

TDK Dolgozat

MEMS Gyorsulásérzékelő Alkalmazása
Rezgésdiagnosztikában

Farkas Gábor

Gépészmérnök, Levelező tagozat
4. félév

Témavezető: Csík Norbert (főiskolai tanársegéd)

Kecskeméti Főiskola
Gépipari és Automatizálási Műszaki Főiskolai Kar
Kecskemét
2011

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	3
1. A karbantartási eljárásokban felmerülő problémák	
1.1 Karbantartás jellege	4
1.2 Megbízhatóság.....	5
2. A tanulmány célja	
2.1 MEMS gyorsulásérzékelő a rezgésdiagnosztikában	6
3. A rezgésdiagnosztika	
3.1 A rezgésdiagnosztika alapjai.....	7
3.1.1 Alapfogalmak	9
3.1.2 Rezgésérzékelők.....	11
3.1.3 Határértékek.....	14
3.2 MEMS gyorsulásérzékelő.....	14
4. Felhasznált eszközök, alkatrészek	
4.1 Előkészület.....	16
5. Mérőegység	
5.1 Elvi működés.....	17
5.2 Kivitelezés	21
5.3 Elemző szoftver.....	30
6. Mérőpad	
6.1 Mérőpadon elvégezhető mérések	33
6.2 A mérőpad felépítése	33
7. Mérések	
7.1 Mérés nyugalomban.....	38
7.2 Mérés normál üzemben.....	42
7.3 Excentrikus forgórész mérése	45
7.4 Végső megállapítás.....	49
8. Gyakorlati alkalmazhatóság	
8.1 Lehetséges rendszer felépítése	50
Összegzés.....	52
Köszönetnyilvánítás	53
Irodalomjegyzék	54
Mellékletek	55

Bevezetés

A karbantartás fogalma egyidős a gépekkel és jelentősége egyre inkább előtérbe kerül. Az egyre szigorodó előírások megkívánják, a fejlődő technológiák pedig lehetőséget adnak a korszerű karbantartási eljárások elvégzésére és azok finomítására. A gépek egyre inkább automatizáltak, mely lehetővé teszi az emberi beavatkozás nélküli termelést, ami magával vonja a 24 órás üzemeltetést, ezzel a termelés növekedését és hatékonyságát.

Néhány évvel ezelőtt találkoztam először MEMS gyorsulásérzékelővel és már ekkor felmerült az ötlet, hogy különféle szerkezetek által keltett rezgések mérésére alkalmas lehet. A szakirodalmat átolvasva tájékozódtam, hogy milyen rezgésdiagnosztikai rendszerek léteznek, milyen érzékelőket használnak. Megállapítottam, hogy MEMS gyorsulásérzékelőt nem alkalmaznak erre a célra. Kíváncsivá tett, hogy mi az oka ennek, mikor ezek az alkatrészek többnyire olcsóak, sok fajta létezik, széles méréshatárok között működnek, apró fizikai mérettel rendelkeznek.

Célomként tűztem ki egy ilyen rezgésdiagnosztikai rendszer megtervezését és kivitelezését, melyben MEMS gyorsulásérzékelő kerül alkalmazásra. Ezzel méréseket végezve megfigyelhetem és összehasonlíthatom, hogy milyen hasonlóság mutatkozik az iparban már elterjedt érzékelőkhöz képest.

A fent említett kísérlet kivitelezéséhez három fő fejlesztési szakasz, komponens fogalmazódott meg bennem. Az első az érzékelő és a hozzá tartozó elektronika, mely vezérli és a mért adatokat továbbítja. A második egy számítógépes szoftver, mely fogadja a mért adatokat, megjeleníti és kiértékeli. A harmadik pedig egy olyan szerkezet, melyen a méréshez szükséges körülmény előteremhető, mint például egy excentrikusan forgó tengely által keltett rezgés.

A vizsgálatoktól választ várok, hogy a MEMS érzékelők alkalmasnak bizonyulnak-e rezgésdiagnosztikai alkalmazásokban való felhasználásra.

1. A karbantartási eljárásokban felmerülő problémák

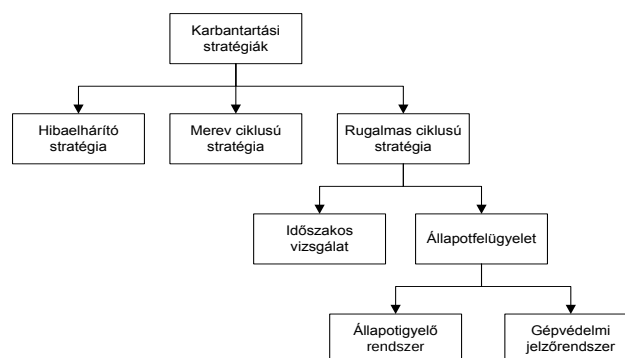
1.1 Karbantartás jellege

A karbantartásnak fontos szerepe van abban, hogy a termelésben résztvevő gépek folyamatos üzemre legyenek képesek. Egy nem várt meghibásodás határozatlan idejű termelés kiesést okozhat, melynek súlyos gazdasági következményei lehetnek a termelő cégre nézve.

A karbantartási stratégia jó megválasztása nagyban befolyásolhatja a termelés hatékonyságát. Jelen esetben három fő stratégiát különböztetünk meg:

- Hibaelhárító karbantartási stratégia: Ebben az esetben a meghibásodás bekövetkezése után történik a javítás. A karbantartás nem prognosztizálható, esetleges más meghibásodást is magával von. Személyzeti készenlét szükséges a gyors beavatkozás érdekében.
- Merev ciklusú karbantartási stratégia: Ilyenkor nem optimális a kopó alkatrészek cseréje. Előfordulhat, hogy az adott alkatrész élettartama még lehetőséget adna további üzemelésre, de a karbantartási specifikáció alapján mégis cserélni kell, ezzel plusz kiadást okozva a termelést végző cégnek.
- Rugalmas ciklusú karbantartási stratégia: Ebben az esetben az alkatrészek élettartama optimálisan van kihasználva, és előre prognosztizálható a csere ideje. Így van idő a cserealkatrész időben történő beszerzésére a gyártótól.

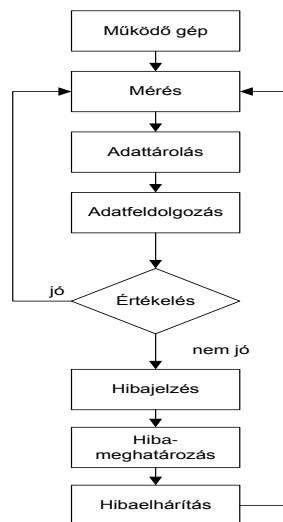
Az alábbi 1.1 ábrán látható a karbantartási stratégiák egyfajta csoportosítása:



1.1 ábra. Karbantartási stratégiák [1].

A technológiai fejlődés lehetőséget biztosít a rezgésdiagnosztika nyújtotta lehetőség olcsóbb és szélesebb körben történő elterjedéséhez, ez által a tervszerű és optimálisabb karbantartási folyamatok elvégzéséhez.

Az ebben a tanulmányban készült rendszer az állapotfigyelő szerepét tölti be, de természetesen kibővíthető egyéb gépvédelmi funkciókkal is, például azzal, hogy a meghibásodás-jelzés figyelmen kívül hagyása esetén a gép leálljon. A 1.2 ábrán látható az állapotfigyelő rendszer folyamatábrája.



1.2 ábra. Állapotfigyelő rendszer folyamatábrája [1].

Jól látható, hogy a gép állapota folyamatos méréssel és az adatok elemzésével van megfigyelve. Ezen mérések segítségével a meghibásodásokat előre lehet jelezni, ezáltal a karbantartás ütemezhető és a cserealkatrészek készletezésének igénye könnyen felmérhető.

1.2 Megbízhatóság

A gyártó garanciát vállal gépeinek működőképességére a garancia érvényességéig. Ehhez szükséges a gyártó által szabott feltételek betartása a vásárló részéről, ilyen például az előírt karbantartások elvégzése. Az elmulasztott karbantartási munkálatok legtöbbször garanciavesztéssel járnak. A gyártónak és a vevőnek is közös érdeke, hogy a termelésben használt gép a garantált élettartam

alatt megfelelően működjön és a karbantartás költségei a lehető legalacsonyabbak legyenek. A nem várt meghibásodások sem a gyártó számára nem előnyösek, mivel a gép javítását a gyártónak kell ilyen esetben finanszírozni, sem pedig a vevő számára, mivel ez termeléskiesést jelenthet. Ezen a ponton járulhat hozzá a rezgésdiagnosztikán alapuló állapotfigyelő rendszer a megbízhatóság javításához, mivel folyamatos mérésekkel bizonyos nem várt meghibásodások ily módon előre jelezhetők.

Fontos megemlíteni, hogy olyan gépeken is alkalmazható, melyeknél nem csak termelés szempontjából fontos a folyamatos megfigyelés, hanem meghibásodásuk emberi életre is veszélyes lehet, például közlekedési eszközöknél.

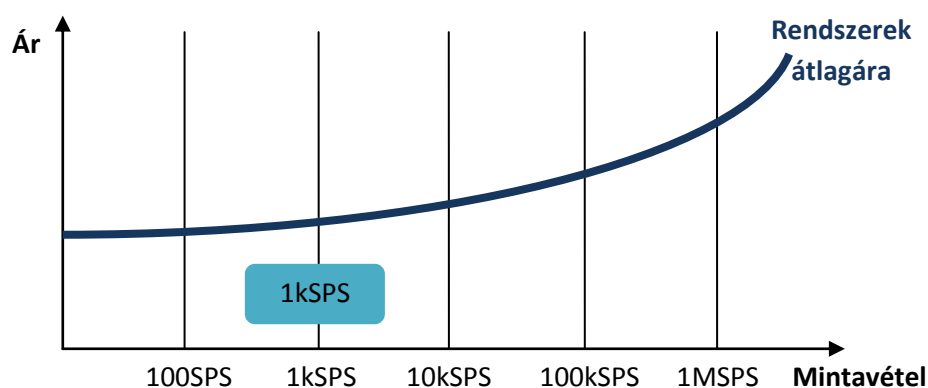
2. A tanulmány célja

2.1 MEMS gyorsulásérzékelő a rezgésdiagnosztikában

A rezgésdiagnosztikában számos érzékelő típust alkalmaznak, viszont MEMS típusú érzékelővel szinte nem is találkozhatunk. Ennek többek között az lehet az oka, hogy a mikro-elektromechanikus rendszerek csak néhány évvel ezelőtt váltak olcsón elérhetővé. A tanulmánynak egy olyan rezgésdiagnosztikai rendszer kidolgozása a célja, mely MEMS gyorsulásérzékelőt alkalmaz a vizsgált gép által keltett rezgések méréséhez. További munka az ezen berendezéssel különféle gépészeti alaphibák, illetve nem rendeltetésszerű, üzem közben keletkező hibák szimulációja, összehasonlító méréseinek elvégzése. Ehhez szükség van egy mérőpadra, melyen az előbb említett jelenségek előidézhetők és a mérések elvégezhetők. Ennek a szerkezetnek a felépítése és elkészítése is témája ennek a munkának.

A készítendő rendszer alapját képezi a *Karbantartás* fejezetben már említett stratégiák közül az állapotfigyelő rendszernek. Folyamatos mérések segítségével teszi lehetővé a gépek felügyeletét, a mért adatokból statisztikák készítését, a karbantartás ütemezését és nem várt meghibásodások jelzését.

A rezgésdiagnosztikai rendszereket a mintavételezési sebességük alapján is csoportosíthatjuk. A tervezett rendszer ár-funkcionalitás elhelyezkedését a 2.1 ábra szemlélteti. Kis mintavételi sebességgel dolgozik, de sokrétű felhasználhatósága és olcsósága előnyös. Az akár 1MSPS mintavételű rendszerek hozzávetőlegesen drágák és csak ritkán éri meg alkalmazni őket, mivel az esetek többségében néhány kHz-es frekvenciákat mérünk. Költségeit tekintve a gyors mintavételezésre alkalmas MEMS gyorsulásérzékelők is drágák, de összevetve a jelenleg elterjedt megoldásokkal, még mindig kedvezőbb az áruk ugyanazon kategóriában. Például a VibraSens 101 egytengelyes piezokristályos érzékelő 130 euróba kerül, szemben a \$3 értékű ADXL345-tel.



2.1 ábra: A tárgyalt rendszer mintavétel és ár alapján történő osztályozása

3. A rezgésdiagnosztika

3.1 A rezgésdiagnosztika alapjai

A rezgésdiagnosztika a roncsolásmentes szerkezetvizsgálatok egyik speciális témaköre. A továbbiakban ennek az alapjairól lesz szó.

A gépek, szerkezetek üzem közben rezgéseket keltenek. Ezen rezgések feldolgozásával és további külső adatok birtokában olyan információkat nyerhetünk, melyek utalnak a gép állapotára, esetleges meghibásodására vagy a közeljövőben bekövetkező hibára.

A rezgésdiagnosztikára alkalmas eszközök a 70-es, 80-as években kezdtek először megjelenni a piacon. Ezek a kezdetleges rezgésdiagnosztikai berendezések többnyire csak rezgésérősség mérésre voltak alkalmasak. Később már megjelentek olyanok is, melyek bizonyos frekvenciatartományban képesek voltak „analizálni” is a jelet. Ahogy fejlődött a technológia és egyre nagyobb számítási teljesítményű számítógépeket készítettek, nőtt a rezgésdiagnosztikai eszközök precizitása, alkalmazhatósága. Ez a fejlődés mind a mai napig tart és széles körű alkalmazása csak mostanában kezd igazán előtérbe kerülni.

Jelenleg számos rezgésdiagnosztikai rendszert kínálnak a gyártók. Példaként az SKF is széles körben kínál ilyen berendezéseket, a kézi műszer kialakítástól a sok érzékelővel felszerelt komplett rendszerekig. A 3.1 ábrán látható az SKF egyik PDA-hoz csatlakoztatható gyorsdiagnosztikai eszköze.



3.1 ábra. SKF MicroVibe P

A rezgésdiagnosztika az egyik legkorszerűbb karbantartási módszer. Hatalmas előnye, hogy a gép leállítása nélkül információt szerezhetünk a szerkezet pillanatnyi állapotáról, károsodásának mértékéről, várható élettartamáról. Ezek ismeretében megállapítható, hogy szükséges-e intézkedéseket tenni a gép rendeltetésszerű működésének érdekében. Amennyiben előre megjósolhatjuk ez által a meghibásodást, tervezhetővé válik a karbantartás.

3.1.1 Alapfogalmak

A rezgés egy egyensúlyi helyzetéből kitérő testnek, anyagi részecskének vagy fizikai jelenségnek (pl. villamos feszültségnek) periodikus ingadozásaiból álló változása, illetve e változásnak egy mozzanata. A rezgés lehet csillapítatlan, ahol a kitérés állandó, vagy lehet csillapított, ahol a kitérés folyamatosan csökken. Nem csak periodikus rezgések léteznek. Aperiodikus rezgés, ha a rezgést leíró függvény nem mutat periodikusságot, vagyis folyamatosan változik.

A rezgés leírható a kitérés (s), a sebesség (v) vagy a gyorsulás (a) időbeli változásával. Algebrai alakban,

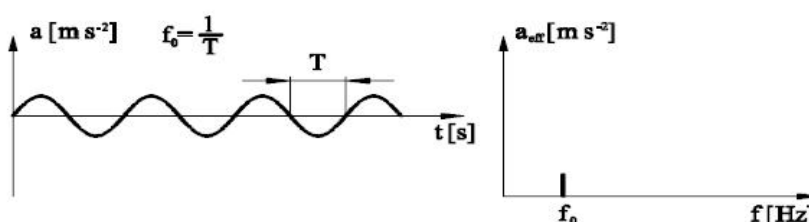
$$s = A \sin(\omega t + \varphi),$$

$$v = \frac{ds}{dt} = A \omega \cos(\omega t + \varphi),$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 s}{dt^2} = -A \omega^2 \sin(\omega t + \varphi),$$

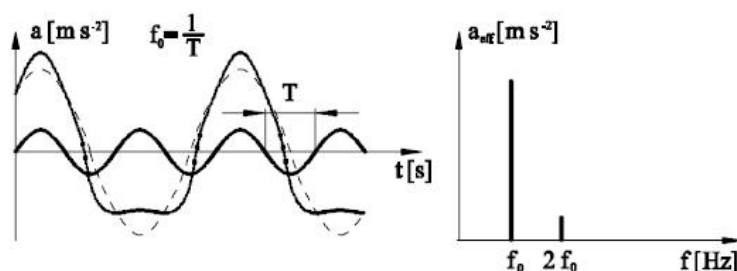
ahol az ismert együtthatókon kívül „ A ” a rezgés kitérésének, sebességének vagy gyorsulásának amplitúdója.

Legegyszerűbb esetben a rezgés tisztán szinuszos. Ezt szemlélteti a 3.2 ábrán látható jelalak, illetve annak frekvenciaspektruma. A szinuszos jelalaknak nincsenek felharmonikusai.



3.2 ábra. Tisztán szinuszos rezgés időfüggvénye és spektruma.

Más a helyzet, ha a jel nem pusztán egy szinuszos függvényből tevődik össze. Két szinuszos függvény idő- és frekvenciafüggvényét mutatja a 3.3 ábra.



3.3 ábra. Két szinusz jel

Ilyen esetekben az egyes összetevőket a Fourier-féle sorfejtéssel lehet meghatározni.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k \omega t + b_k \sin k \omega t),$$

Itt a_0 , a_k , b_k állandók (*Euler-Fourier-féle* együtthatók), és k egy természetes szám.

A rezgésjellemző alatt általában azt a fizikai mennyiséget értjük, amely erősségére utal. Méréstechnikai okokból ez a kitérés, sebesség vagy gyorsulás lehet. Bármelyikük a frekvenciával és a fázisszöggel kiegészítve az idő függvényében a jelenséget egyértelműen leírja.

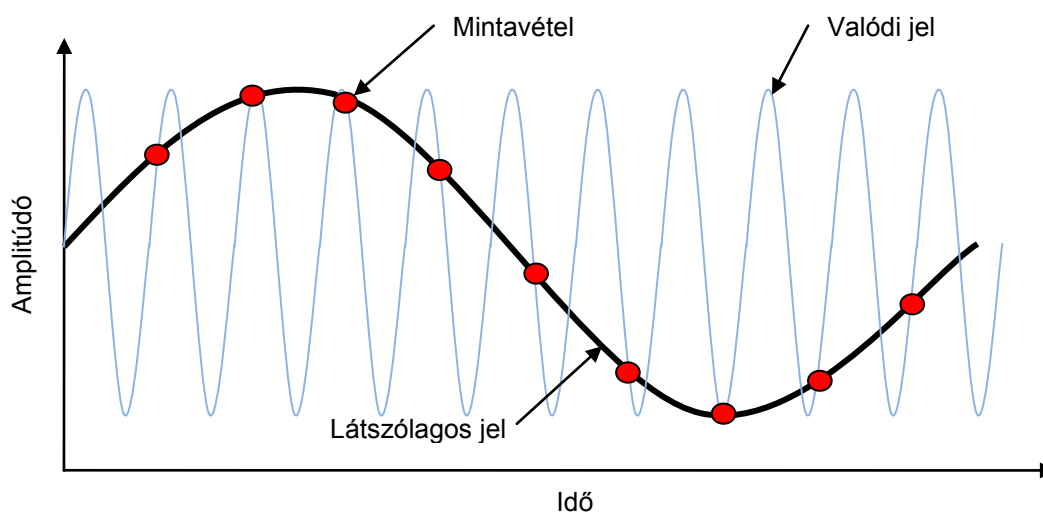
A kitérést választva a kisfrekvenciájú összetevők kerülnek előtérbe. A gyorsulásmérés pedig inkább a nagyobb frekvenciájú összetevőket emeli ki. Alkalmazása kiegyensúlyozatlanság kimutatása, kis légrésű forgó gépek, továbbá szerszámgépek esetén szokásos. Ez utóbbiaknál ugyanis a megmunkált felület mérete, alakhűsége és felületminősége meghatározza a megengedhető kitérést.

A rezgéssebesség a rezgés energiatartalmával van kapcsolatban. Gépállapot, épületkárosodások elbírálására és kimutatására, továbbá például földrengések erősségének mértékére egyértelműen jellemző.

A valós szerkezetre gyakorolt hatás szempontjából a rezgésgyorsulás mérvadó, de bizonyos esetekben a gépészeti gyakorlat is alkalmazza, például gördülőcsapágyak állapotellenőrzésénél. Egyúttal a környezeti terhelés mérőszáma is, tevékenységi körönként részletesen előírt.

Mivel digitális jelfeldolgozásról van szó, érdemes számításba venni a Nyquist-Shannon elméletet. Eszerint a mintavételezés után kapott értékekből egyértelműen visszaállítható az eredeti jel, amennyiben a mintavételezett jelben nem volt nagyobb frekvenciájú komponens, mint a mintavételezési frekvencia fele. Amennyiben ez nem teljesül, akkor mintavételezés során létrejöhet az aliasing jelenség, melyet a 3.4 ábra szemléltet.

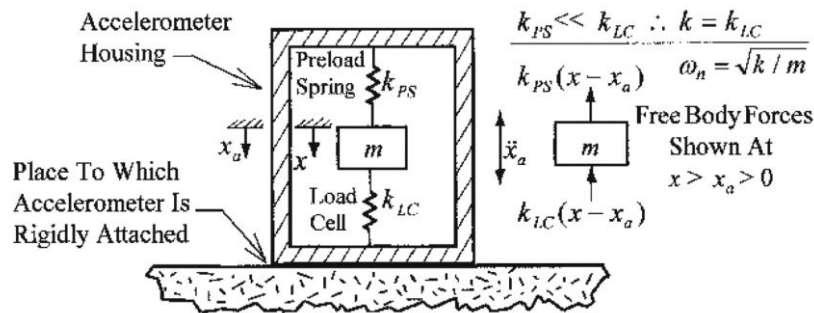
Az említett jelenség kiküszöbölése végett, az általam választott érzékelő tartalmaz aluláteresztő-szűrőt, melynek a határfrekvenciája a beállított mintavételi sebesség függvényében változik.



3.4. ábra. Aliasing jelenség.

3.1.2 Rezgésérzékelők

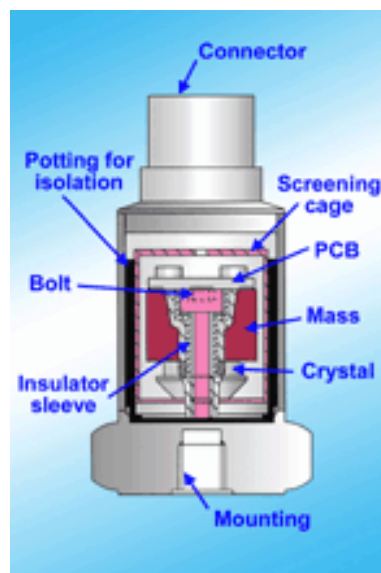
A rezgésdiagnosztikában számos módszert használnak a rezgések érzékelésére. Lehet induktív, optikai úton is. A 3.5 ábra szemlélteti egy átlagos gyorsulásérzékelő elméleti vázlatát.



3.5 ábra. Általános gyorsulásérzékelő vázlata [2].

