. A fejlesztés egyik legfontosabb célfüggvénye az előállítási költség minimalizálása, továbbá az adott rendszerbe történő integrálhatósága.

Első lépésben meg kellett határoznunk, milyen feladatokat kell megoldanunk a megfelelő berendezés előállításához. A szakirodalom áttekintése, illetve a korábban tönkrement szenzor megvizsgálása után, nekiláttunk a szenzorok mechanikai- és elektronikai

alkatrészeinek a megtervezéséhez, majd legyártásához. A megfelelő működőképességen túl fontos kritérium volt a fizikai túlterhelés védelem beépítése, ezáltal az eszközök élettartamának jelentős növelése. A szükséges alkatrészek legyártása, majd összerakása után felépítettünk egy kalibrációs mérőcellát a kalibrációs mátrix meghatározásának érdekében, majd a méréseket követően a szenzorokat beépítettük a REHAROB Gyógytornáztató berendezésbe.

A **korábbi szenzor**, mely nem tartalmaz még beépített erősítőket 2014 májusa óta látja el feladatát, mely során **~350 üzemórát, 290 gyógytornáztatási alkalmat teljesített**. A **továbbfejlesztett**, belső erősítővel rendelkező **eszköz** 2014. szeptember közepe óta működik, amely idő alatt **~280 üzemórát, 230 gyógytornáztatási alkalmat teljesített**. Az eltelt hónapokban meghibásodás nem keletkezett, a szenzorok mai napig megbízhatóan működnek.

Nem elhanyagolható az sem, hogy olyan előállítási költséggel sikerült megvalósítani a feladatunkat, mely a hattengelyes erő- és nyomatékmérő szenzorokat gyártó és forgalmazó cégek árainál jóval kedvezőbbek lettek.

Kijelenthetjük, hogy egy olyan komplex gépészeti és mechatronikai feladatot sikerült végrehajtanunk, amelyből szerzett tapasztalatok és információk a szakmai pályafutásunkra nagy hatást gyakoroltak.

7. Továbblépési lehetőségek

Az általunk előállított szenzorok a mai napig megfelelően ellátják a feladatukat, viszont továbbra is vannak olyan újítási lehetőségeink, melyekkel a szenzorok tulajdonságait, működőképességeit még tovább lehetne fejleszteni.

A műszaki paraméterek meghatározása során az újabb szenzor azon tulajdonságait vizsgáltuk, melyek a megbízható működőképességre hatást gyakorolnak. Viszont nem minden esetben sikerült ezt még az ide vonatkozó szabványoknak megfelelően számszerűsíteni, így fontos feladatnak látjuk ezek elvégzését. Továbbá a régebbi szenzornak is szeretnénk egy hivatalos műszaki specifikációt összerakni.

A beépített elektronika továbbra is analóg jeleket küld a hosszú vezetékeken keresztül az erőadatokat feldolgozó kártyához. Az analóg jelek sajátosságai miatt minél nagyobb távolságra kell azt küldeni, annál nagyobb a beérkező adatok bizonytalansága. Ezt kiküszöbölendő, elkezdtük egy olyan új nyomtatott áramkör tervezését, mely már tartalmazni fog analóg-digitál konvertert, így a szenzorból kijövő jelek digitálisak lesznek. Bár az erőfeldolgozó kártya csak analóg jeleket képes fogadni, így annak közelében egy visszaalakítót is tervezni kell, a hosszú vezetékeken továbbított jelek megbízhatósága jelentősen nő.

Az általunk összeépített kalibrációs mérőcellával ugyan sikerült egy elég pontos mátrixot elérnünk, viszont a mérési folyamat körülményes és időigényes. A későbbiekben szükségünk lesz egy olyan mérőcella kifejlesztésére, mellyel részben vagy teljesen automatizálni lehetne a folyamatot.

Ahhoz, hogy a későbbiekben közel hibamentes méréseket tudjunk végezni, mind az összeépített mérőcellát, mind a kalibrációs mátrix meghatározásának a folyamatát szükséges matematikailag felülvizsgálni, hogy kiderítsük, mikor, milyen hibával terhelt a mérés (pl. a terhelővektorok irányának és nagyságának a befolyásoló tényezője).

Mivel a szenzorok orvosi környezetben működnek, így elkezdtük azon információk összegyűjtését, az ide vonatkozó szabványok áttekintését, melyek következtében fel tudjuk készíteni a szenzorokat orvostechikai tanúsítás szerzésére is.

Elmondható, hogy a szenzorok akár a piac számára is egy megfelelően minősített eszközök legyenek, sok problémát kell még megoldanunk. Viszont bátran kijelenthetjük, hogy ezek elvégzése után egy erősen piacképes terméket kapnánk, mely nagyobb távlati terveink között szerepel.