(Accelerometer housing = Gyorsulásérzékelő burkolata; Preload spring = Előfeszítő rugó;
Load Cell = Támasztó rugó)

A legelterjedtebb megoldás azonban a piezokristályos rezgés-gyorsulásérzékelő alkalmazása. A kristály a ráható erő hatására a rákötött elektródákon potenciálkülönbséget létesít. Ha a piezokristály egyik felét rögzítjük egy fix ponthoz, a másikra pedig egy nagyobb tehetetlenségű tömeget erősítünk, akkor a rázkódás hatására a tömeg folyamatos deformálódást eredményez a kristály szerkezetében. A deformációval arányos feszültség jelenik meg az elektródákon. Ezt a feszültséget feldolgozhatjuk és elemezhetjük. A 3.5 ábrán látható egy piezo rezgés-gyorsulásérzékelő felépítése.



3.5 ábra. Piezokristályos rezgésérzékelő

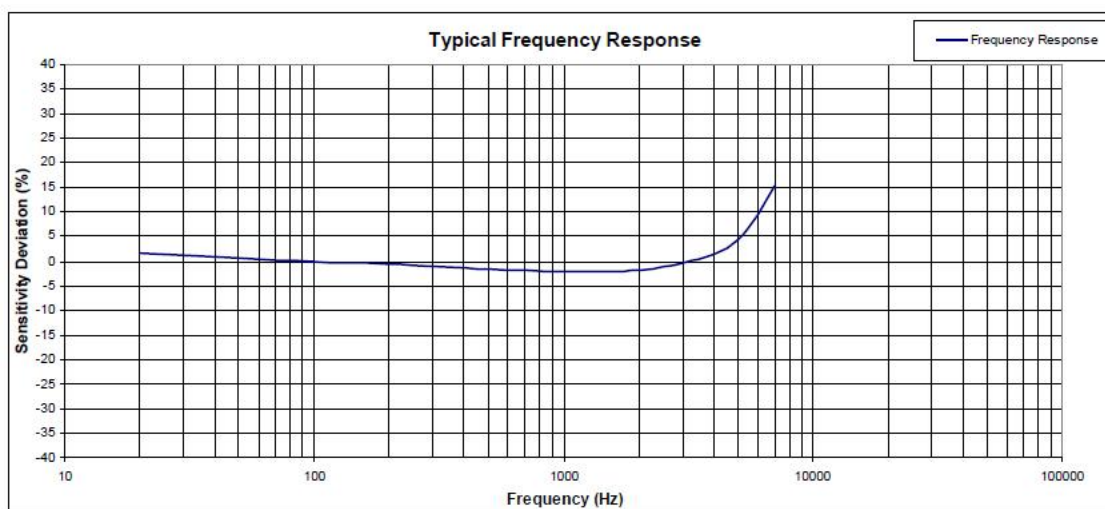
(Connector = Csatlakozó; Potting for isolation = Szigetelés; Screening cage = Árnyékolás;
Bolt = Csavar; PCB = Nyomtatott áramkör; Mass = Tömeg; Crystal = Kristály;
Mounting = Felfüggesztés; Insulator sleeve = Szigetelő hüvely)

Hátrányuk többek közt, hogy analóg jelet szolgáltatnak, melynek továbbítására jó minőségű, árnyékolt kábelt kell alkalmazni, hogy megvédje az amúgy is gyenge jelet a külső zavart okozó tényezőktől. Általában robosztus tokozással látják el ezeket az érzékelőket, ez látható a 3.6 ábrán.



3.6 ábra. MEAS gyártmányú rezgésérzékelő

Fontos paramétere az érzékelőnek, hogy milyen frekvenciatartományban képes működni. Nagyon alacsony frekvenciák nem váltanak ki deformációt a kristályban. Az erőteljes nagyfrekvenciás rázkódás a nagy tömeg miatt mérhetetlen eredményhez vezet. A 3.7 ábrán látható a fenti érzékelő érzékenység-eltérése a frekvencia függvényében.



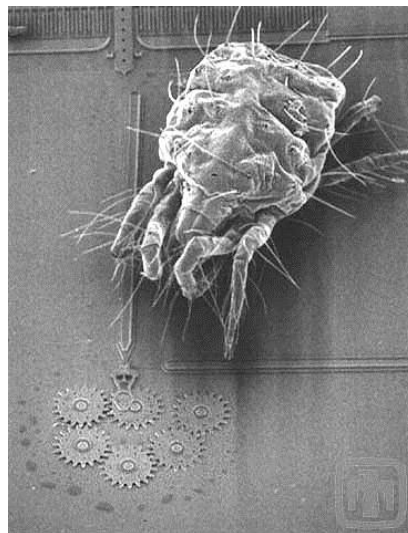
3.7 ábra. Az érzékelő frekvenciaátvitele

3.1.3 Határértékek

Gépészeti berendezések rezgésvizsgálatára vonatkozó legfontosabb előírás az ISO 2372 számú nemzetközi szabvány: „Általános előírások forgógépek rezgéseirősségének vizsgálatára és értékelésére”. E szabvány sorozatban vagy egyedi gyártásban készült, a 600 és 12000 1/min közötti fordulatszámú tartományban üzemelő gépekre érvényes, de nem alkalmazható kötelező érvénnyel a 600-as fordulatszámnál kisebb gépek esetében. Előírt az osztályozási feltétel és minősítési rendszer a rezgésekre való tekintettel. A szabvány ugyanakkor tárgyalja az egyes rezgésjellemzők értékelését és magát a mérés kivitelezését is. [3].

3.2 MEMS gyorsulásérzékelők

A MEMS mozaikszó a mikro-elektromechanikus rendszer angol megfelelőinek első betűiből tevődik össze. Ezek többnyire mikro-milliméteres nagyságrendű gépek. Az 3.8 ábra szemlélteti egy ilyen rendszer méretét egy poratkához viszonyítva.

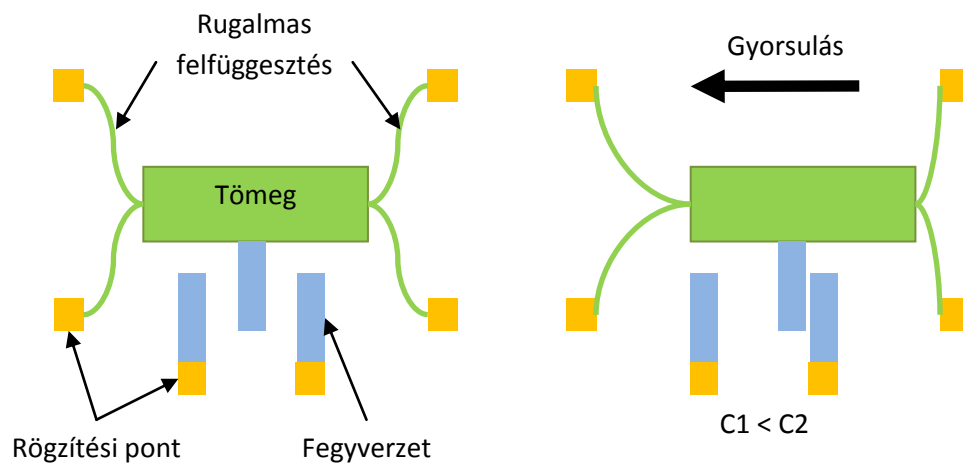


3.8 ábra. Egy poratka egy MEMS gépen.

Számos szerkezet alakítható ki, mely integrált áramköri elemekkel együtt kerül egy tokba. Többek közt az ebben a tanulmányban vizsgált gyorsulásérzékelő

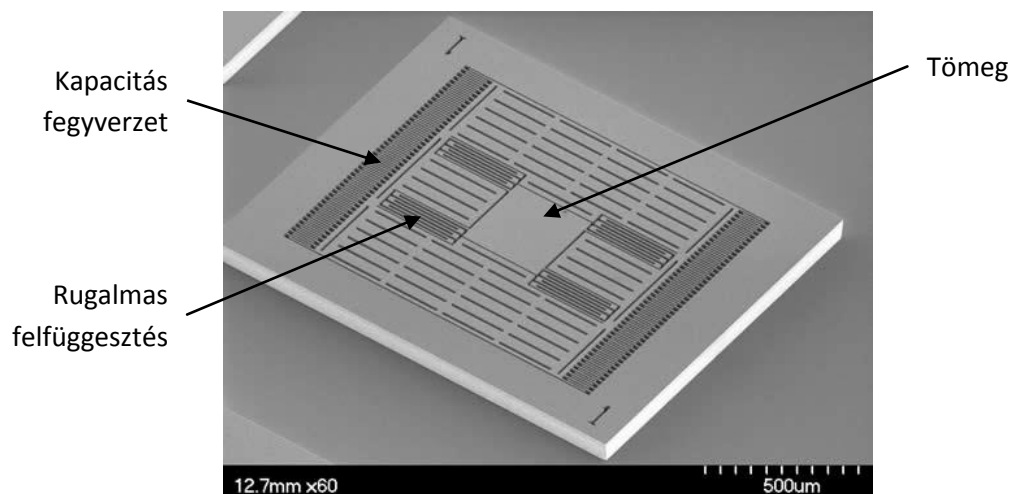
is egy ilyen alkatrész. Megtalálható benne a gyorsulásmérő cella (mikro-gép) és az általa létrehozott változások mérésére alkalmas elektronika.

A gyorsulásmérő cella működési alapelve, hogy a felfüggesztett tömegre szerelt lapkák képezik egy kondenzátor egyik fegyverzetét, míg a másik fegyverzet rögzítve van az alapelemhez. Ezt szemlélteti a 3.9 ábra.



3.9 ábra. Gyorsulásmérő cella elvi működése.

Mikor elmozdulás történik, a rugalmasan rögzített tömeg a tehetetlensége miatt elmozdul, ezáltal megváltoztatva a kondenzátorok kapacitását. Ez a változás egy mérőhíd segítségével feldolgozható elektronikus úton. A 3.10 ábrán látható egy gyorsulásmérő cella mikroszkopikus képe.



3.10 ábra. Gyorsulásmérő cella mikroszkopikus képe.

Fontos előnye ezeknek az érzékelőknek apró méretük szemben más érzékelőkével. Lehetőséget nyújtanak akár egy apró csavar fejébe történő beépítésre is, mindemellett elenyésző az energiafogyasztásuk. Mindezt figyelembe véve elképzelhető egy olyan rendszer, mely vezeték nélküli kapcsolaton keresztül továbbítja a mért értékeket, a működéshez szükséges energiát pedig a ráható rezgésekből nyeri. Ezek az érzékelők jellemzően hőkompenzáltak és hosszú idő után is tartják a kalibrált értékeket.

4. Felhasznált eszközök, alkatrészek

4.1 Előkészület

Először az érzékelőt kellett kiválasztanom. A szűkös anyagi lehetőségek miatt a célnak még megfelelő, de lehetőleg olcsó érzékelőre volt szükség. Előző tapasztalataim szerint célszerű, ha az érzékelőből a jelet digitális úton továbbítjuk csökkentve az esetleges zaj megjelenését. Ezután választottam az Analog Devices ADXL345-ös érzékelőjét. Több méréshatár állítható be rajta, ráadásul három tengelyen mér egyszerre. SPI protokollt használva kommunikál, mely egy digitális jeleket használó kommunikációs szabvány.

Az érzékelő által mért értékek kiolvasását és továbbítását a számítógép és egy mikrovezérlő segítségével oldom meg. Mivel 1600SPS (sample per second = minta per másodperc) az érzékelő maximális mintavételi sebessége, ezért elegendő a feladat elvégzéséhez egy Atmega8L típusú kontrollert, mely 3,3V tápfeszültség mellett is működik. Tartalmaz SPI perifériát és UART vezérlőt is, így mind az érzékelővel, mind a számítógéppel képes egyszerűen kapcsolatot tartani. Az RS232 adatátviteli sebessége miatt a kvarckristály 7,3728MHz rezonanciájú, mert ezt az értéket kettő valamely hatványával osztva megkapjuk a szabványosított sebességértéket. A firmware megírásához az Atmel AVR Studio 5-t használom. Ebben a verzióban már a telepítőben integrálva van a C fordító, melyet az Atmel ingyen ad minden korlátozás nélkül, szemben más mikrovezérlő gyártókkal.

Mivel soros-port már nem található a mai számítógépeken, ezért egy USB-UART átalakító is beépítésre kerül. Ez egy FT232 típusú átalakító. Előnye, hogy

alO portjai 3,3V jelszinten is működnek. A gyártó által kiadott MProg nevű szoftverrel könnyedén konfigurálható.

A nyáklemezt házilag készítettem el, a tervezéstől a furatszerelt alkatrészek beültetéséig. A tervezéshez az Altium Design programot használtam. A kapcsolási rajz és a nyákterv megtalálható a 1, 2 és 3-as számú mellékletben. A mérőegység elkészültével az elemző szoftver megalkotása volt a következő lépés.

A program megírásához a SharpDevelop nevű programot használok, mely hasonlít a Visual Studióhoz, de azzal ellentétben ez ingyenes. A fejlesztés nyelve C#, célplatform pedig az MS Windows rendszer. Grafikus felületen történik az adatok megjelenítése. Az FT232 által létrehozott virtuális soros-porton keresztül történik a parancsok elküldése és a mért adatok fogadása. Cél, hogy az érzékelő különféle beállításai módosíthatóak legyenek a szoftver kezelőfelületéről.

Végül egy mérőpadra is szükség van, melyen olyan körülményeket teremthetünk, amik segítenek elvégezni a méréseket. A mérőpad fő része egy villanymotorral megforgatott tengely. Ezen található egy furat, melyre extra súlyt rögzítve azt excentrikussá tehetjük. Az így keletkező rázkódást elemezzük. Továbbá az egyik csapágyház fellazításával az egytengelyűségnek nevezett hibát is modellezhetjük, mely újabb mérési módot kínál.

Miután minden szükséges eszköz a rendelkezésemre áll, következik a megvalósítás, melyet a következőkben részletezek.

5. Mérőegység

5.1 Elvi működés

A mérőegység célja, hogy az érzékelő és a feldolgozást végző számítógép közt megteremtse a kapcsolatot. Ez többek közt jelenti a mért adatok előfeldolgozását és továbbítását, az érzékelő ellenőrzését és alapvető beállításainak elvégzését. A megszokott rezgésdiagnosztikai rendszerekhez képest nem egyirányú a kommunikáció az érzékelő és a feldolgozó közt, hanem a feldolgozó,

amennyiben szükséges, megváltoztathatja az érzékelő méréshatárát, vagy mintavételezési sűrűségét.

Korábban már említettem, hogy előnyös a jel digitális úton történő továbbítása. A legjobb megoldás, ha már az érzékelő tokozásán belül megvalósul a digitalizálás, ezzel jelentősen csökkentve a környezet okozta zavart. Az érzékelő belső felépítését szemlélteti az 5.1 ábra, melyen jól látható a belső ADC.

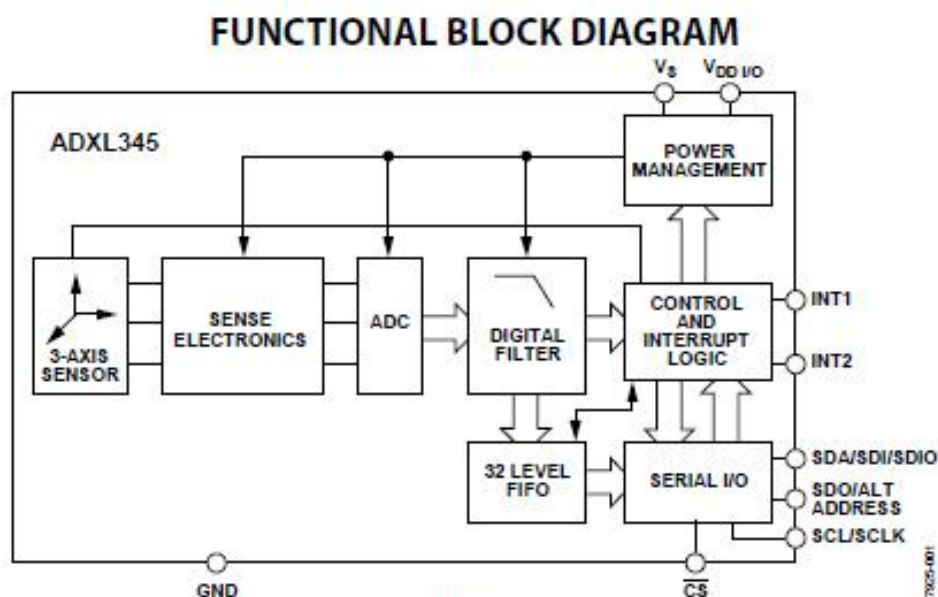


Figure 1.

5.1 ábra. Az ADXL345 belső felépítése [4].

(3-axis sensor = 3-tengelyes érzékelő; Senseelectronics = Érzékelő elektronika; ADC = Analóg digitális átalakító; Digital filter = Digitális szűrő; 32 level FIFO = 32 szintű FIFO tároló; Serial I/O = Soros I/O; Control and interruptlogic = Vezérlő és megszakítás kezelő egység; Power management = Energia szabályzás)

A mérőegység központi része egy mikrovezérlő lesz, mely SPI protokollt használva kommunikál az érzékelővel. A prototípus esetében a feldolgozó felé a kommunikáció USB kapcsolaton keresztül történik. A rendszer blokkvázlata az 5.2 ábrán látható.



5.2 ábra. Mérőegység elméleti felépítése.

Az érzékelőn több méréshatár és mintavételezési sebesség állítható be. Ezen beállításokat a mikrovezérlő alkalmazza majd a bekapcsolás után. Az elemző szoftverben lehetőséget kell biztosítani, hogy a beállításokat tetszőlegesen módosíthassuk. Az 5.3 ábrán láthatóak a prototípushoz használt érzékelő által támogatott mintavételezési beállítások.

Output Data Rate (Hz)	Bandwidth (Hz)	Rate Code	I _{DD} (μA)
3200	1600	1111	140
1600	800	1110	90
800	400	1101	140
400	200	1100	140
200	100	1011	140
100	50	1010	140
50	25	1001	90
25	12.5	1000	60
12.5	6.25	0111	50
6.25	3.13	0110	45
3.13	1.56	0101	40
1.56	0.78	0100	34
0.78	0.39	0011	23
0.39	0.20	0010	23
0.20	0.10	0001	23
0.10	0.05	0000	23

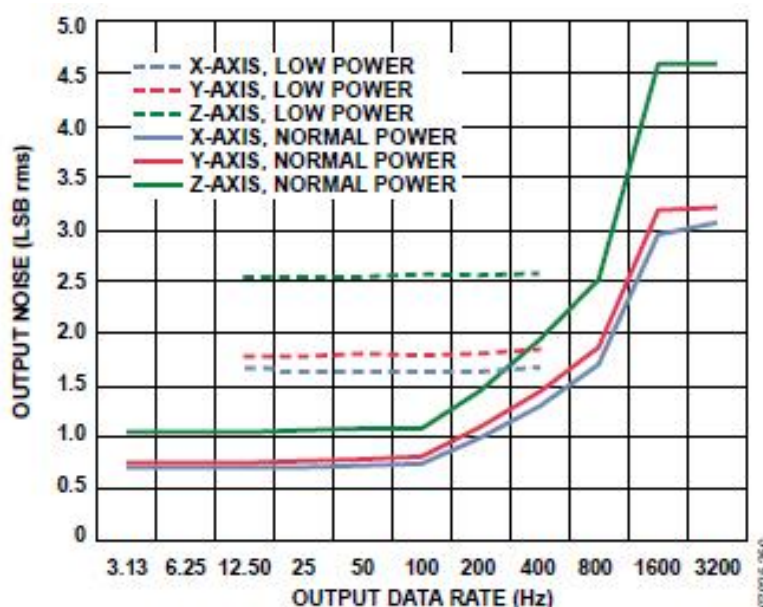
5.3 ábra. Lehetséges mintavételezési sebességek [4].

Több méréshatár közül választhatunk, amit üzem közben is szabadon módosíthatunk, ugyanúgy, mint a fent említett mintavételi sebességet. Az 5.4 ábra szemlélteti a méréshatárok lehetséges értékeit.

Setting		g Range
D1	D0	
0	0	$\pm 2 g$
0	1	$\pm 4 g$
1	0	$\pm 8 g$
1	1	$\pm 16 g$

5.4 ábra. Lehetséges méréshatárok [4].

Az érzékelő által biztosított pontosság csökken, minél jobban növeljük a mintavételezési sebességet. A legkisebb mintavételezési sebesség esetén csökken a zajszint és az analóg-digitális átalakító 10 bites felbontást biztosít. Amennyiben a 1600SPS sebességet választjuk, növekvő zajszintet tapasztalunk, és az ADC csak 8 bites felbontásban dolgozik. Ezt az összefüggést szemlélteti az 5.5 ábra.



5.5. ábra. Mintavételezési sebesség és zajszint összefüggése [4].

Az érzékelő képes öntesztet végezni. A mikrovezérlő bekapcsoláskor és adott időközönként kérhet öntesztet az érzékelőtől, hogy megbizonyosodjon a rendszer helyes működéséről. Rendellenes működés esetén a mérőegység jelzi a feldolgozó felé a meghibásodást.

A mérés a feldolgozó kérésére történik. Amikor a mérőegység parancsot kap a mintavételezésre, a mikrovezérlő fix időközönként mintavételt kér az érzékelőtől. Fontos, hogy azonos idő teljen el két mintavétel között a későbbi jelfeldolgozás valóságos eredményének érdekében. Egyszerre 1024 darab 1Byte méretű adat kerül átküldésre a feldolgozó felé, függetlenül az érzékelő beállításaitól. A feldolgozó miután megkapja az adatcsomagot, ábrázolja a képernyőn a mérés eredményét. Továbbá egy másodlagos grafikont is rajzol, mely a mért adatok frekvenciaspektrumát jeleníti meg.

5.2 Kivitelezés

A rendszerterv előzetes felvázolása alapján, első lépésként az érzékelőt választom ki. Két gyártó jöhet szóba, a Freescale és az AnalogDevices.

Az egyik szempont, ami alapján választok, a méréshatár. Mindkét gyártónak van a palettáján ilyen, a 1,5g-től több 100g-ig mérő eszköze.

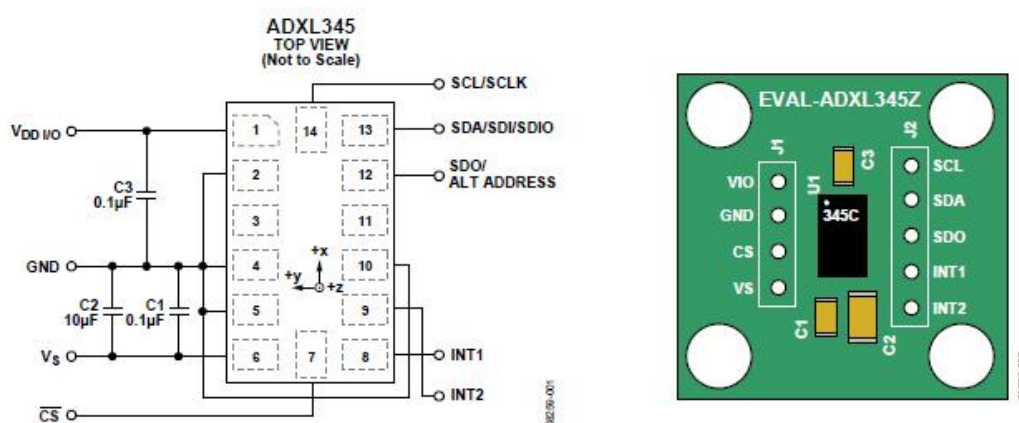
A másik szempont, hogy tartalmazzon integrált ADC-t. Erre nagy hangsúlyt fektetek, mert tapasztalataim szerint, ezzel jelentősen csökkenthető a hibalehetőség, mivel a jelet kezdetektől fogva digitális formában továbbítjuk. Ez egyben a digitális kommunikáció megvalósítási módját is körvonalazza. Az Analog Devices jellemzően SPI-t, a Freescale I2C-t alkalmaz. Mindkettő könnyen kezelhető, ezért nem ezen múlik a választás.

A harmadik és egyben döntő kérdés a mintavételi sebesség. Ezt az előbb már említett integrált ADC miatt kell számításba venni. Az alsó kategóriás érzékelőket figyelembe véve, egyértelműen az Analog Devices a megfelelőbb, mivel ő kínál nagyobb mintavételű érzékelőket, legalábbis ebben a kategóriában.

A fentiek figyelembevételével választottam az ADXL345-t. Az Analog Devices palettáján ez a belépő szintű, digitálisan kommunikáló érzékelő. Gyakorlatilag ez a legolcsóbb, körülbelül \$2 az ára. Háromtengelyes szenzor, melyben a tengelyek merőlegesek egymásra. Méréshatárnak +/-2g, +/-4g, +/-8g és +/-16g értékeket lehet beállítani. Maximális mintavételi sebessége maximum 1600SPS. Az elvi működésnél már említett módon, minél nagyobb mintavételi

sebességgel működtetjük, annál jobban romlik az ADC pontossága. Reményeim szerint ezt a későbbiekben mérésekkel is sikerül alátámasztanom.

Végül kiválasztottam, milyen tokozással kérjem az érzékelőt annak érdekében, hogy házilag forrasztani tudjam. Kizárólag LGA tokban kapható és ezt házilag nem tudom szakszerűen beforrasztani, ezért a "Breakout Board" kivitelű változatot kértem. Ez direkt kísérleti célokra készült. Lényegében az alkatrész lábai egy kis nyomtatott áramkörön ki vannak vezetve, hogy könnyen kezelhetővé válják. Ennek a panelnek látható a kapcsolási rajza és beültetése a 5.6 ábrán.



5.6 ábra. ADXL345 „breakoutboard” bekötése [4].

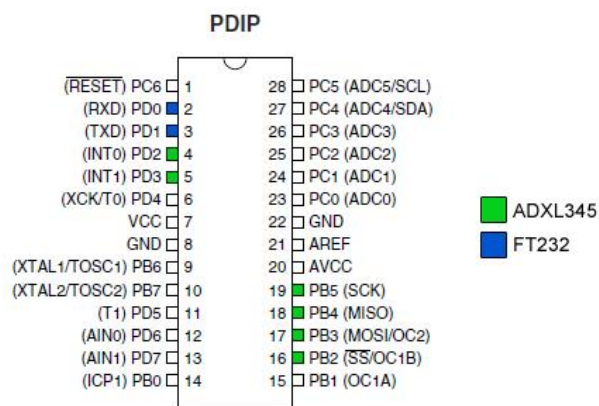
Ezt az áramkört kiegészítem egy szalagkábeles csatlakozással, mellyel a mérőegységhez fog kapcsolódni. Ez lehetővé teszi, hogy a mérőegységet a vibráló alkatrészről távolabb helyezzem el. Ez a kialakítás megfigyelhető a 4. mellékletben található első összeállításon. Az ADXL345 3,3V tápfeszültséget igényel. A későbbi alkatrészválasztás során ez mindenképp meghatározó szempont, főként a mikrovezérlőre és az USB-UART átalakítóra nézve.

Mikrovezérlőre két okból van szükség. Az egyik fő feladata, hogy az érzékelőből kiolvasott adatokat továbbítsa a számítógép felé. A másik feladat, ami távlati tervként szerepel, hogy a mérőegység mikrovezérlője végzi a DFT futtatását a feldolgozó helyett. Emiatt nagyszámú érzékelő esetén sem kell nagy számítási teljesítményű számítógépet alkalmazni. A DFT mikrokontrollerbe való implementálására ebben a munkában még nem kerül sor.

A mikrovezérlő Atmel gyártmányú, mert ennek a típusnak a kezelésében már gyakorlattal rendelkezem, és mert ehhez van felszerelésem. Programozását egy AVR JTAG ICE segítségével oldom meg. A pontos típus kiválasztásánál a következő szempontok alapján döntöttem, illetve a megfelelőnek ítélt ATmega8 alkalmazhatóságát gondoltam át:

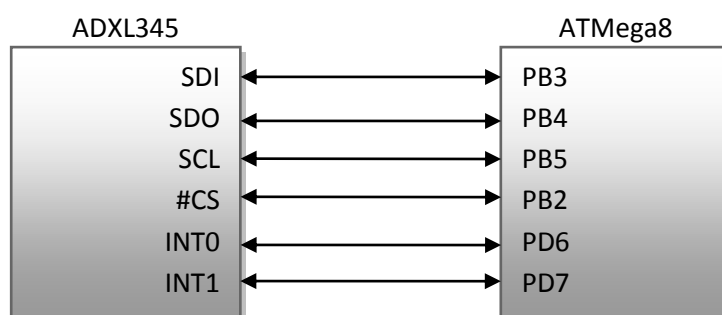
- Programmemória mérete: 8kB programmemória elegendő lesz egy SPI-n keresztül történő adat kiolvasásához és továbbküldéséhez, még akkor is, ha a programot C nyelven írom. Az Atmel AVR Studio 5 telepítője már tartalmaz C fordítót, melyet korlátozások nélkül, ingyen lehet használni, és mindezek mellett nagyon jól optimalizált.
- RAM mérete: Jelen alkalmazásban nem tárolom a mért adatokat a mikrovezérlőben, hanem közvetlenül továbbítom, így az 1kByte RAM elegendőnek látszik.
- Perifériák: Szükség van egy SPI és egy UART vezérlőre. Mindkettő megtalálható a mikrovezérlőben.
- IO portok száma: Az ATmega8 legkisebb tokozásán is 23 darab szabadon használható IO van, így bőségesen elegendő a feladat elvégzéséhez.
- Tápfeszültségigény: A tápfeszültséget az érzékelőt működtető feszültség határozta meg, ami 3,3V. Szintillesztők alkalmazásával megoldható lenne, hogy a mikrovezérlő 5V tápfeszültséggel működjön, az érzékelő pedig 3,3V-al, de ez felesleges bonyolítás lenne. Az ATmega...L típusok 2,7V tápfeszültségtől kezdve üzemképesek.
- Sebesség: A UART miatt mindenképp kristályoscillátort alkalmazok, melynek az értéke 7,3728MHz a UART hiba 0%-ra csökkentése végett. Szépsége az Atmel AVR szériának, hogy ahány MHz-n futtatjuk a processzorjukat, annyi MIPS-re képesek. Ily módon elegendőnek tűnik a mikrovezérlő gyorsasága.

Ezek alapján maradt az első gondolatom, hogy az ATmega8L (DIP28) típust használjam. Számos alkalmazásban használtam már korábban és mindig megbízhatónak bizonyult. A mikrovezérlő lábkiosztását mutatja az 5.7 ábra.



5.7 ábra. Az ATmega8L lábkiosztása.

A megszokott "Reset" gombon és a kvarckristályon kívül két fontos csatlakozást kell megemlítenem. Az egyik a mikrovezérlő és a FT232 közti kapcsolat. Itt az RS232-nél megszokott TxD és RxD vezetékek segítségével történik az adatátvitel. A másik fontos összeköttetés pedig a mikrovezérlő és az ADXL345 közt van. Ez egy SPI protokollt használó adatátvitel, melynél az ATmega8 a "Master", az ADXL345 pedig a "Slave" szerepét tölti be. Ennek a valós bekötése látható a 5.8 ábrán.

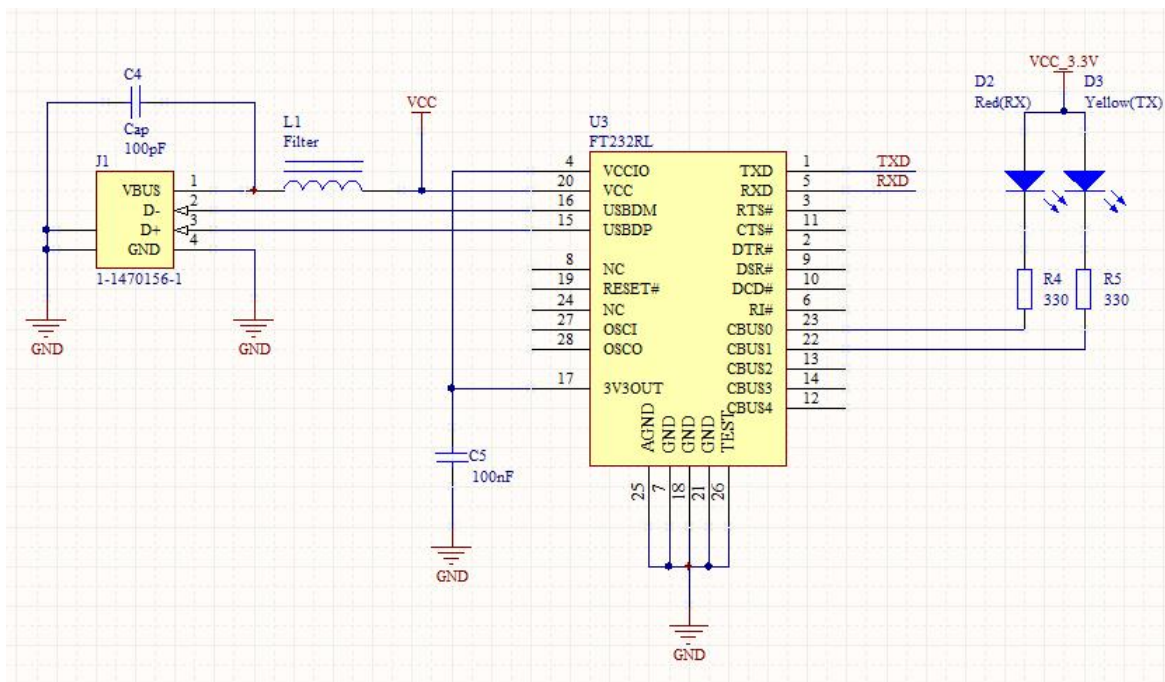


5.8 ábra. Összeköttetés az érzékelővel.

Mivel manapság a számítógépeken nem található soros-port, így szükség van egy UART-USB átalakítóra. Az USB csatlakozás további előnye, hogy 5V-os tápfeszültséget biztosít a berendezés számára. A feladatra az FTDIChip gyártmányú FT232-t alkalmazom. Ez az átalakító számos extra funkcióval van ellátva, könnyen beépíthető saját alkalmazásba és alapvetően nem igényel

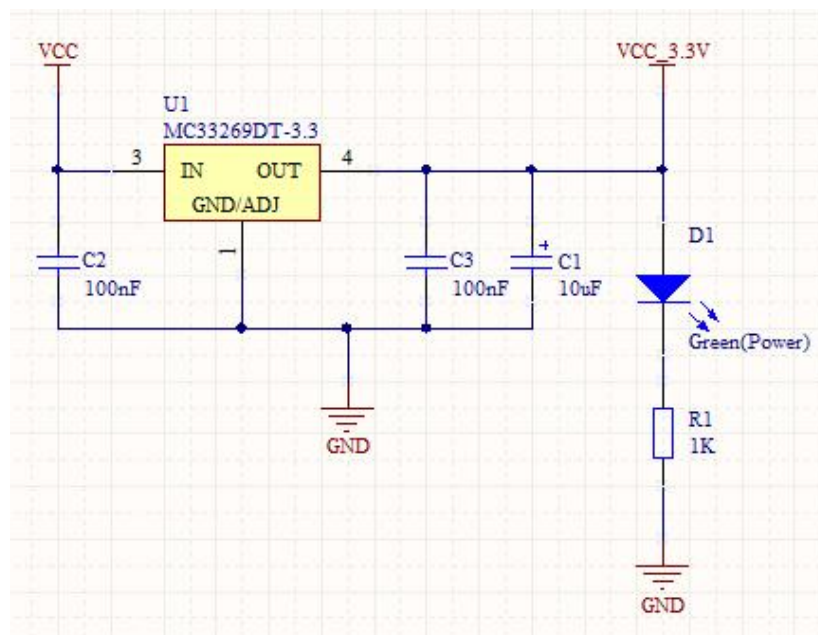
különböző konfigurálást. Fontos, hogy a jelszintek közti különbségre is megoldást nyújt, mivel elszigetelve tudja kezelni az USB csatlakozást és a mikrovezérlőre kapcsolódó IO-kat. Ez lehetőséget nyújt a 3,3V-os rendszerünk USB csatlakozásának egyszerű kialakításához. A mikrovezérlő felé a már korábban említett TxD és RxD szálon kommunikál.

A gyártó egy MProg nevű konfigurátor szoftvert kínál ezekhez az átalakítókhoz, mely segítségével különféle beállításokat végezhetünk. Ilyen beállítás például, hogy virtuális soros-portként (VCP) vagy egyedi eszközként ismerje fel a számítógép. Alaphelyzetben VCP-ként működik, jelenleg ebben az üzemmódban használok. A direkt elérési módban nem soros-portként jelenik meg, hanem tetszőlegesen beállítható eszközként. Ilyenkor egy d2xx.dll névre hallgató osztálykönyvtár meghívásával lehet elérni az átalakítót. További beállítást lehet eszközölni a szabadon használható ki- és bemenetein, melyek közül kettőt a bejövő és a kimenő adatok aktivitását jelző LED-ek meghajtására használok. A bejövő tápfeszültséget egy ferritmagos fojtó szűri. Ez az ajánlás megtalálható az FT232 adatlapjában is. Minden szükséges telepítési fájlt megadnak a gyártó honlapján. Az FT232 és a hozzá tartozó alkatrészek bekötését ábrázoló kapcsolási rajz részlete látható az 5.9 ábrán.



5.9 ábra. FT232 bekötése.

Az ADXL345 3.3V tápfeszültség igényű, ezért nem táplálható direkt módon az USB csatlakozás +5V-os táplálásáról. Ennek megoldásaként, egy stabilizátor IC-t alkalmazok. Mivel az USB csatlakozás táplálása esetenként 4,5V-os feszültséget biztosít, ezért olyat kell választani, aminek a feszültségesése nem haladja meg a 1,2V-t. Továbbá figyelembe kell venni az áramfelvételt. Ez jelen esetben a LED-ek áramigényével együtt maximum 70mA-t jelent. Persze a LED-ek szinte soha nem világítanak egyszerre, legfeljebb nagyon rövid ideig. Ezek ismeretében esett a választás az MC33269DT-3.3 típusú IC-re. Maximum 800mA terhelhetőségű, ami bőven a kívánt érték felett van. Továbbá 500mA terhelés mellett $V_{be} - V_{ki} = 1.0V$ a feszültségesés, ami szintén megfelel a célnak. A tápegység kapcsolási rajzának részlete látható az 5.10 ábrán. Megtalálhatóak a képen a bemenő, illetve a kimenő oldali szűrőkondenzátorok és a bekapcsolt állapot jelzésére szolgáló LED. Bár az 5.8 ábrára került, de a tápellátás része az L1 jelzésű ferritmagos fojtó is, mely a tápfeszültségre szuperponálódott zavarokat segít csökkenteni.



5.10 ábra. Tápegység.

A mérőegység teljes kapcsolási rajza a 1. mellékletben található. A kapcsolási rajz után került sor a nyák megtervezésére.

A stabilizátor IC-t a minimális áramigény és a rajta eső kis feszültség miatt SMD kivitelben és hűtőborda nélkül terveztem a nyákra. Az FT232 kizárólag SMD tokozásban kapható, ezért ebben az esetben nincs választási lehetőségem. A többi alkatrész furatszerelve kerül a nyákra. Természetesen lehetne SMD alkatrészekkel kivitelezni az egész áramkört, de mivel egy prototípusról van szó, ezért ha később módosításokra van szükség, akkor az így könnyebben kivitelezhető.

Az érzékelő csatlakoztatása szalagkábelrel keresztül valósul meg. Az ehhez tartozó csatlakozóból olyan kivitelű ellenpárt választok, melyen található biztonsági kapocs. Ez kiküszöböli azt a lehetőséget, hogy a rezgés hatására a csatlakozó elmozduljon a helyéről. Mivel a nyáket házilag készítem el, ezért törekedtem arra, hogy egyoldalas kivitelű legyen. Az elkészült nyomtatott áramkör alsó és felső beültetését a 2. és a 3. melléklet szemlélteti. Az áramkör megépítése és élesztése sikeres volt. Következő lépés a mikrovezérlő szoftverének megírása.

Az Atmega8-ban levő firmware valósítja meg a tényleges működést. A fejlesztéshez az Atmel AVR Studio 5-t használom. Ebben már integrálva van a C fordító. A fejlesztés első lépéseként, egy házilag készült AVR JTAG ICE segítségével egy UniversalBootloader névre hallgató programot töltök a mikrovezérlőbe. Erre azért van szükség, hogy későbbiekben a programozást az USB csatlakozáson keresztül könnyen el tudjam végezni. További előnye ennek a bootloader-nek, hogy támogat RS232, RS485 és RS422 protokollon keresztüli feltöltést is. A bootloader feltöltőprogramjára könnyedén be lehet állítani egy hivatkozást az AVR Studio-ban, így a program lefordítása után a mikrovezérlő felprogramozása olyan, mintha egy gyári programozót használnék.

A program első lépésben inicializálja a perifériákat és IO-kat. A UART vezérlő regisztereinek értéket adva állítja be a kívánt paramétereket, majd engedélyezi a UART megszakításokat. Ezután az SPI periféria konfigurálása megy végbe. Az érzékelőnek számos beállítási lehetősége van, ezek részletesen megtalálhatóak az adatlapján. Az inicializáláshoz a következő függvények hívódnak meg:

```
PORT_Init();    // IO beállítások
USART_Init();   // UART beállítások, megszakítás engedélyezés
```

```
SPI_Init();      // SPI beállítások
ADXL345_Init(); // ADXL345 alapbeállítások alkalmazása
```

Ezután a program belép egy végtelen ciklusba. Itt később elhelyezhető például az időközönként öntesztet végző algoritmus. UART megszakítás esetén elkezdődik a parancsértelmezés. Ennek végeredményeként a beérkezett adathoz tartozó utasítás végrehajtása következik. Miután megtörtént, a program visszatér a megszakításból. Az alábbi funkciók hívhatóak meg:

```
int ADXL345_RefreshData(); // Érzékelt adatok kiolvasása
voidADXL345_SetRange2();   // Méréshatár: +/-2g
voidADXL345_SetRange2();   // Méréshatár: +/-4g
voidADXL345_SetRange2();   // Méréshatár: +/-8g
voidADXL345_SetRange2();   // Méréshatár: +/-16g
voidADXL345_SetBW100();    // Mintavételi sebesség: 100SPS
voidADXL345_SetBW400();    // Mintavételi sebesség: 400SPS
voidADXL345_SetBW800();    // Mintavételi sebesség: 800SPS
voidADXL345_SetBW1600();   // Mintavételi sebesség: 1600SPS
```

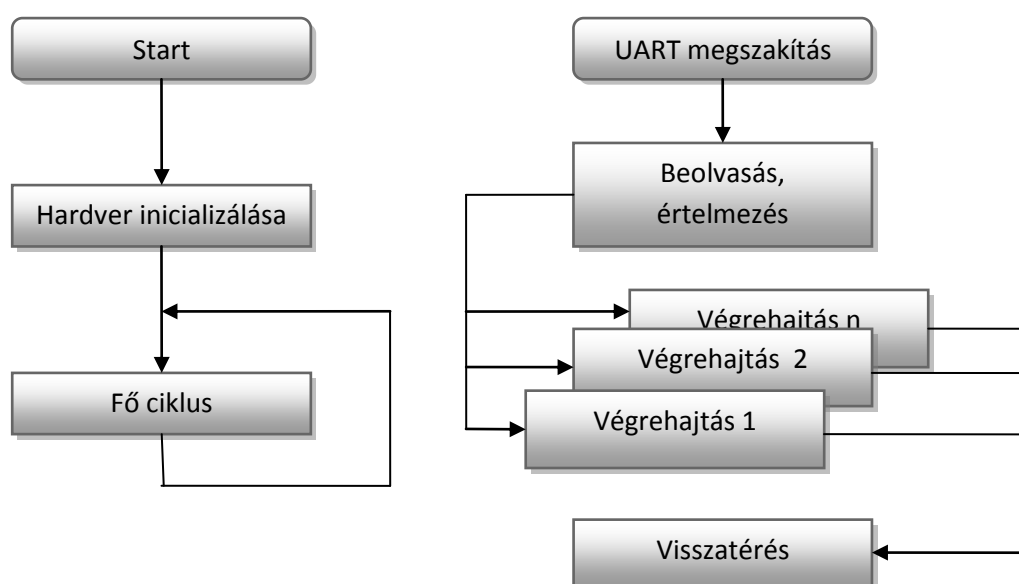
A fent említett függvények és a teljes firmware projekt megtalálható a mellékelt CD-n.

Ezekután a következő kommunikációt definiáltam. A feldolgozó RS-232 kommunikációt használva érheti el a mérőegységet a következő szokásosnak tekinthető beállításokkal: 115200baud, 8, N, 1. Ezen túlmenően a mérőegység Byte nagyságú adatokat fogad. Ezeknek az ASCII karakter megfelelője látható a 5.11 ábrán található táblázatban. Kizárólag a mintavételezésre utasító parancs esetén küld vissza adatokat a mérőegység. Természetesen ezek a parancsok kibővíthetők, bármikor definiálható helyettük új, például az aktuális beállítások kiolvasása, vagy önteszt elvégzésére való utasítás.

Parancs megnevezése	Karakter	Válasz
1kByte minta készítése	R	3x1kB adat küldése
Méréshatár beállítás: +/-2g	a	-
Méréshatár beállítás: +/-4g	b	-
Méréshatár beállítás: +/-8g	c	-
Méréshatár beállítás: +/-16g	d	-
Mintavételi sebesség beállítása: 100SPS	m	-
Mintavételi sebesség beállítása: 400SPS	n	-
Mintavételi sebesség beállítása: 800SPS	o	-
Mintavételi sebesség beállítása: 1600SPS	p	-

5.11 ábra: A mérőegység funkciói.

A mérőegység a parancs értelmezését követően elvégzi a hozzá tartozó utasítást. Amennyiben az utasítás megkívánja, visszaküldi a megfelelő adatokat a feldolgozó felé. A firmware egyszerűsített blokkdiagramja az 5.12 ábrán látható.