8. Summary

Six-axis force-moment measuring sensor planning, manufacturing, calibration

In our TDK, we present the development of a sensor capable of measuring six-axis force and moment, which is used in the project of the Faculty of Technological Mechanics and the Faculty of Manufacturing science and –technology, the COSMOSYS, in the REHAROB physiotherapist robot. The reason for creating a self-made instrument is that the sensor which was bought from an outer company went wrong, and we couldn't replace it in cheap, technologically correct ways.

As a first step we read about the related literature, and thoroughly measured the sensor manufactured by Tára Kft. in terms of mechanics and electronics. With the information we got from these, we created the proper geometry, made the mechanical and electrical calculations, and developed a measuring process in order to define the calibration matrix.

While planning the geometry, we defined special criteria which for example protects against overload. We modeled the measured body in more versions, checked it with FEM, until we got the needed maximal loads in each direction. We made the part and assembly drawings. The difficult parts were made by a subcontractor; the easier ones were made by us. We chose the electronic parts and planned the amplifier and processor. We glued 24 pieces of strain gauges, out of which we wired four gauges in each full bridge. Inside the sensor, we placed the printed circuit, which amplifies the analogue signal of the gauges. This way we managed to get a good signal-noise relation.

We built a measuring cell capable of calibrating, near the force data processing card placed in the robot controller, in which we defined the calibration matrix of the wired, then assembled sensor. A device built from pieces was used to create the cell. The calibration was made with a ± 5 gram accurate mass. The data gained from this experiment was imported to a calculating board, in which we had uploaded the calibration algorithm.

Finally we checked the mechanical parameters of the sensor by measuring: the nominal and peak load, the linearity, the repetition accuracy, the resolution, and the zero point crawl for each axis. We made a financial analysis, and started to gather the information for the medical technical audit.

9. Felhasznált irodalom

- [1]– Alpek Ferenc: Műszer- és mérés technika (mérés technológia és mérés automatizálás a gépgyártásban), előadás jegyzet, Budapest, 2007/2008, 10-15 old.
- [2] – Junqing Ma, Aiguo Song: Fast Estimation of Strains for Cross-Beams Six-Axis Force/Torque Sensors by Mechanical Modeling. Jiangsu Key Lab of Remote Measurement and Control, School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China, 2013,
<http://www.mdpi.com/1424-8220/13/5/6669/htm>
- [3]– Richard A. Meyer, Alan J. Kempainen, Douglas J. Olson: Multi-axis load cell body, Szabadalom, Kiadási szám: US 6769312 B2, (2004),
<http://www.google.com/patents/US6769312>
- [4] - Takeshi Ohsato, Yusuke Hirabayashi: Six-axis force sensor. Szabadalom, kiadási szám: US6823744 B2 (2004), <http://www.google.com/patents/US6823744>
- [5] – Tetsuro Sakano: Six-axis force sensor. Szabadalom, kiadási szám: US 20060213287 A1, (2006), <http://www.google.com/patents/US20060213287>
- [6] - BME Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék, Műszertechnika c. tárgy, M8 Labor felkészítő anyag Jelátalakítás nyúlásmérő bélyeggel, (2014),
[http://www.mogi.bme.hu/letoltes/FINOMMECHANIKAI%20&%20M%C3%89R%C3%89STECHNIKAI%20\(MEASUREMENT\)%20T%C3%81RGYAK/MUSZERTECHNIKAI%20LABOR%20UTMUTATOK/M8.pdf](http://www.mogi.bme.hu/letoltes/FINOMMECHANIKAI%20&%20M%C3%89R%C3%89STECHNIKAI%20(MEASUREMENT)%20T%C3%81RGYAK/MUSZERTECHNIKAI%20LABOR%20UTMUTATOK/M8.pdf)
- [7] – Kaliber Kft hivatalos weblapja (<http://kaliberkft.hu>), Termék menüpont

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt **szeretnénk megköszönni** konzulensünknek, **Tóth Andrásnak** a folyamatos támogatását mind szakmailag, mind emberileg! Köszönjük Neki továbbá, hogy lehetőséget adott a COSMOSYS projektben történő részvételre, s ezáltal számunkra jelentős szakmai tapasztalatok szertevésére, anyagi javak biztosítására.

Nagy hálával tartozunk Csibrák Tamásnak folyamatos önzetlen segítségét, szakmai tanácsait, elnyúlhatetlen akaraterejét.

Köszönettel tartozunk Jurák Mihálynak a szoftveres és a baráti támogatásért.

Wohlfhart Richard mérnöki és konzultációs tevékenysége nélkül valószínűleg nem tartanánk jelenleg itt, így **nagy hálával tartozunk** neki!