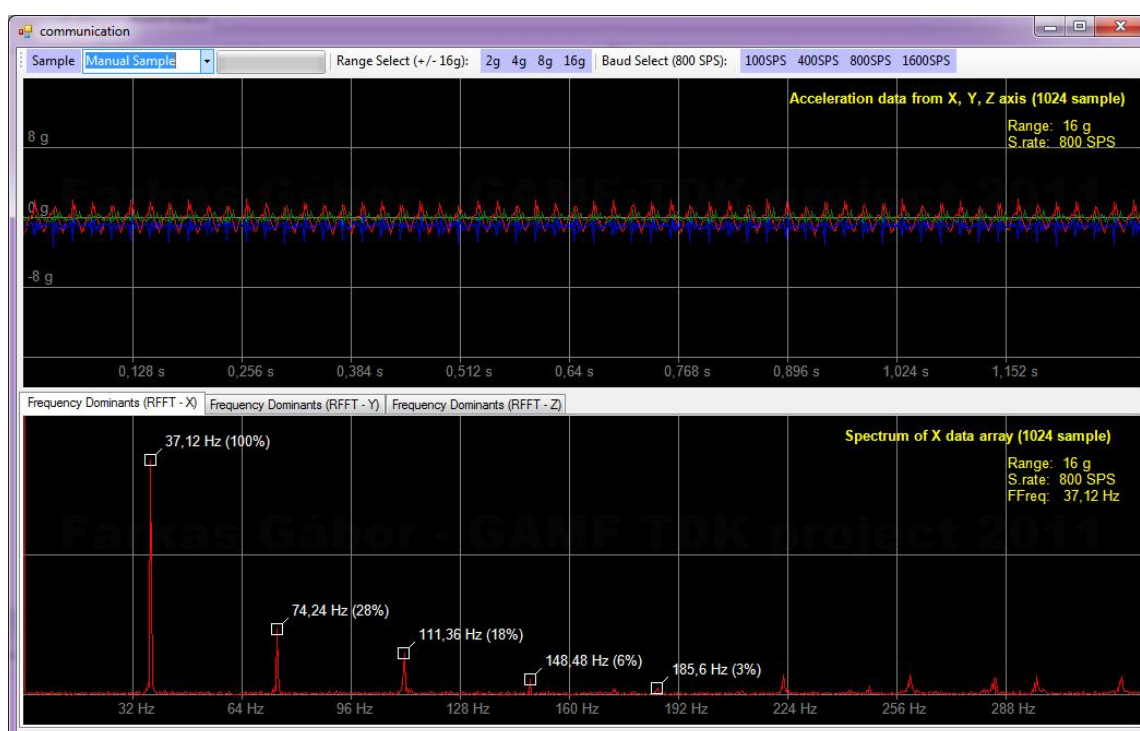
5.12 ábra: A firmware blokkdiagramja.

Végül ellenőrzöm a mérőegység működését. *Hiperterminál* nevű alkalmazás segítségével manuálisan utasításokat küldök a számítógép felől, és a visszatért értékekből megállapítom, hogy megfelelően működik-e. Miután megbizonyosodtam erről, elkezdem az elemző szoftver megírását. Erre többek

közt azért van szükség, hogy ne csak számokat lássak a képernyőn, hanem grafikus formában láthassam a mért jelalakot és el tudjam végezni az elemzést.

5.3 Elemző szoftver

Az elemző szoftver végzi a mérőegység által közvetített adatok feldolgozását, megjelenítését. Továbbá lehetőséget biztosít az érzékelő lehetséges beállításainak módosítására. Az 5.13 ábrán látható a programkezelő felülete.

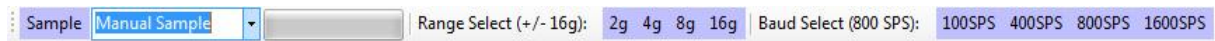


5.13 ábra: Az elemző program.

Mint említettem már szoftvert C# nyelven írtam ehhez a projekthez. Az FT232 meghajtója által emulált RS-232 porton keresztül kommunikál a mérőegységgel. Ehhez a *System.IO.Port.SerialPort* beépülő modult használom. A lehetséges parancsokat a mérőegység felépítésénél már részleteztem.

A program egyetlen ablakból áll, ez funkcionálisan három fő részre osztható. Legfelül található egy eszköztár, melyen a mérés irányításához

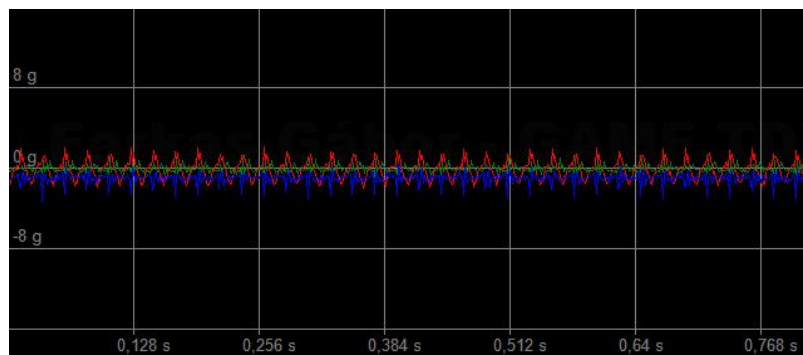
szükséges gombok és beállítások találhatóak. Például, hogy a mintavételezés egyszeri (1 x 1kB) vagy folyamatos (n x 1kB) legyen. Továbbá átállíthatjuk az érzékelő méréshatárát, illetve mintavételezési sebességét is.



5.14 ábra. Az eszköztár.

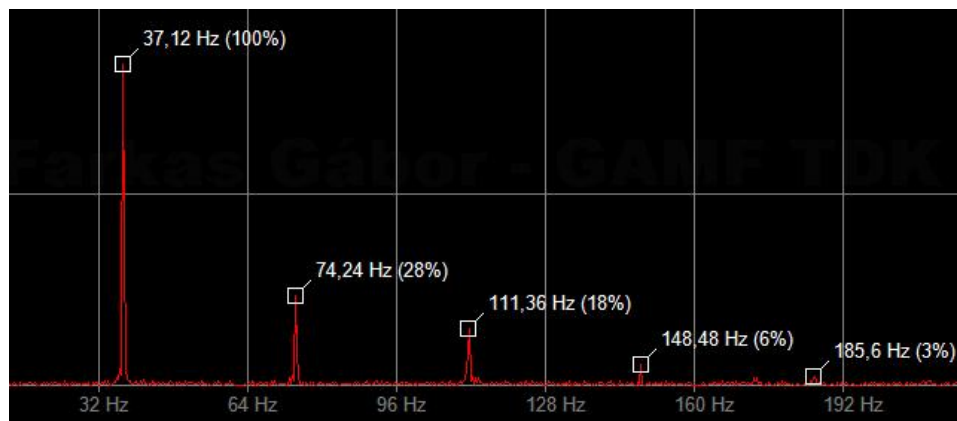
Minél kisebbre választjuk a mintavételt, annál lassúbb lesz egy mérési ciklus. Érthető, hiszen 100SPS esetén 1024 darab minta átvitele ~10 másodpercig tartana. Mikor átállítunk egy értéket, a program rögtön utasítást küld a mérőegység felé az új beállítások alkalmazásához.

Az eszköztár alatt található a második fő felület, a mért jelet időben megjelenítő panel. Itt a gyorsulásérzékelő három tengelyén külön-külön mért értékeket lehet látni különböző színű vonalakkal megjelenítve. Minden egyes mérési ciklus alkalmával frissül ennek a panelnek a tartalma. A grafikon előállítása egy `char[1024]` tömb adataival történik. A panel csak a teljes megrajzolás után kerül frissítésre a vibrálás elkerülése végett. A függőlegesen látható beosztás a méréshatártól függően változik. A vízszintes tengelyen időbeosztás látható, mely a mintavételi sebesség függvényében skálázódik. Az 5.15 ábrán látható a felső panelről egy kép. Az ilyen jellegű grafikonok ábrázolására léteznek előre megírt modulok, de jelen esetben jobbnak láttam magam megírni a megjelenítést szolgáló algoritmust.



5.15 ábra. A mért értékeket megjelenítő panel.

Végül az alsó panel kerül bemutatásra, melyen az imént kirajzolt jel frekvenciaspektruma található. Az itt megjelenő spektrum a rezgésdiagnosztika egyik legfontosabb lépésének eredménye. Ezen spektrum alapján lehet meghatározni különféle eljárások segítségével, hogy az adott gép jól üzemel-e. Itt három fülön, vagyis tengelyenként külön-külön érhető el a három tengely mérési eredményeiből alkotott spektrum. Ez látható az 5.16 ábrán.



5.16 ábra. A mért jelhalmaz spektruma.

A spektrum megalkotásához az Exocortex.DSP által kiadott, szabadon felhasználható csomagból a következő függvényt használom:

```
voidExocortex.DSP.Fourier.RFFT();
```

A transzformálni kívánt adatokat elhelyezzük egy tömbben, majd ezt a tömböt paraméterként megadjuk a fenti függvénynek. Miután meghívjuk, a paraméterként megadott tömbbe visszkapjuk a transzformáció eredményét. Ezt a felső panelnél használt algoritmus segítségével megjelenítem.

Összeállt végül a mérőegység és az elemző szoftver. Viszont a mérések lebonyolításához olyan környezetre lenne szükség, ahol a feltételezett hibák jelen vannak, mint például egy excentrikusan forgó tengely. A legjobb az lenne, ha ezek a hibák szándékosan előidézhetőek és megszüntethetőek lennének, vagy akár a hibák tetszőleges kombinációkban jelennének meg. Ilyen szerkezetet nehéz találni, hiszen miért is tervezne egy mérnök olyan gépet, ami szándékosan rosszul működik! A megfelelő tesztpad elkészítése újabb feladatként realizálódott, s vált a dolgozat részévé.

6. Mérőpad

6.1 Mérőpadon elvégezhető mérések

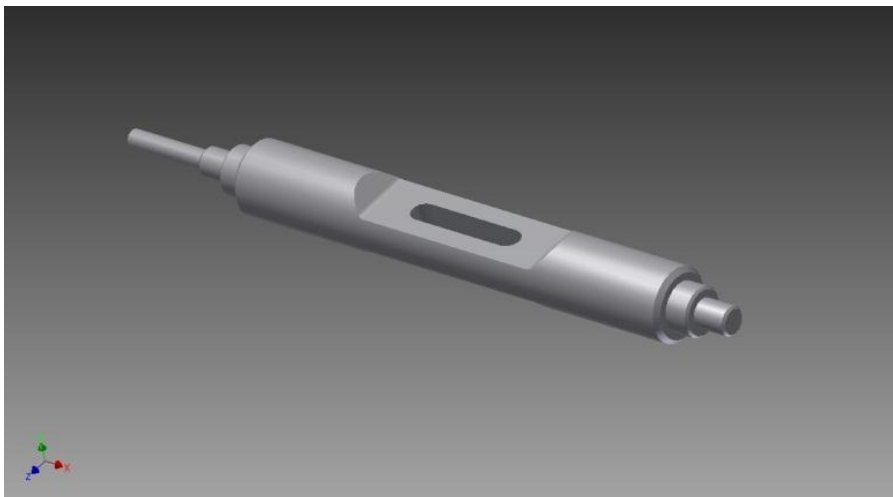
Nyugalomban levő mérés elvégzésére is szükség van. Ez magának az érzékelőnek a vizsgálatához szükséges. Ilyenkor megfigyelhető, hogy különböző mintavételezési sebességek és méréshatárok mellett, milyen jelet szolgáltat a mérőegység.

Két féle gépészeti hibát vizsgálhatunk a mérőpadon:

- Excentrikus forgórész: Ilyen lehet egy sérült ventilátor, vagy egy görbe tengely.
- Egytengelyűségi hiba, excentricitási hiba: A tengelyt tartó csapágyak tengelyei párhuzamosak egymással, de nem egy vonalba esnek. Ez terhelést jelent a csapágyakra, mely jelentősen rövidítheti az élettartamukat.

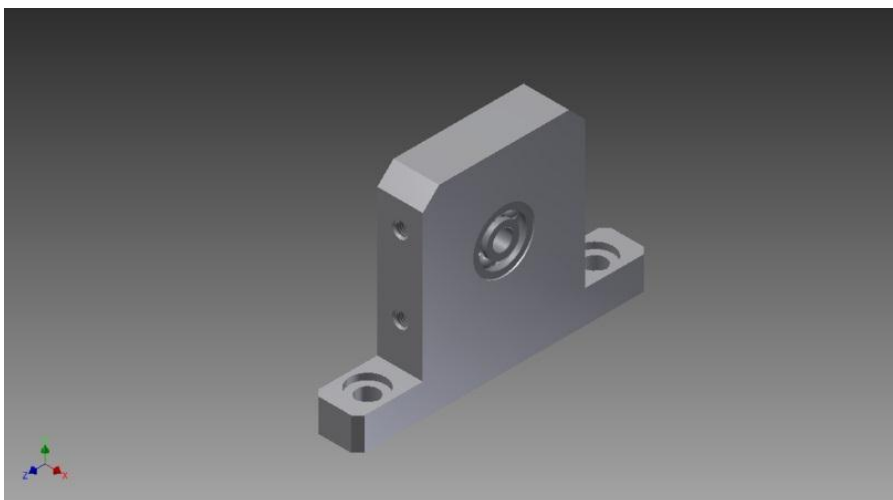
6.2 A mérőpad felépítése

A mérőpadot úgy alakítottam, ki, hogy elsősorban excentrikusan forgó tengely által keltett helyzetet imitáljon. Ehhez szükség van egy tengelyre, mely megfelelően ki van egyensúlyozva. Ez lesz a fő alkatrész, mely alaphelyzetben rendeltetésszerűen működik. A szándékos "elrontáshoz" viszont arra van szükség, hogy egy excentersúlyt rögzíthessünk a tengelyhez. Ennek megoldásához a tengely közepén található két szimmetrikusan bemart felület és egy átmenő furat. Az excentricitás a csavar pozíciójának változtatásával állítható be. A tengely két SKF626 csapágyon fekszik, vízszintes pozícióban. Egyik végén található egy 4mm átmérőjű hosszabbítás, mely a tengelykapcsolóra csatlakozik. A tengely műhelyrajza, melynek 100-001 a rajzszáma, megtalálható az 5. mellékletben. A 6.1 ábrán látható a tengely.



6.1 ábra. Tengely.

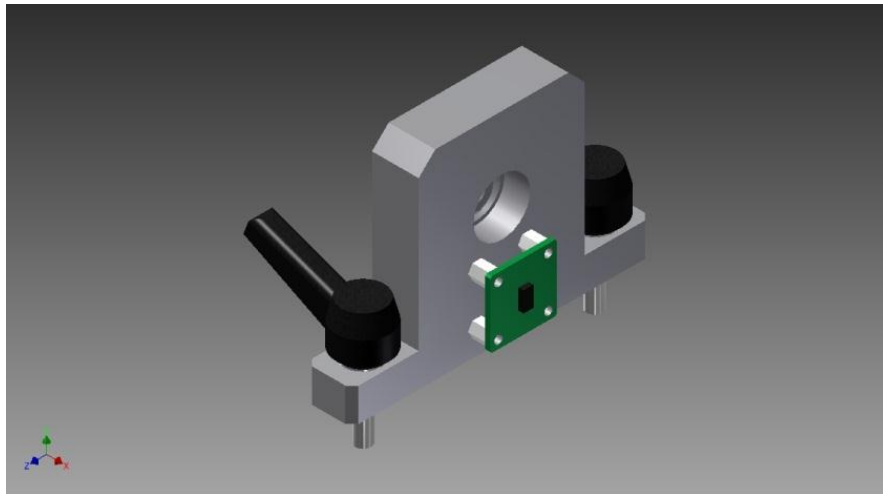
A két csapágyhoz természetesen két csapágyház is tartozik. Ezek viszont nem egyformák. A 100-002 rajzszámú csapágyház, mely a 6. mellékletben található, a csapágy alaphoz történő rögzítésén kívül a motortartó lemeznek is rögzítési lehetőséget biztosít. Erre 4 darab M4 menetes furat ad lehetőséget. A 6.2 ábrán látható a 100-002 csapágyház és benne egy SKF 626 csapágy.



6.2 ábra. A motor felőli csapágyház.

A másik csapágyház többletfeladata pedig, hogy rögzítési lehetőséget biztosítson a gyorsulásérzékelőnek. Szemben a másik csapágyházzal ez nem fixen van lecsavarozva, hanem a rögzítő csavarok karokkal vannak ellátva, ezzel lehetővé téve, hogy bármikor fel lehessen lazítani az alapzatról, modellezve az

egytengelyűségi hibát. A 6.3 ábrán látható a 100-003 rajzszerű csapágyház az érzékelővel és két karos rögzítővel. Műhelyrajza a 7. mellékletben látható.

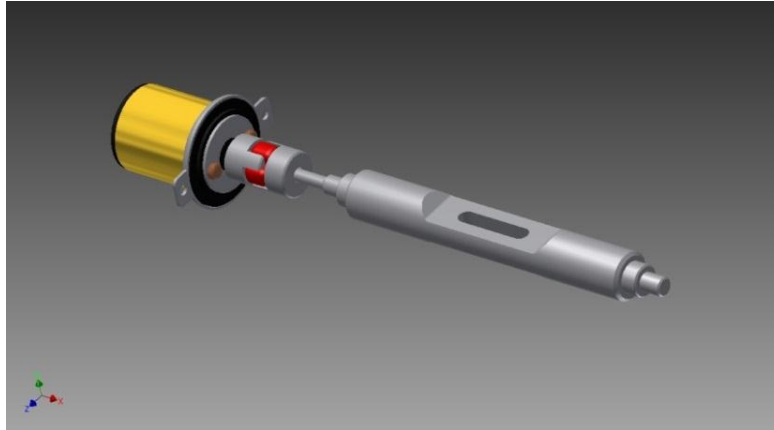


6.3 ábra. A 100-003 csapágyház érzékelővel és lazító karokkal.

A tengely megforgatásához szükség van egy villanymotorra. A szűkös anyagi körülmények miatt - szemben az első elképzeléssel, ahol egy kisteljesítményű, de váltóáramú motort használtam volna az "ipari jelleg miatt" - maradtam egy kis, 24V-os egyenáramú, Mitsubishi gyártmányú villanymotornál. Előnye, hogy a hozzátartozó gumikerettel együtt ki tudtam szerelni egy axiális ventilátorból. Mivel a motort a legkevésbé sem szeretném kitenni a mérések alatt felmerülő "nyúzásnak", ez a gumikeret bizonyára hasznos szerepet játszik majd az ilyen jellegű rezgések elnyelésében.

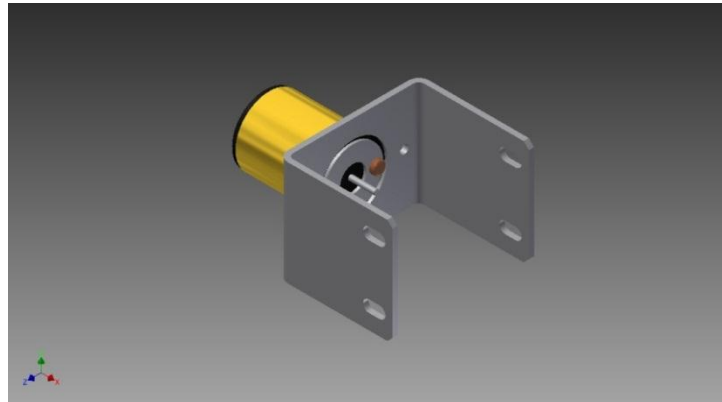
A motor védelméért és a szakszerű hajtást szem előtt tartva, a tengelyt egy körmös tengelykapcsolón keresztül csatoljuk. Ez három részből tevődik össze. A két körmös tárcsából és a közöttük található elasztikus elemből. Az előbbiek a TRASCO-ES P7-2 / P7-4 sorszámot viselik. Az egyiken egy 4H7 átmérőjű furat van, a másikon pedig egy 2H7 átmérőjű.

Köztük található az elasztikus elem. A most említett elemek összeállítása, vagyis a motor, a körmös tengelykapcsoló és a tengely a 6.4 ábrán látható.



6.4 ábra. A tengely meghajtása.

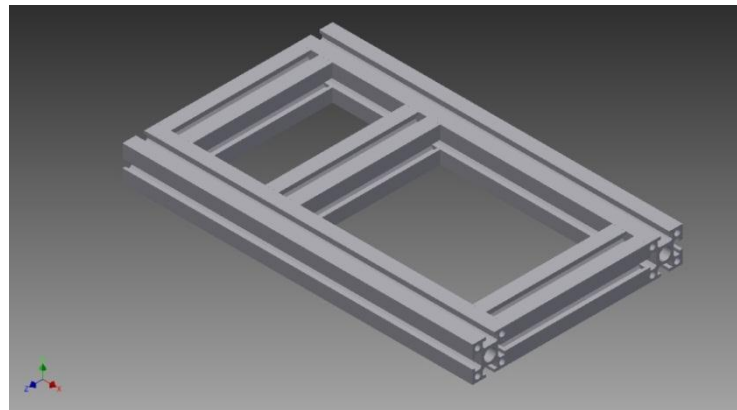
A motor rögzítését a 100-002 rajkszámú csapágyházhoz egy 2mm-es lemezből hajlított, majd kifűrt alkatrészsel oldottam meg. Ezen fekszik fel a motor gumiágya. A négy furat vízszintes irányban 5mm nyújtást kapott, hogy összeszereléskor a tengelykapcsoló illesztése által felmerülő különbségek ne okozzanak gondot. Ennek a műhelyrajza, mely a 100-004 rajkszámot viseli, szintén megtalálható, mint 8. melléklet. A motor és a rögzítő lemez a 6.5 ábrán látható.



6.5 ábra. A motor felfüggesztése.

Miután a lényegi rész összeállt, szükség van egy alapra. Figyelembe véve, hogy a 100-003 csapágyházat mozgatni szeretnénk, nem elegendő egy furat az alapon a rögzítéséhez. Mivel ez egy kísérleti összeállítás, előfordulhat, hogy többször új alkatrészt kívánok rögzíteni az alapra, ebben az esetben pedig

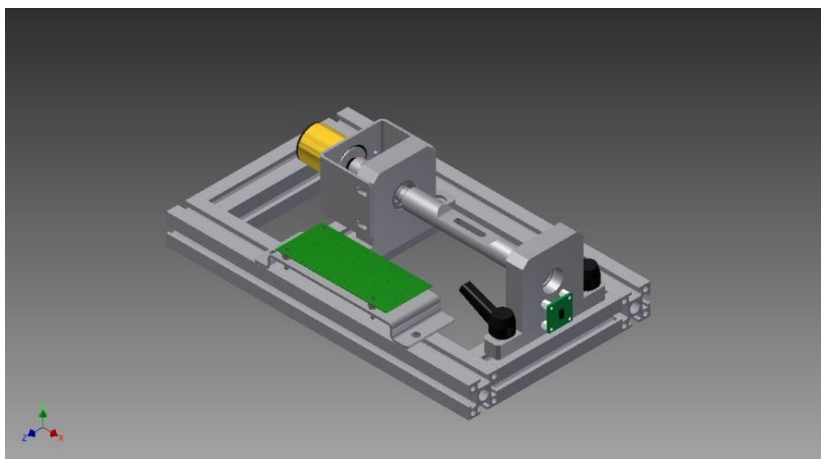
szétszerelést és megmunkálást igényel a szerkezet. A legjobb megoldásnak a "teleszkóp" alumínium profilt találtam. Fő hátránya, hogy drága, de mivel összesen 800mm kell ehhez a feladathoz, ez nem okoz jelentős gondot. Könnyen és gyorsan összeállítható belőle szinte tetszőleges bonyolultságú szerkezet. Sínes kialakítású oldala pedig a fent említett csapágyház mozgatási lehetőségét biztosítja. Továbbá könnyen kiegészíthető új alkatrészekkel anélkül, hogy a meglevő részt meg kelljen munkálni. Az alap összeállításához 2 darab 250mm és 3 darab 100mm hosszú mkProfiltechnik2025.01aluprofilt és 6 darab B51.03.009 összekötőt szereztem be. Az így elkészült keret összeállítása látható a 6.6 ábrán. Az összekötő elemek beépítése előtt némi megmunkálást igényeltek a 100mm hosszúságú profilok. Az ezeken elhelyezett furatok láthatóak a 100-006 rajzon, a 9. mellékletben.



6.6 ábra. A keret összeállítása.

Egy alkatrész van még, amit kitaláltam ehhez az összeállításhoz. Egy paneltartó lemez, melyen helyet kap a mérőegység panelja. Meglehet, hogy illendő volna bedobozolni, de mivel demonstrációs célt szolgál, ezért úgy gondoltam maradjon látható és hozzáférhető. Ennek a lemeznek a 100-005 számú rajza megtalálható, mint 10. melléklet.

Az alkatrészek legyártása után nincs más dolgom, mint összeszerelni a mérőpadot. Az elkészült szerkezet látható a 6.7 ábrán. Az összeállítási vázlat megtalálható a 11. mellékletben.



6.7 A mérőpad összeállítása.

7. Mérési eredmények

A mérés első lépéseként felszerelem a mérőegységet a mérőpadra, majd csatlakoztatom a számítógéphez és elindítom az elemző szoftvert. Ezekután kötöm a tápegységet a villanymotorhoz. Ezzel készen állok a mérés lebonyolítására. A mérőpadról és a mérés összeállításáról a 12. mellékletben található néhány fénykép.

A grafikonok jobb felső sarkában láthatók a méréshez használt beállítások értékei, sárga betűvel megjelenítve.

7.1 Mérés nyugalomban

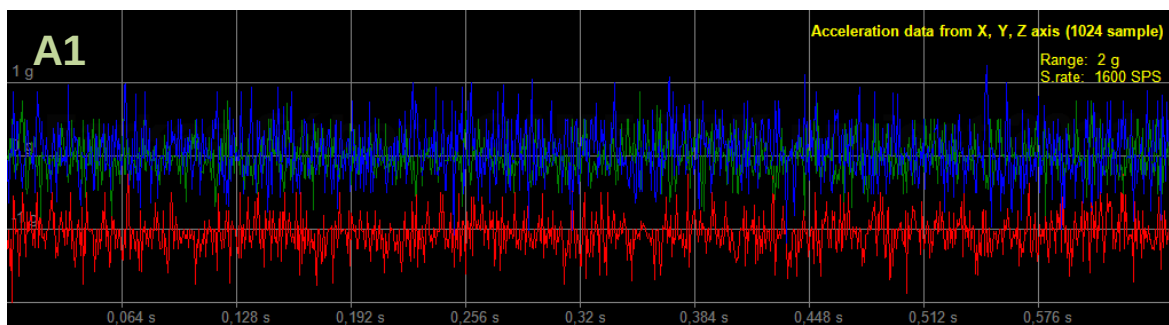
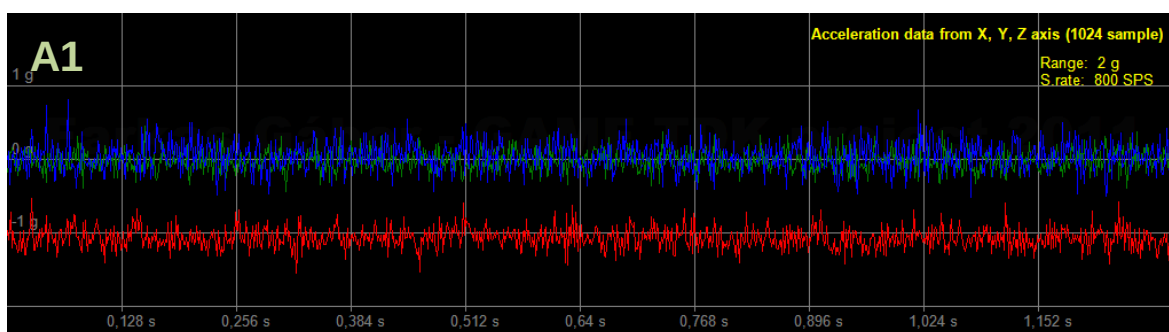
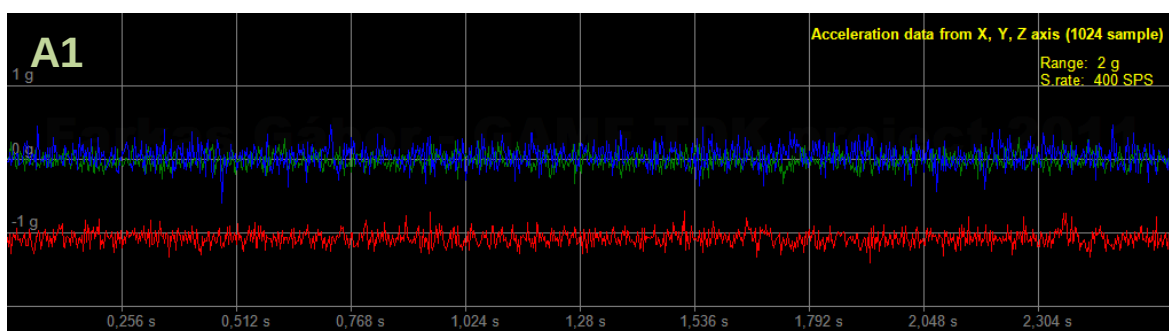
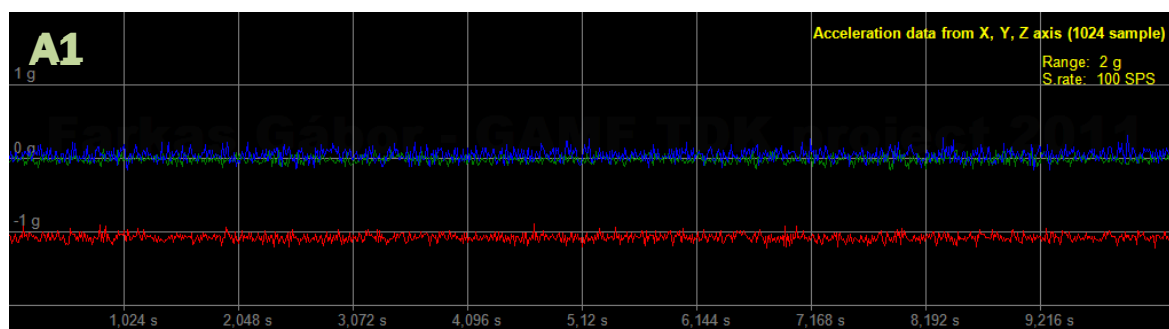
Ennél a mérésnél az érzékelő alkalmazása során felmerülő problémákra próbálok rávilágítani. Erről már szó esett az 5. fejezetben, miszerint a mintavételi sebesség növelése a pontosság rovására megy.

Körülmények:

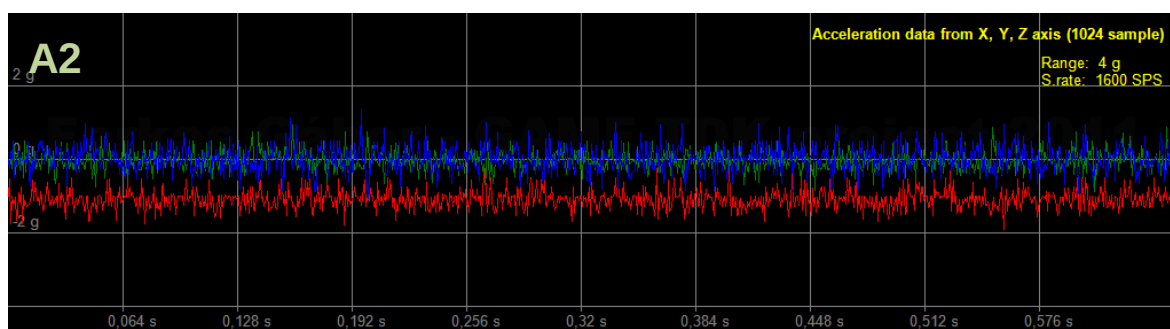
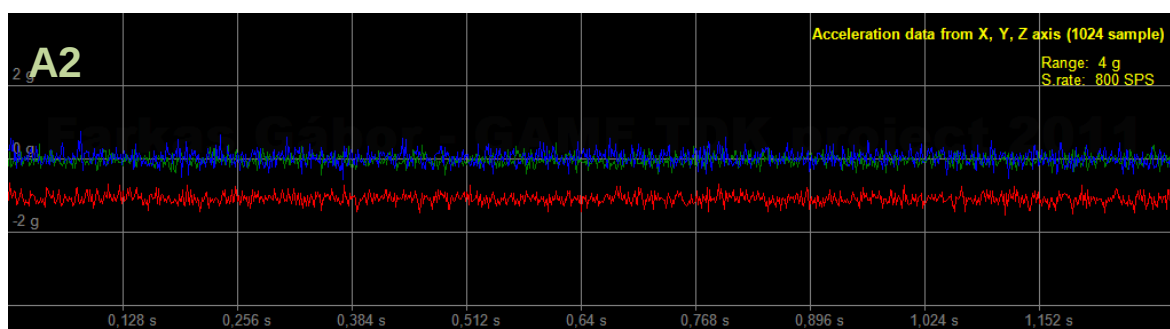
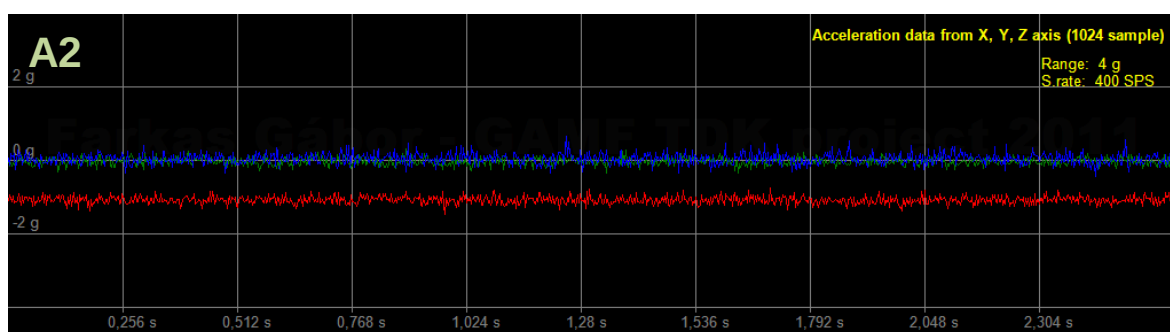
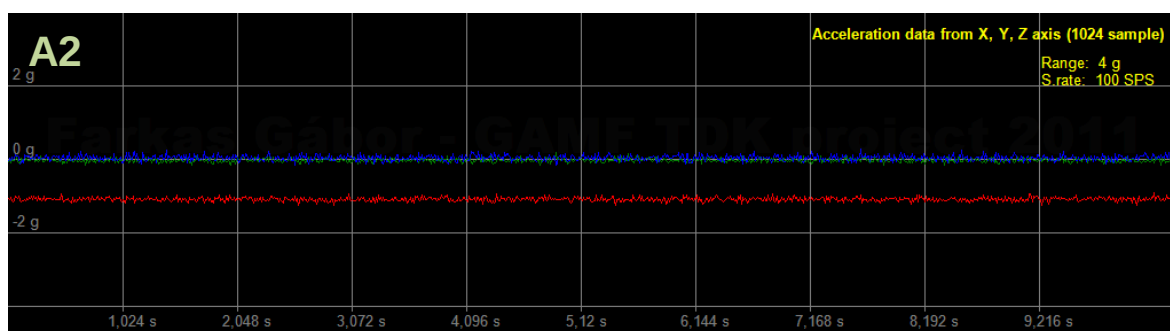
- | | |
|-------------------------|---|
| • Üzem mód: | Álló tengely |
| • Méréshatár: | Változó (+/-2g; +/-4g; +/-8g; +/-16g) |
| • Mintavételi sebesség: | Változó (100SPS; 400SPS; 800SPS; 1600SPS) |
| • Fordulatszám: | 0 s ⁻¹ |

Feltételezés:

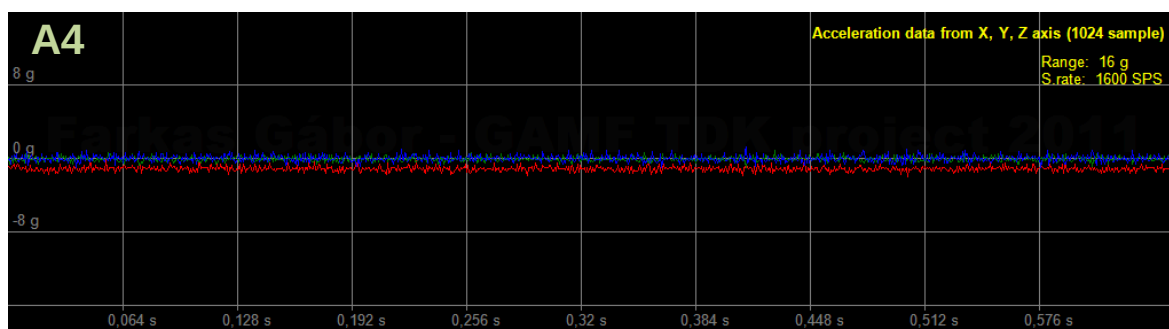
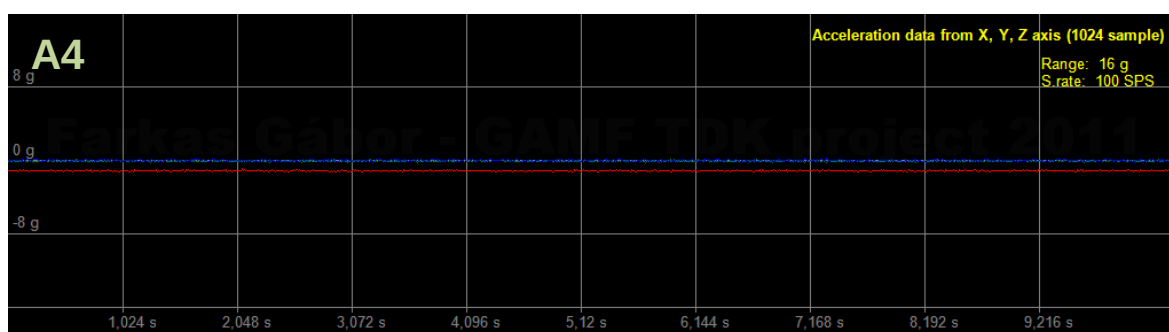
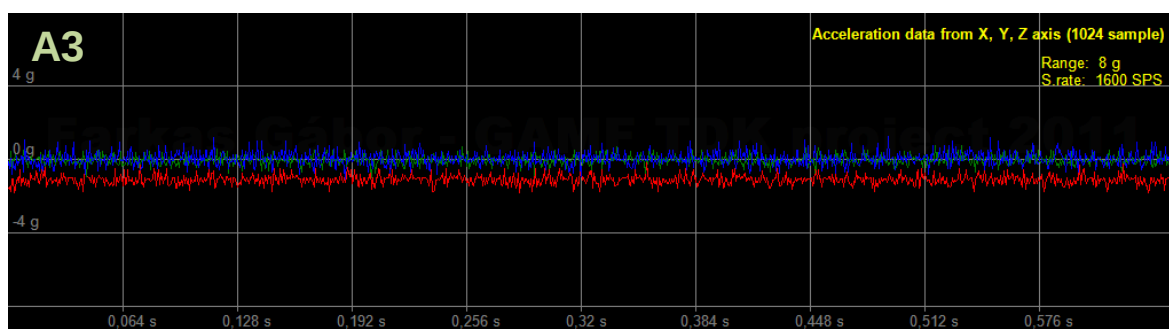
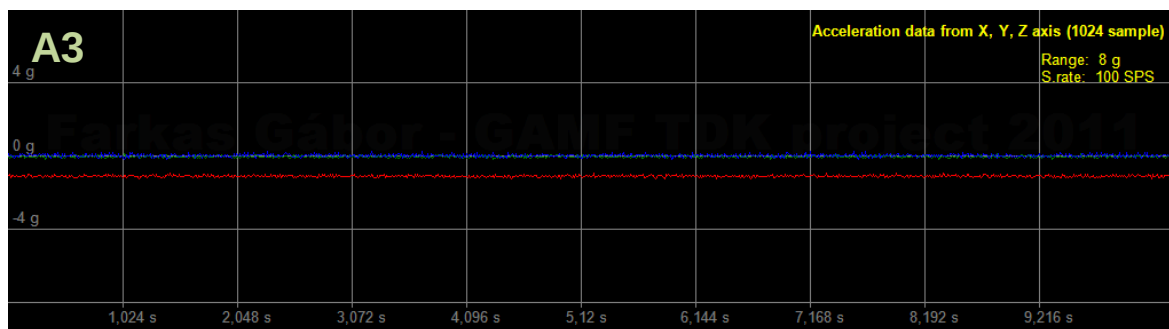
Feltételezem, hogy állandó méréshatár mellett, a mintavételezési sebesség növelésével együtt növekedni fog a zaj. Ezt minden méréshatár mellett megismétlem. Remélhetőleg a zaj, amit tapasztalni fogok, abszolút zaj, mert akkor a méréshatár növelésével csökkenthető az intervallumhoz képest mért aránya, vagyis a relatív zaj.

Mérési eredmény:

Ugyanezt a négy mérést megismétlem +/-4g mérés határral:



Tovább folytatom a mérést, de a +/-8g és +/-16g mérés határnál, már csak a két szélső esetet vizsgálom:



Következtetés:

Feltevésém beigazolódt. Jól látható, főleg a +/-2g méréshatár esetén, hogy a mintavételi sebesség növelésével a valósághoz képest egyre nagyobb eltérést mutatnak az adatok. Minél jobban bővítjük a méréshatárt, a zaj annál kevésbé meghatározó.

Minél nagyobb mintavételi sebességgel dolgozunk, annál szélesebb spektrumot tudunk alkotni, vagyis annál több helyen alkalmazható az érzékelő. Viszont a fentiek szerint a nagy mintavételi sebességhez nagyobb méréshatárt kell választani. Ezzel nem minden esetben élhetünk, mivel a vizsgált szerkezetek más-más amplitúdójú rezgéseket hoznak létre.

Viszont választhatunk olyan MEMS érzékelőt, mely változtatható méréshatárral rendelkezik, ezáltal a méréshez igazíthatjuk az érzékelő paramétereit. Hasonlóan, mintha éppen egy oszcilloszkóppal mérnénk és úgy állítanánk az osztásokat, hogy a mért jel kitöltse a rendelkezésre álló képernyőt. Így kapjuk a legjobban látható, értelmezhető képet.

7.2 Mérés normál üzemben

Ennél a szituációnál egy „jól működő” szerkezeten végzek mérést. Ideális esetben a mérőpad nem hoz létre rezgéseket. A valóságban valamennyi vibrálás mindenképpen fog keletkezni, kérdés, hogy mennyire közelíti meg az ideális állapotot.

Körülmények:

- Üzem mód: Forgó tengely
- Méréshatár: Változó (+/-2g; +/-4g; +/-8g; +/-16g)
- Mintavételi sebesség: Változó (100SPS; 400SPS; 800SPS; 1600SPS)
- Fordulatszám: 40 s^{-1}

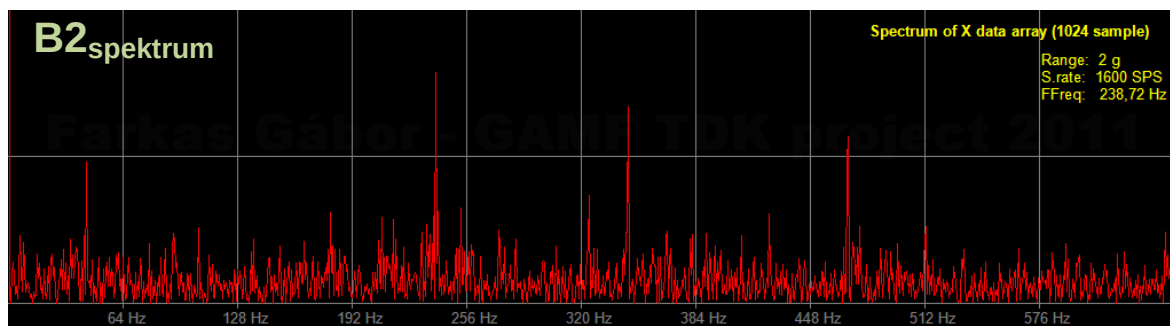
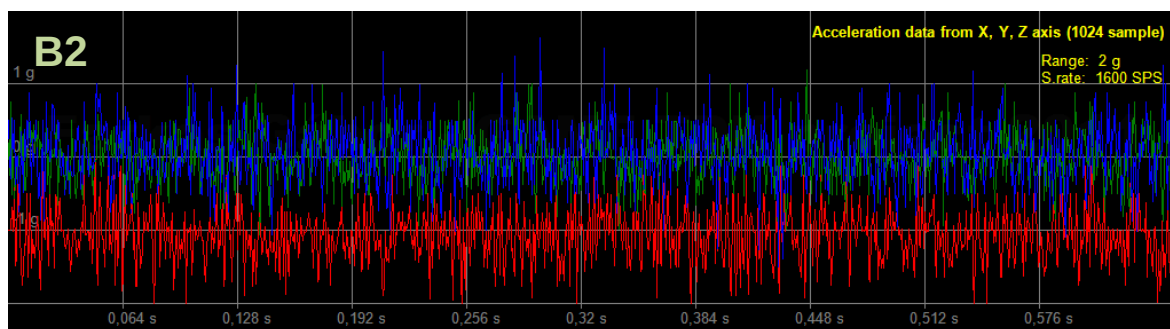
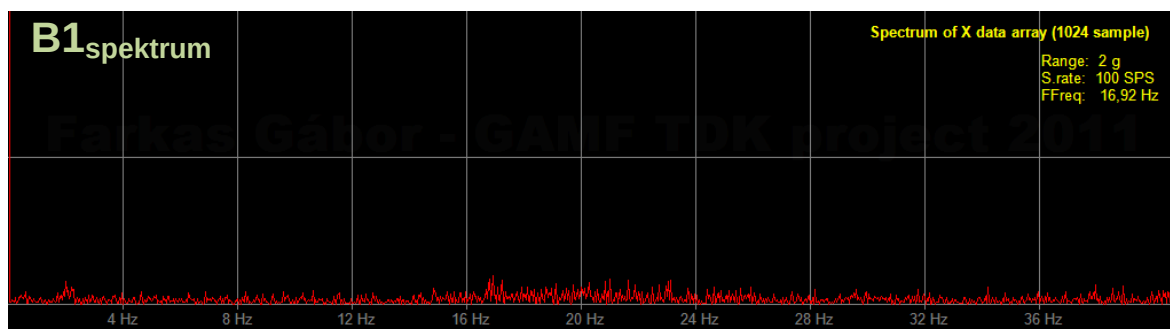
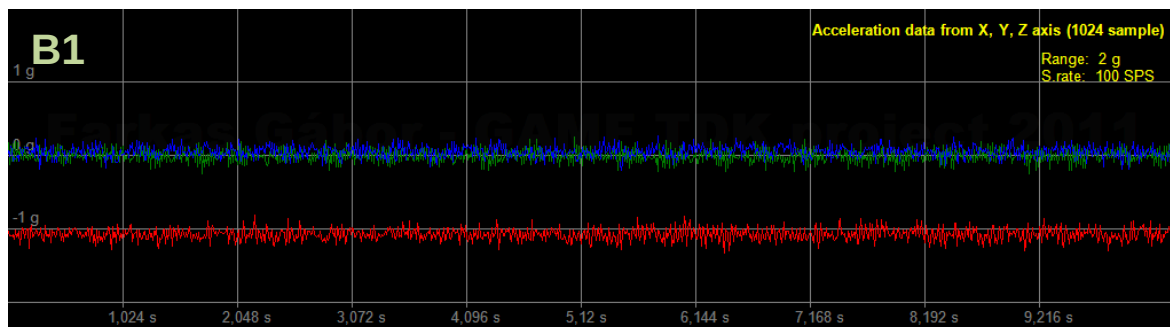
Feltételezés:

Ideális esetben elhanyagoljuk a súrlódást, és tökéletesen szimmetrikus geometriájúnak képzeljük a mérőpadot felépítő alkatrészeket, akkor a mérés eredményeképp azt kellene látnom, mint az 7.1 mérésnél. Vagyis nem történne semmi, nem jönne létre rezgés. A valóságban viszont a jól kivitelezett szerkezet sem tökéletes, ami a szerkezet valamilyen jellegű vibrációját okozza üzem közben. Mivel alapesetben a mérőpad „jól működő” szerkezetként dolgozik, az általa létrehozott rezgések spektrumában nem számítok szignifikáns kiugró frekvenciakomponensre.

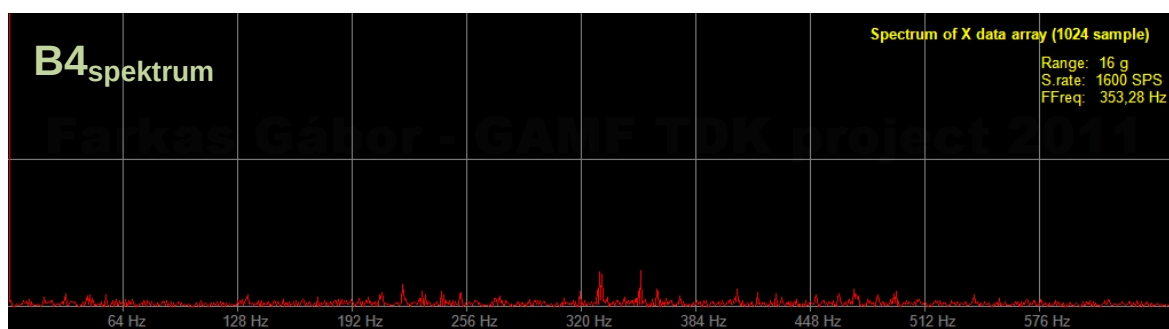
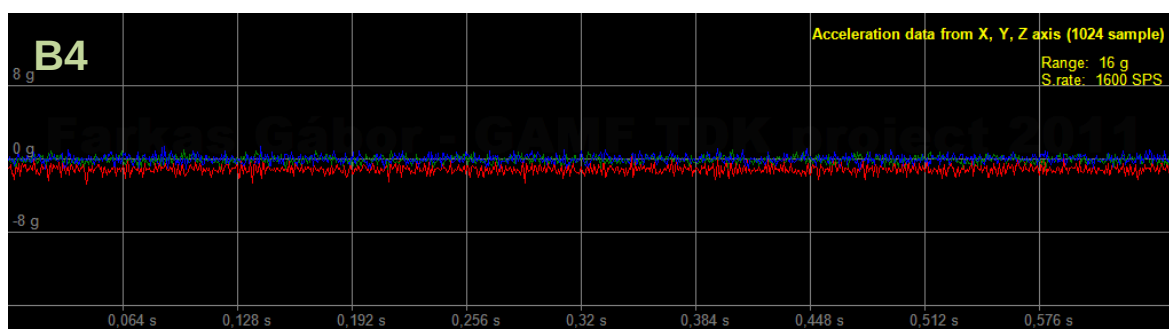
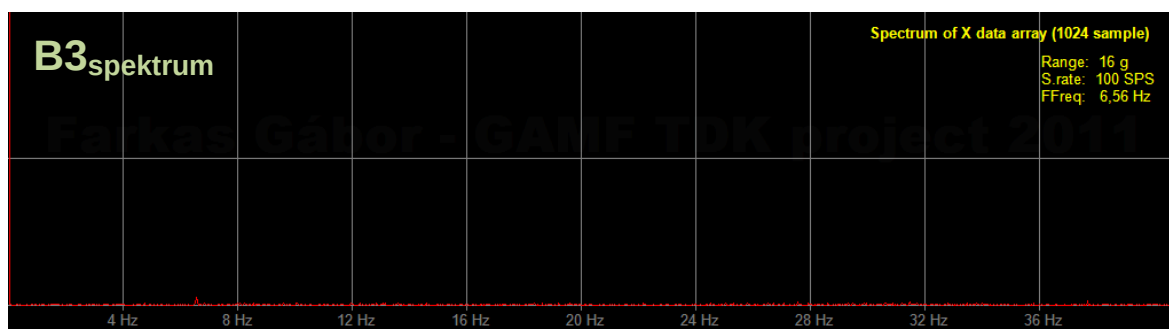
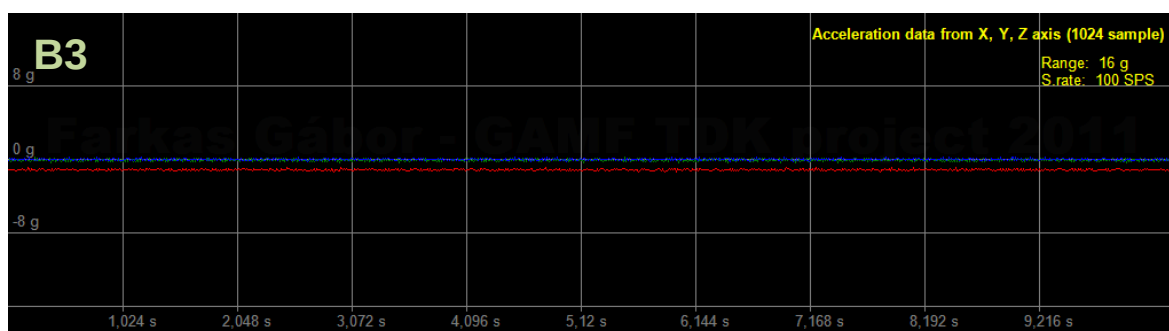
Mérési eredmény:

A méréseket csak szélső esetekre készítem, vagyis $\pm 2g$ esetén 100SPS és 1600SPS mintavétellel. Ugyanezt teszem $\pm 16g$ méréshatár mellett.

$\pm 2g$ méréshatárral:



Ugyanez a mérés +/-16g méréshatárral:



Következtetés:

Az előzetes elképzelés szerint alakult a mérés. Alapzajnak tekinthető összetevők vannak a spektrumban, de nincs számottevő kiugrás.

Mivel a spektrumalkotáshoz használt minták száma alacsonynak mondható, ezért nagyfrekvenciás komponensek nem láthatóak. Jellemzően hiba esetén a fordulatszámmal arányos komponens is megjelenik, amely jelen esetben 40Hz körül lenne.

7.3 Excentrikus forgórész mérése

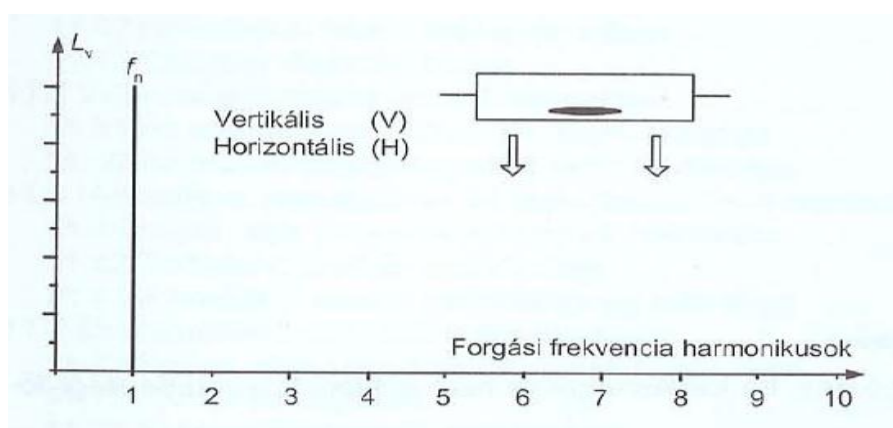
Elérkeztünk a mérés legizgalmasabb részéhez. Itt kerül összehasonlításra a Rezgésdiagnosztika című könyvben található elméleti spektrum, és a mérőpadon létrehozott mérési eredmény.

Körülmények:

- Üzem mód: Forgó tengely, excentrikusságot okozó súllyal
- Méréshatár: Változó (+/-2g; +/-4g; +/-8g; +/-16g)
- Mintavételi sebesség: Változó (100SPS; 400SPS; 800SPS; 1600SPS)
- Fordulatszám: 40 s^{-1}

Feltételezés:

Remélhetőleg a mérés végeztével olyan spektrumot kapok, mely jó közelítéssel megegyezik a Rezgésdiagnosztika könyvben [1] található, statikusan excentrikus tengely által alkotott elméleti spektrummal. Ez látható a 7.1 ábrán.

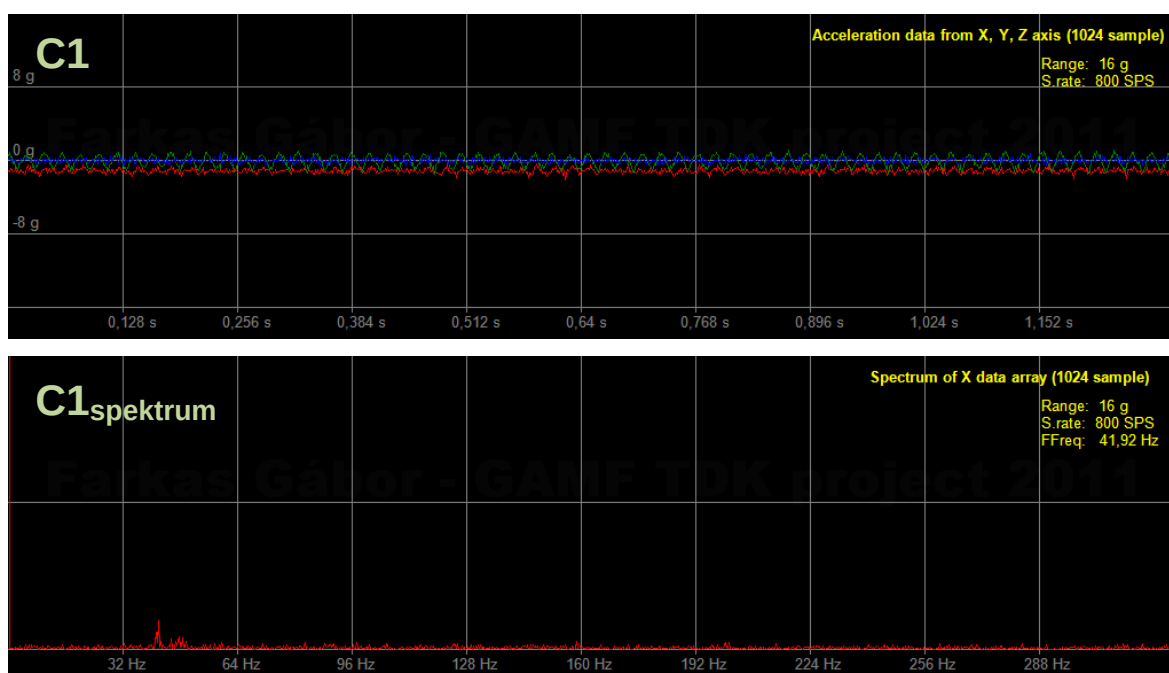


7.1 ábra. Statikusan kiegyensúlyozatlan forgórész elvi spektruma [1].

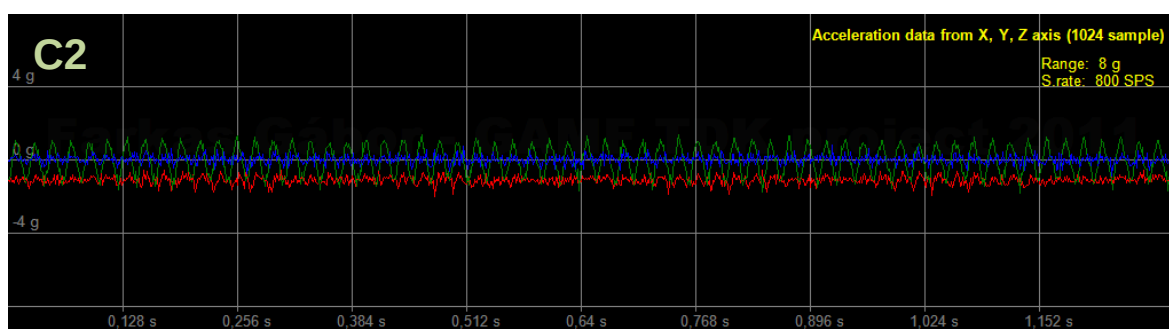
Továbbá finomítani kell a mérést, vagyis meg kell találni a 7.1 fejezetnél már említett ideális méréshatár és mintavételi sebesség beállítást. Amennyiben ez sikerül, bizonyosságot nyer, hogy az ADXL345 alkalmas adott körülmények között rezgésdiagnosztikai berendezés érzékelőjeként üzemelni.

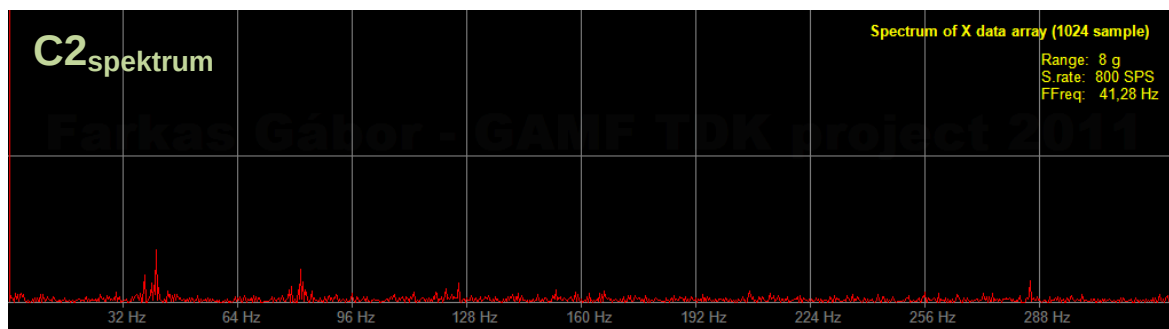
Mérés menete és eredménye:

1. Legnagyobb méréshatárral és közepes mintavételi sebességgel kezdem a mérést szemben az előzőekkel:

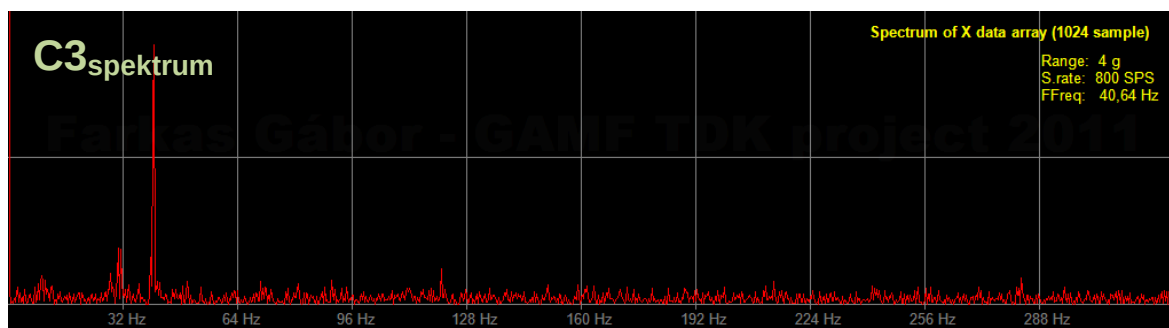
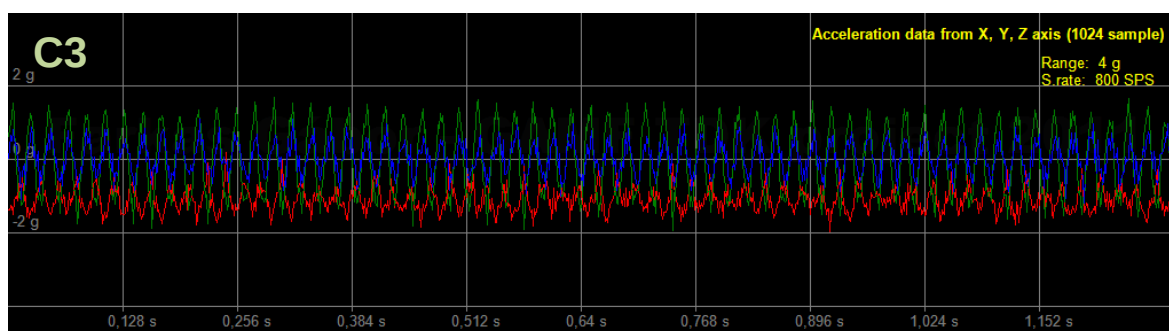


2. Láthatóak a spektrumban megjelenő komponensek, de meglehetősen kicsik. Csökkentem a méréshatárt:

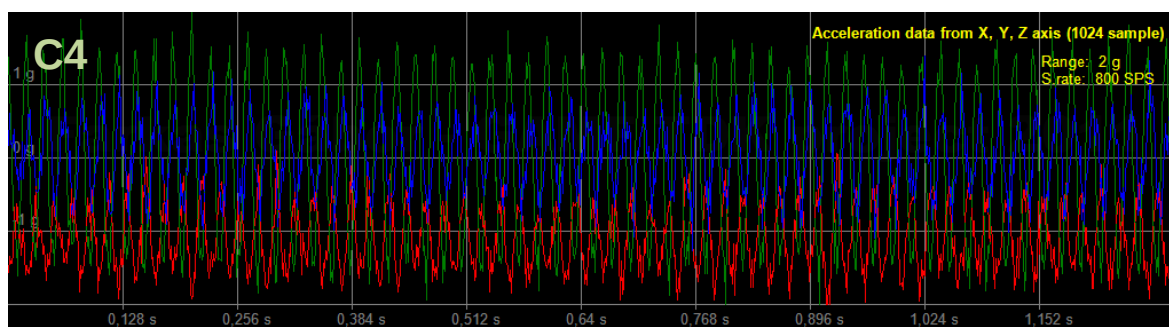


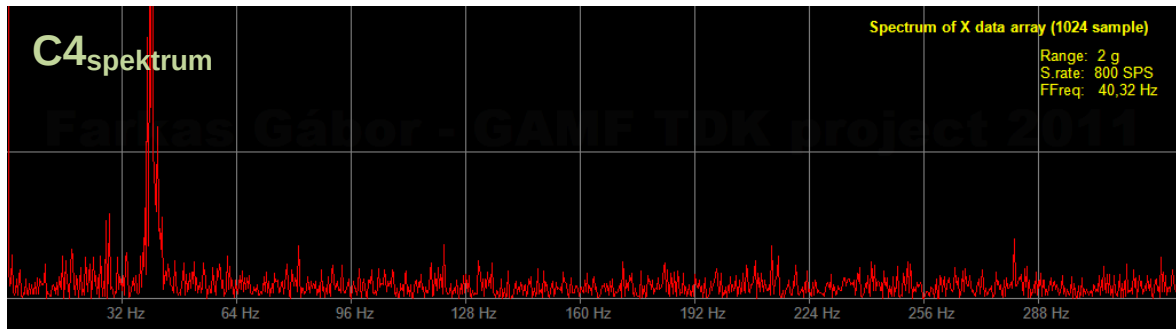


3. Szépen alakul a spektrum. Megmérem még alacsonyabb méréshatár mellett, hogy milyen spektrum képződik. Töreksem arra, hogy minél jobban kitöltse a „képernyőt”:

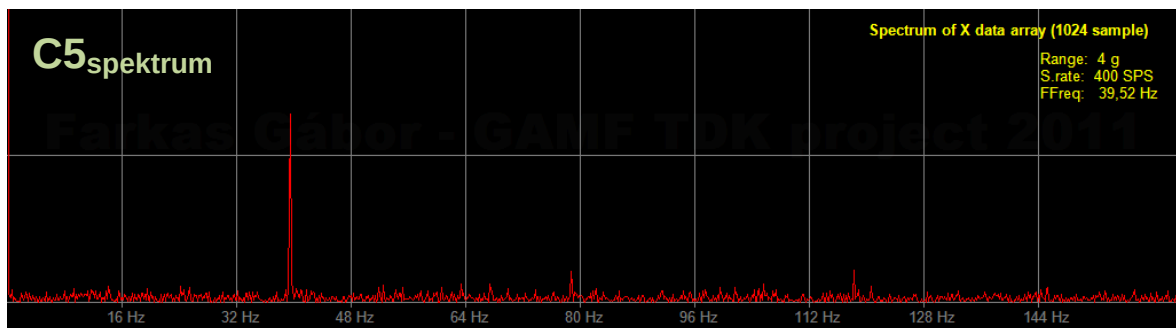
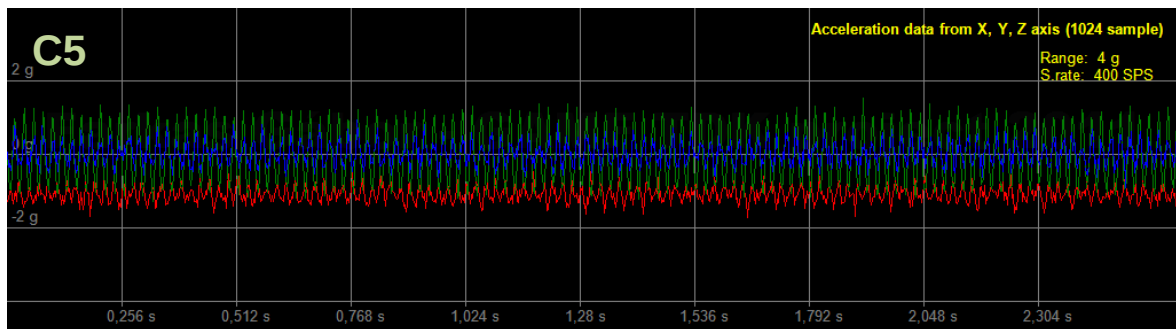


4. Valószínűleg megtaláltam a megfelelő méréshatárt, de ennek ellenére elvégzem a mérést a legkisebb méréshatárral is:





5. Valóban, a +/-4g méréshatár lesz a megfelelő számomra. Az említett méréshatár mellett változtatva a mintavételi sebességet végzem a mérést. Leveszem a mintavételt 800SPS-re:



6. Mivel kisebb mintavételi sebességgel mértem, ezért csökkent a zaj, és valamelyest „szebb” lett a spektrum. Mivel szeretném, hogy minél több felharmonikusa legyen látható az alapfrekvenciának, ezért nem csökkentem tovább a mintavételi sebességet. A korábban már említett módon a nagyobb frekvenciájú komponensek kitolódnak, ha csökkentem a mintavételi sebességet. Jelen összeállításhoz a legvégül kapott spektrum megfelelő eredménnyel szolgál.

Következtetés:

A feltételezés beigazolódott, miszerint a Rezgésdiagnosztikai könyvben említett spektrumot kaptam a mérésem végén.

Továbbá fontossá vált, hogy az érzékelő méréshatára változtatható legyen a mérés pontosítása érdekében. Természetesen számos érzékelőt lehet kapni más-más mérési határral és ADC-vel. Az ADXL345 a legolcsóbb és a legkisebb mintavételi sebességgel bíró típusok közé tartozik.

7.4 Végző megállapítás:

Adott körülmények közt alkalmasnak bizonyult az ADXL345 típusú érzékelő rezgésdiagnosztikai vizsgálatához történő felhasználásra. Ezt bizonyítja, hogy megközelítőleg a várt elméleti spektrumot kaptam a mérés során.

Fény derült arra, hogy üzem közben a vizsgált szerkezet más-más alaphékvenciájú és amplitúdójú rezgéseket generálhat. A nagy intervallumon változó értékek megkívánják, hogy a precíz mérés érdekében a mintavételi sebesség és a méréshatár változzon. Ilyen szempontból a MEMS érzékelővel könnyedén megoldható ez a feladat, mivel üzem közben bármikor változtathatóak az előbb említett paraméterei.

Későbbiekben tervezem egy automatikus méréshatár és mintavétel állításra alkalmas algoritmus implementálását a mérőegységbe. Továbbá tervezem a mérőpad kiegészítését egy fordulatszám szabályzó áramkörrel, melyet az elemző szoftver tud irányítani. Ezzel lehetőség nyílna számos fordulatszám mellett történő spektrumalkotásra, melyből végül az elemző szoftver egy térbeli függvényt rajzolna. Ezzel már jól jellemezhető a vizsgált szerkezet, az általa keltett rezgések szempontjából.

Végül szükségesnek érzem, hogy egy gyakorlati alkalmazásban is elhelyezzem a tanulmány alatt készült berendezést, ezért a következő fejezetben egy lehetséges gyakorlati alkalmazást írok le dióhéjban.

8. Gyakorlati alkalmazhatóság

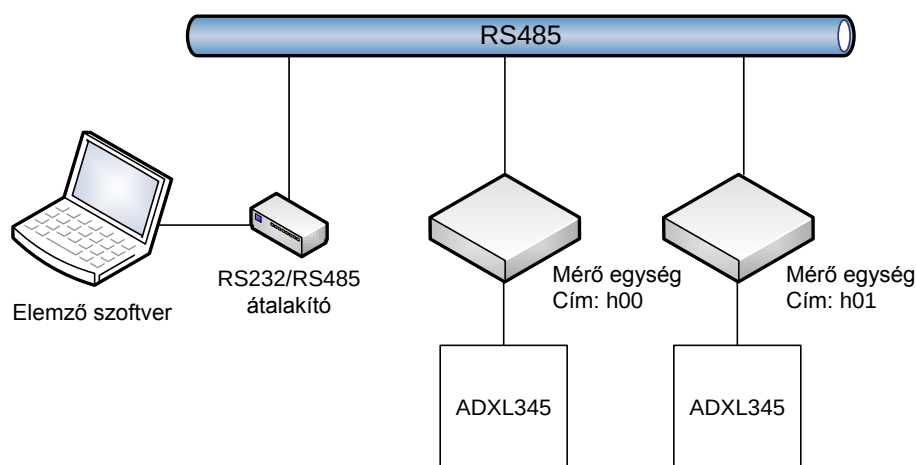
8.1 Lehetséges rendszer felépítése

A rendszert ki lehet úgy alakítani, hogy egy, de akár több száz mérőegység is alkalmazható legyen egyetlen megfigyelő rendszerben. Vagyis egy elemző berendezéshez változó számú mérőegység legyen köthető és ez későbbi géppark bővítés esetén módosítható legyen.

A DFT algoritmus mérőegységben történő futtatása esetén az elemzőnek jelentősen kevesebb számítási kapacitással kell rendelkeznie és a mérőegységek száma nem befolyásolja jelentősen az ilyen irányú igényt. Ez elősegíti a rendszer univerzális alkalmazhatóságát.

Ebben a példában az RS485 protokoll lett kiválasztva, de tekintettel a nagyon kis sávszélesség igényre szinte bármely az iparban elterjedt más kommunikációs szabvány is használható. Természetesen a használni kívánt szabvány kiválasztásánál a környezeti tényezőket figyelembe kell venni és a mérőegység kivitelét is ennek megfelelően kell módosítani (például robbanásveszélyes közeg, savas-lúgos környezet, magas hőmérséklet, stb.).

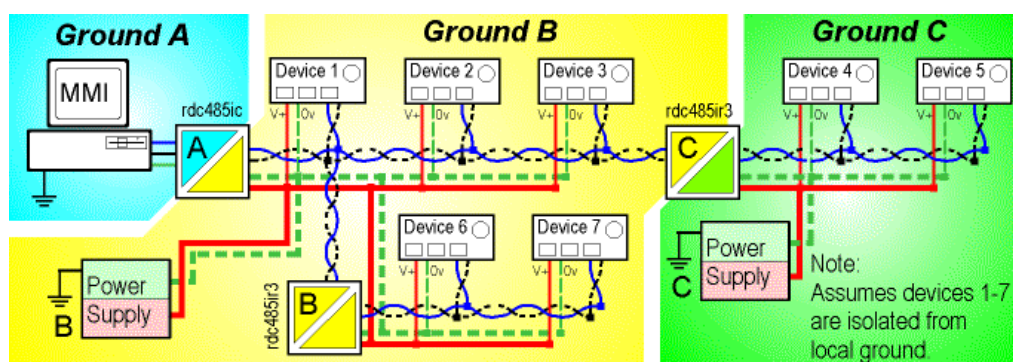
Az RS485 szabvány szerint maximum 32 eszköz köthető egy vezérlőhöz, melyek sorosan vannak kapcsolva egymás után. Az elemző jelen esetben egy x86 architektúrájú számítógép, Microsoft Windows operációs rendszerrel és az elemző szoftverrel. Az elemző szerepét betöltheti más architektúrájú eszköz is, mely elégséges számítási teljesítménnyel rendelkezik az elemző szoftver futtatásához. A mérőegységek (slave) és az RS232-RS485 átalakító közt az RS485 szabványnak megfelelően csavart érpárú vezetéken történik a kommunikáció. Minden mérőegységnek saját címe van, mely üzembehelyezéskor kézzel állítandó be. Az RS485 vezérlő (master) szerepét az elemző szoftver tölti be az RS232-RS485 átalakítón keresztül. A rendszerben található egységek összeköttetését a 7.1 ábra szemlélteti.



8.1. ábra. A rendszer sematikus összekötése.

A gyorsulásérzékelők fizikailag külön helyezkednek el a mérőegységektől, hogy az érzékelőn kívül a rendszer többi része ne legyen kitéve felesleges rázkódásnak. Megbízhatóság-csökkenést jelentene, ha a teljes mérőberendezés az érzékelővel egybeépítve a mért eszközhöz lenne rögzítve, továbbá befolyásolhatja a mérés eredményét az érzékelő ilyen módon okozott súlyfeleslege.

Fontos szem előtt tartani, hogy a rendszer létesítésekor fel kell mérni az egységek közti izoláció szükségességét. Erre kidolgozott megoldások állnak rendelkezésre. Az alábbi 8.2 ábra szemléltet egy ilyen kivitelezési megoldást.



8.2 ábra. Az RS485 kommunikáció egy lehetséges kivitelezése [5].

(Powersupply = Tápegység; Ground = Földpont; Device = Eszköz)

Továbbá figyelni kell az árnyékolásra és földelés megfelelő kialakítására. Az adott környezet ezt is nagyban befolyásolja.

Összegzés

Rezgésdiagnosztikai berendezések tanulmányozása során nem találkoztam olyan rendszerrel, mely MEMS gyorsulásérzékelőt használna a rezgések mérésére. Ezért határoztam el, hogy elkészítem egy olyan rezgésdiagnosztikai eszköz prototípusát, mely a címben szereplő érzékelőre épül.

A dolgozat elején vázolt célkitűzések a következő sorrendben valósultak meg. A kezdeti elképzelések után sor került a szükséges eszközök és alkatrészek beszerzésére és előkészítésére. Elkészült a mérőegység, mely az érzékelőből kiolvasott adatokat továbbítja a számítógép felé. Ezután megírtam az elemző szoftvert, mely a mért adatok ábrázolására és spektrumalkotásra alkalmas. Végül a mérések elvégzéséhez szükséges mérőpadot is megterveztem és elkészítettem. Ezen részek összessége kellett ahhoz, hogy a kísérletet el tudjam végezni.

Bár a lehetőségek korlátozottak voltak, mégis sikerült egy kezdetleges rezgéselemző rendszert létrehozni, mely egy korszerű érzékelőn alapul. A mérőpadon végzett mérések egy része összehasonlításra került más irodalomban megjelent grafikonokkal. A mérések során megállapíthattam az adott MEMS gyorsulásérzékelő lehetőségeit, korlátait. Bizonyosságot nyert, hogy az adott körülmények között, a tárgyalt érzékelő típus alkalmas rezgésdiagnosztikai mérésekre. Továbbá világossá vált, hogy a méréshatár helyes megválasztása neuralgikus pontja a rendszernek. Más érzékelőkkel szemben, a MEMS érzékelő lehetőséget nyújt az üzem közben történő méréshatár változtatáshoz.

Feltételezem, hogy a MEMS érzékelők a rezgésdiagnosztikában is utat törnek majd maguknak, mint ahogy sok más területen is ez figyelhető meg.

Továbbfejlesztési lehetőségként tervezem egy olyan mérőegység kivitelezését, mely - a dolgozatban korábban említett módon - tartalmazza a DFT algoritmust. Ezen túlmenően a mérőegység és az elemző közötti kommunikációhoz vezeték nélküli kapcsolatot alkalmaznék. Ezzel is könnyítve a megfigyelő rendszer kiépítését. Végül kísérletet tennék a mérőegység működéséhez szükséges energiának a vibráló szerkezet mozgásából történő kinyerésére és ezzel egy egészen újszerű, kompakt rezgésdiagnosztikai rendszer létrehozására.

Köszönetnyilvánítás

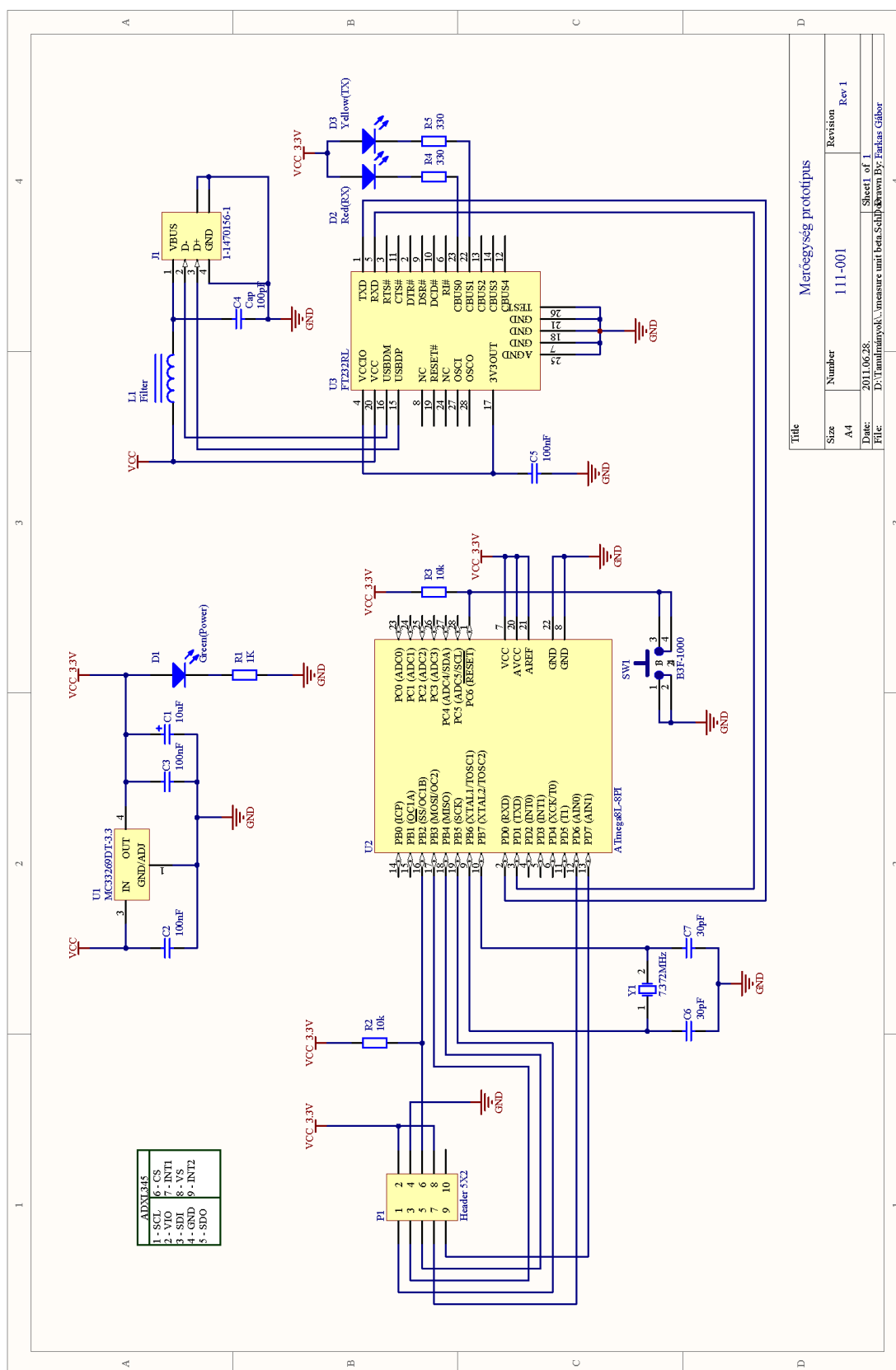
Szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik hozzájárultak a dolgozatom elkészültéhez. Elsősorban szüleimnek, hogy mindvégig támogattak a munkámban. Témavezetőmnek, Csík Norbertnek szeretném megköszönni, hogy tanácsokkal, szakirodalommal, adatokkal volt mindvégig segítségemre. Végül, de nem utolsó sorban köszönetet szeretnék mondani Kósa Lajosnak a mérőpad kivitelezéséhez nyújtott segítségéért.

Irodalomjegyzék

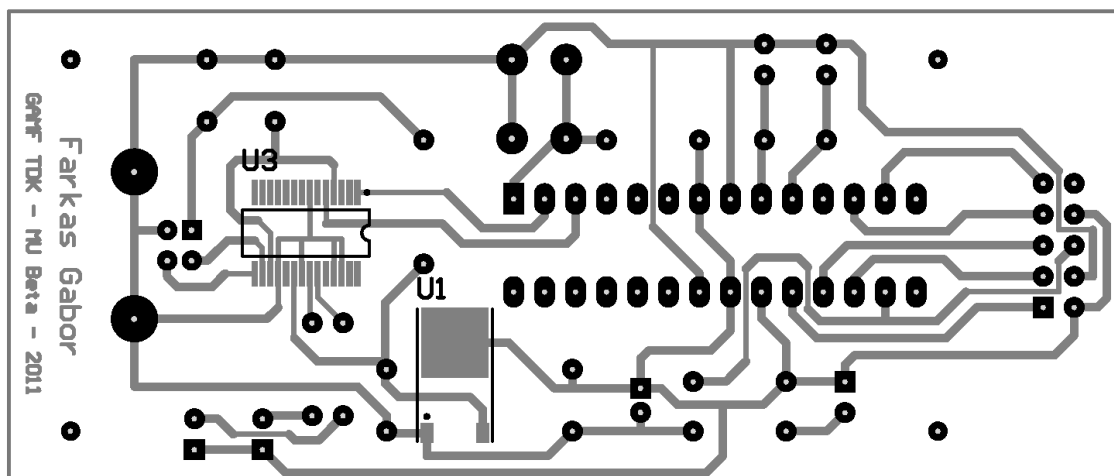
- [1] Dr. Dömötör Ferenc: Rezgésdiagnosztika. Főiskolai kiadó, Dunaújváros, 2008.
- [2] Maurice L. Adams, Jr.: Rotating Machinery Vibration, 2000.
- [3] <http://www.muszakiak.hu/tudastar/diagnosztika-anyagvizsgalat/rezgesdiagnosztika>
- [4] http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL345.pdf
- [5] <http://www.robustdc.com/application-notes/rs-485-with-a-power-bus-over-a-4-wire-cable/>

Mellékletek

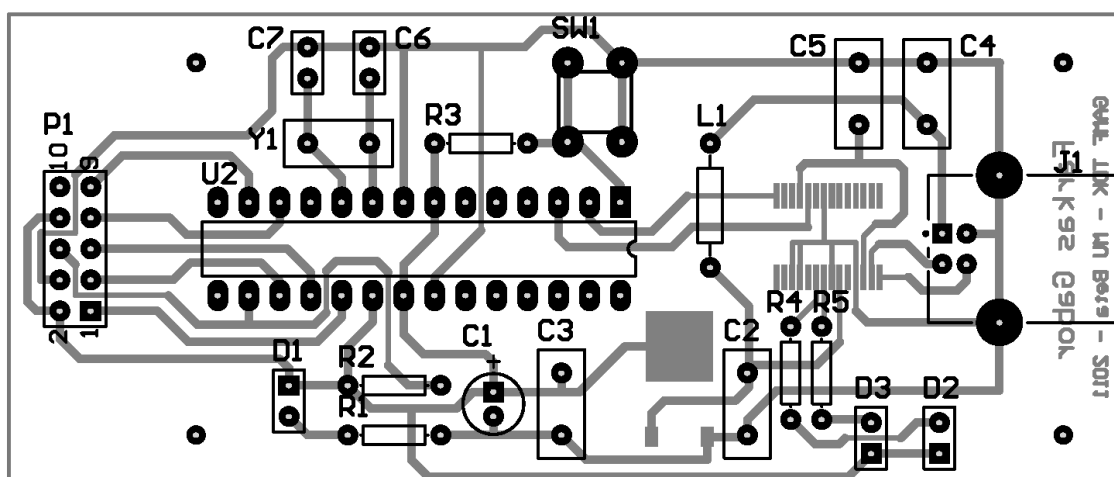
1. melléklet. A mérőegység kapcsolási rajza.



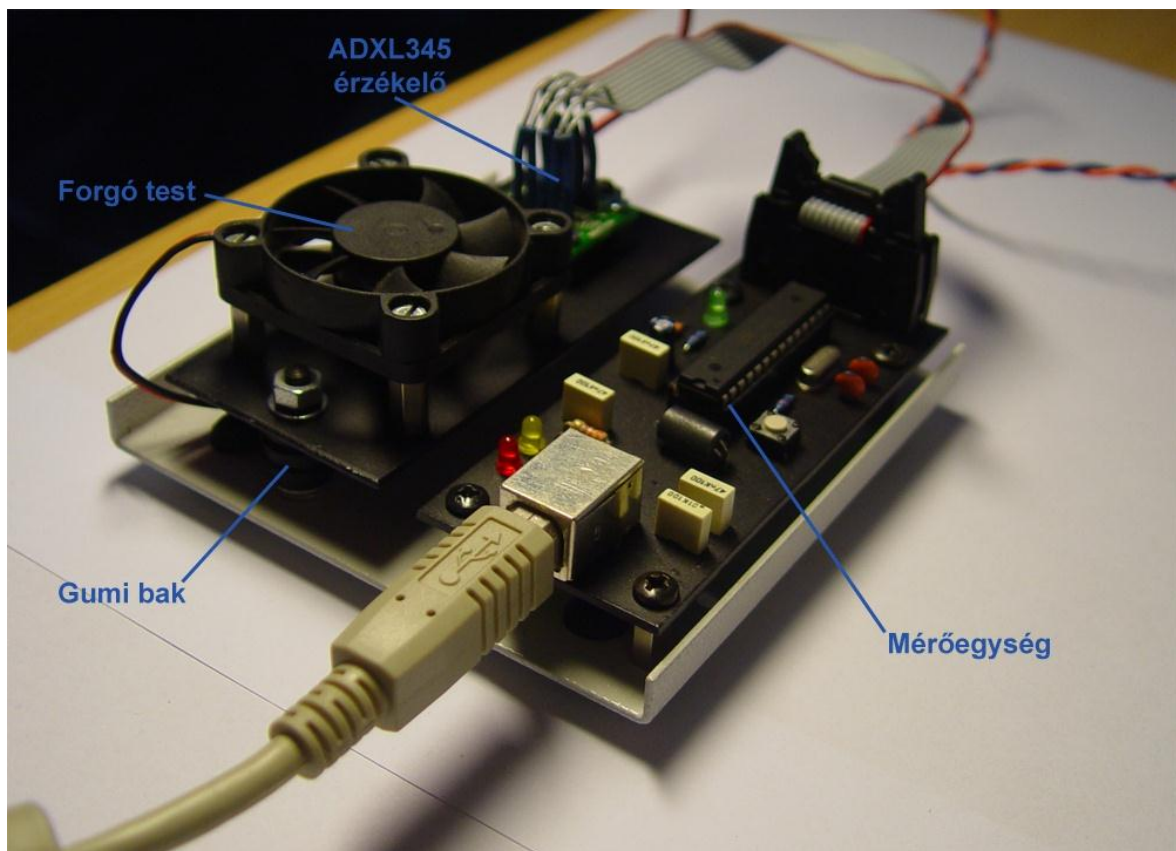
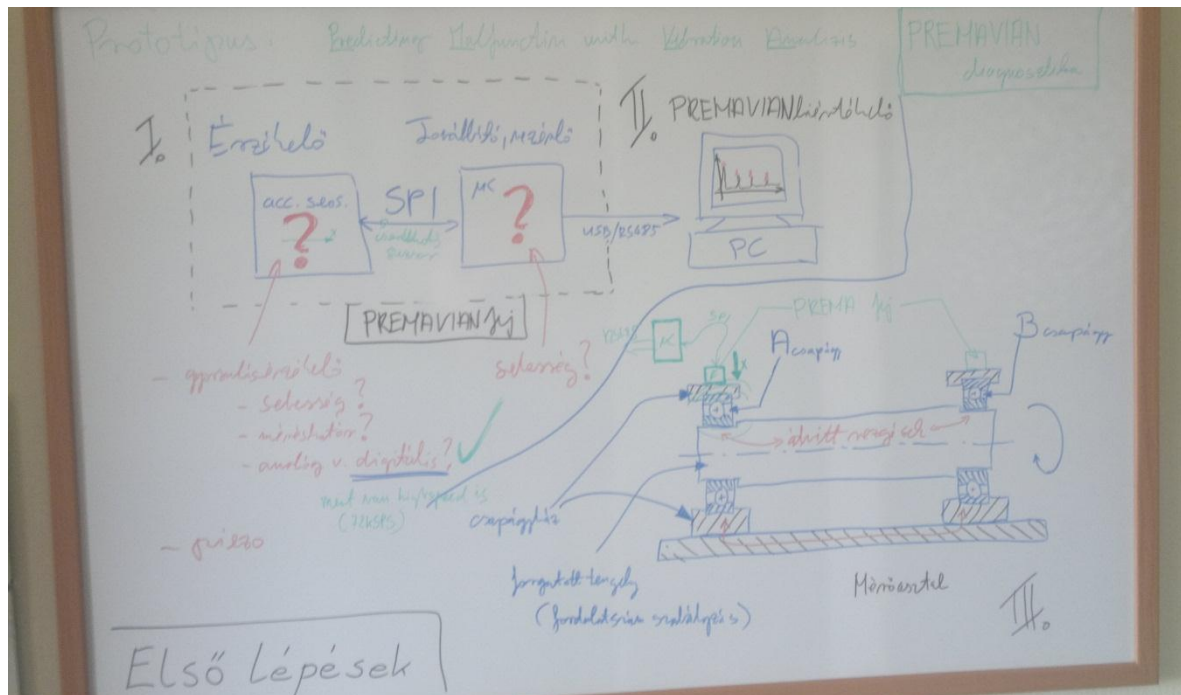
2. melléklet. A mérőegység beültetési rajza (Bottom layer).



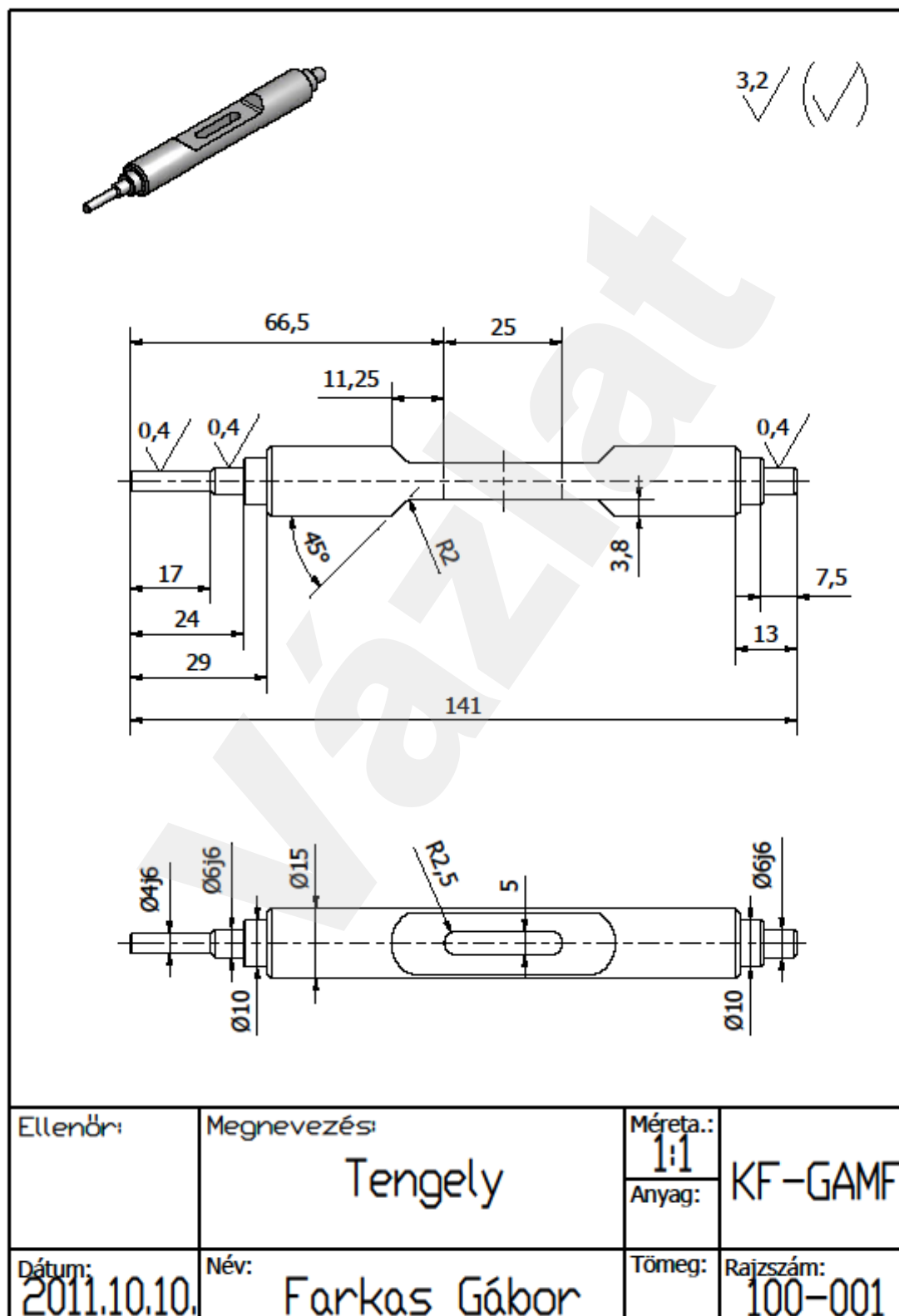
3. melléklet. A mérőegység beültetési rajza (Top layer).



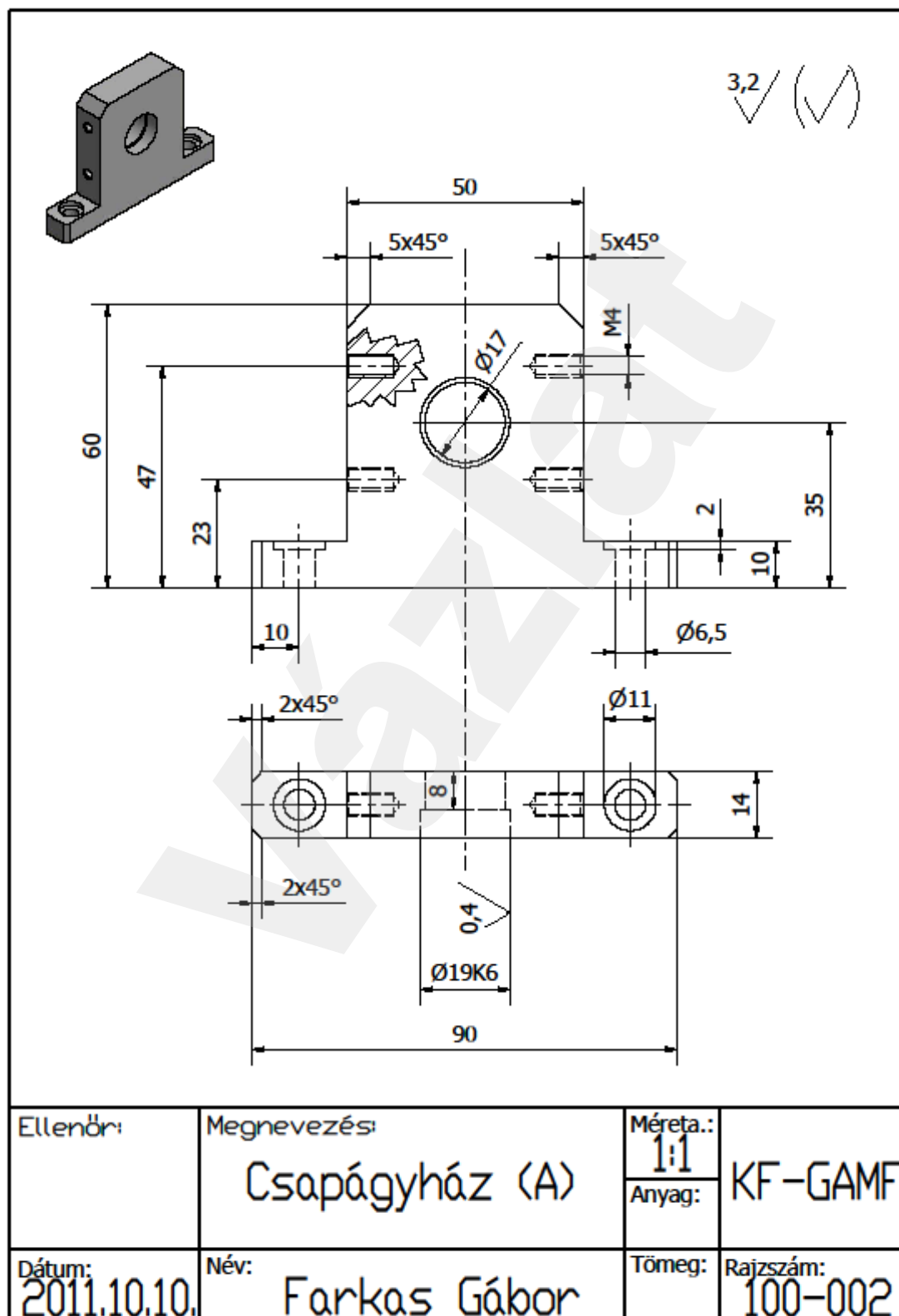
4. melléklet. Az első vázlatok, majd a megvalósulás első lépése.



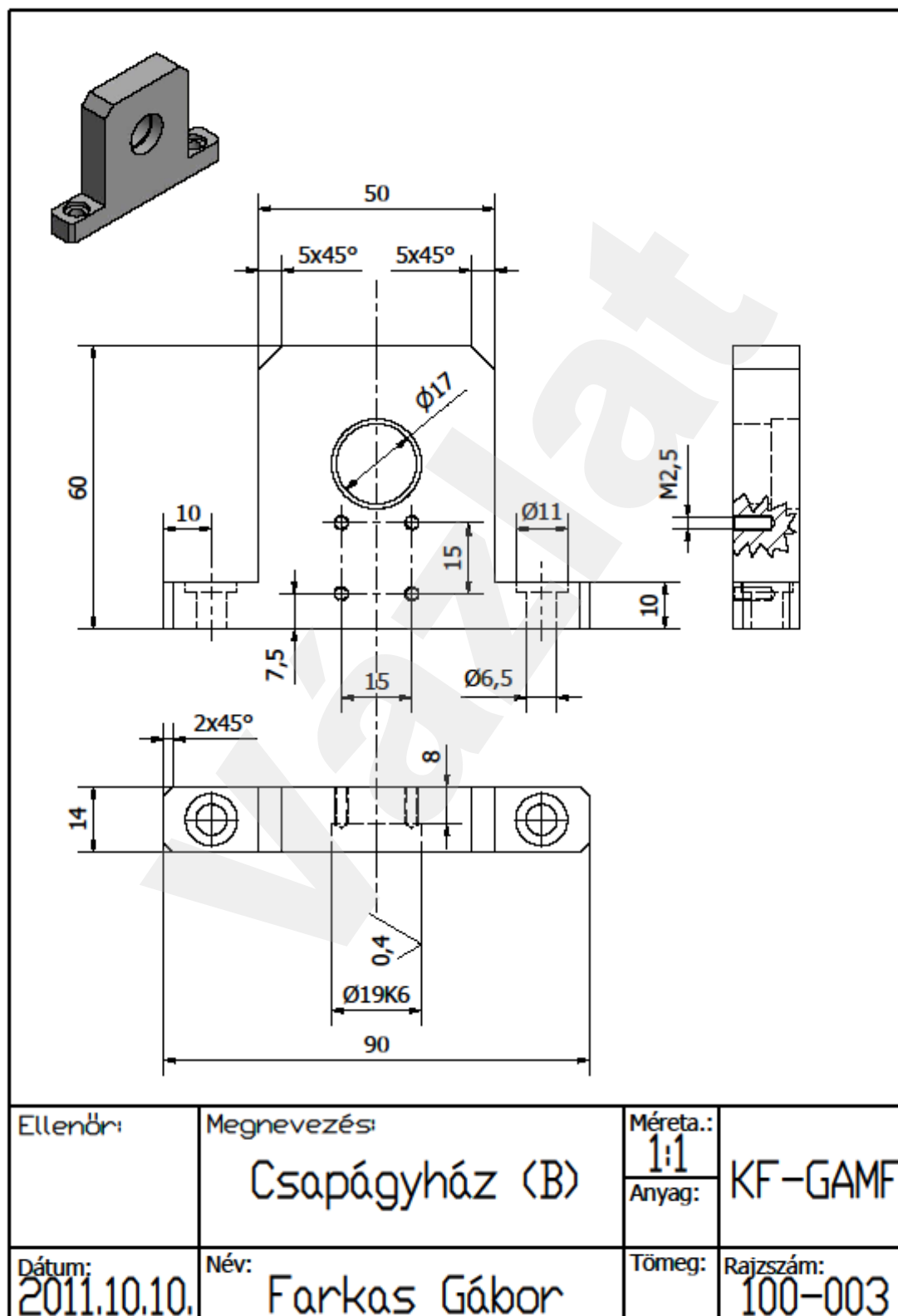
5. melléklet. A tengely műhelyrajza.



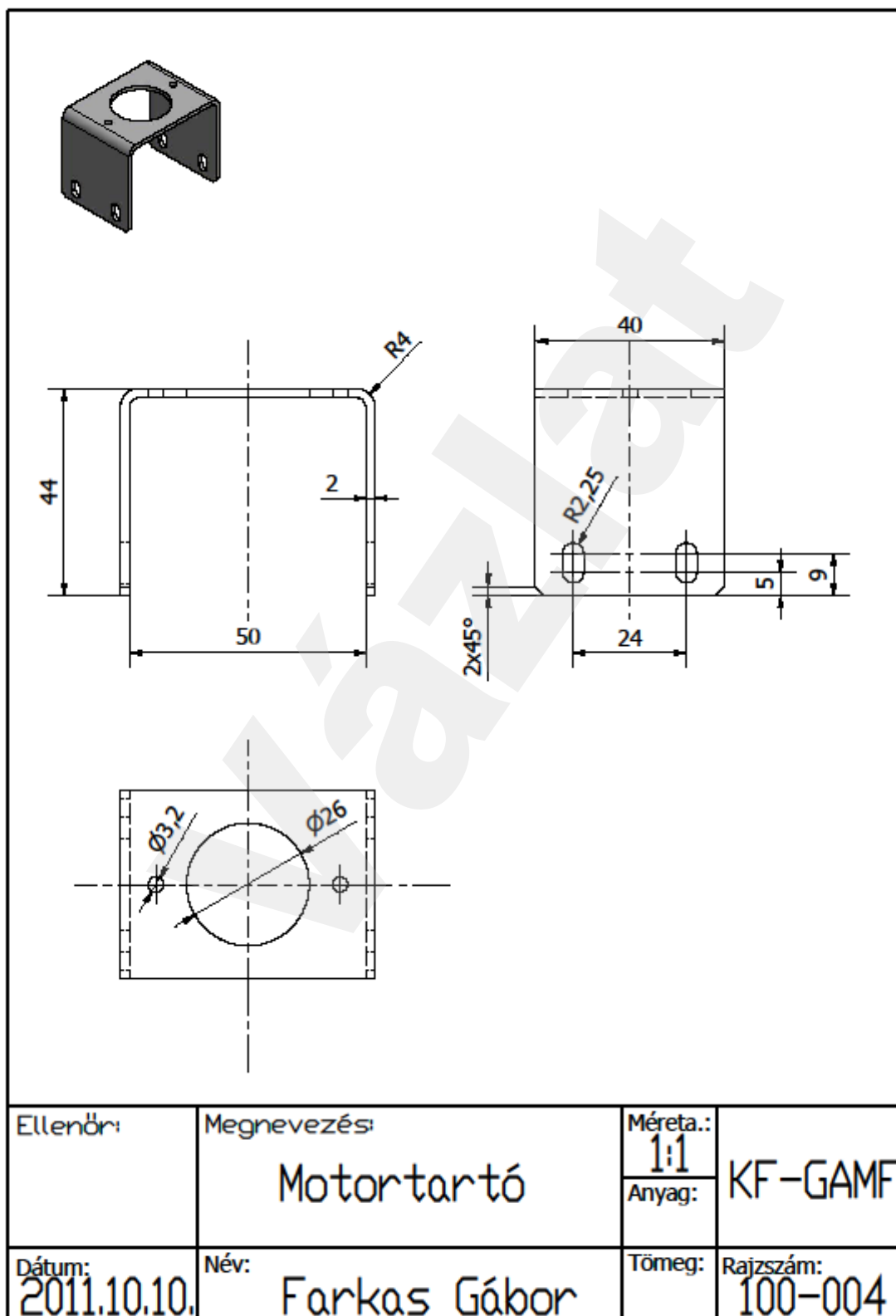
6. melléklet. A motor felőli csapágyház.



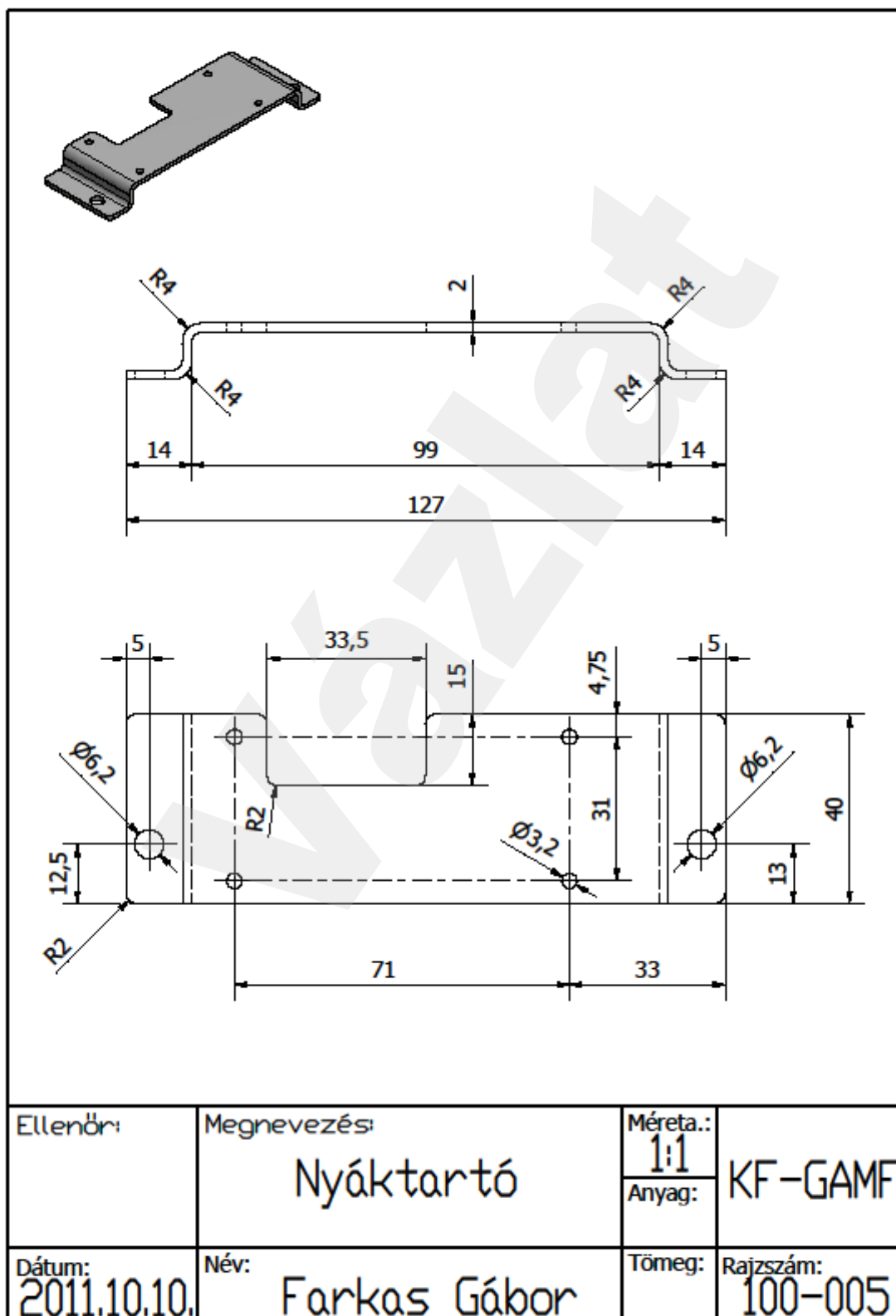
7. melléklet. Az érzékelőt tartó csapágyház.



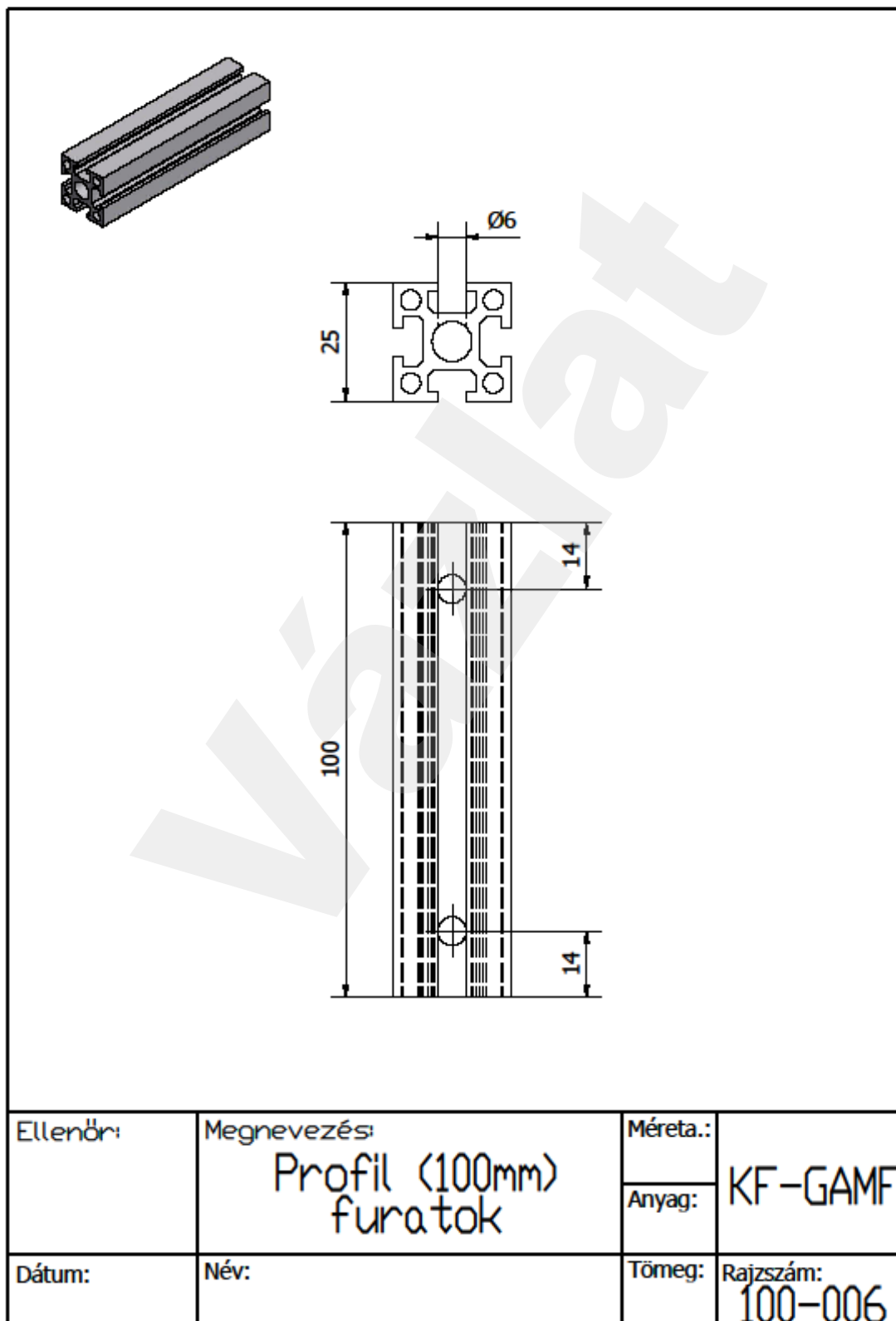
8. melléklet. Motortartó lemez.



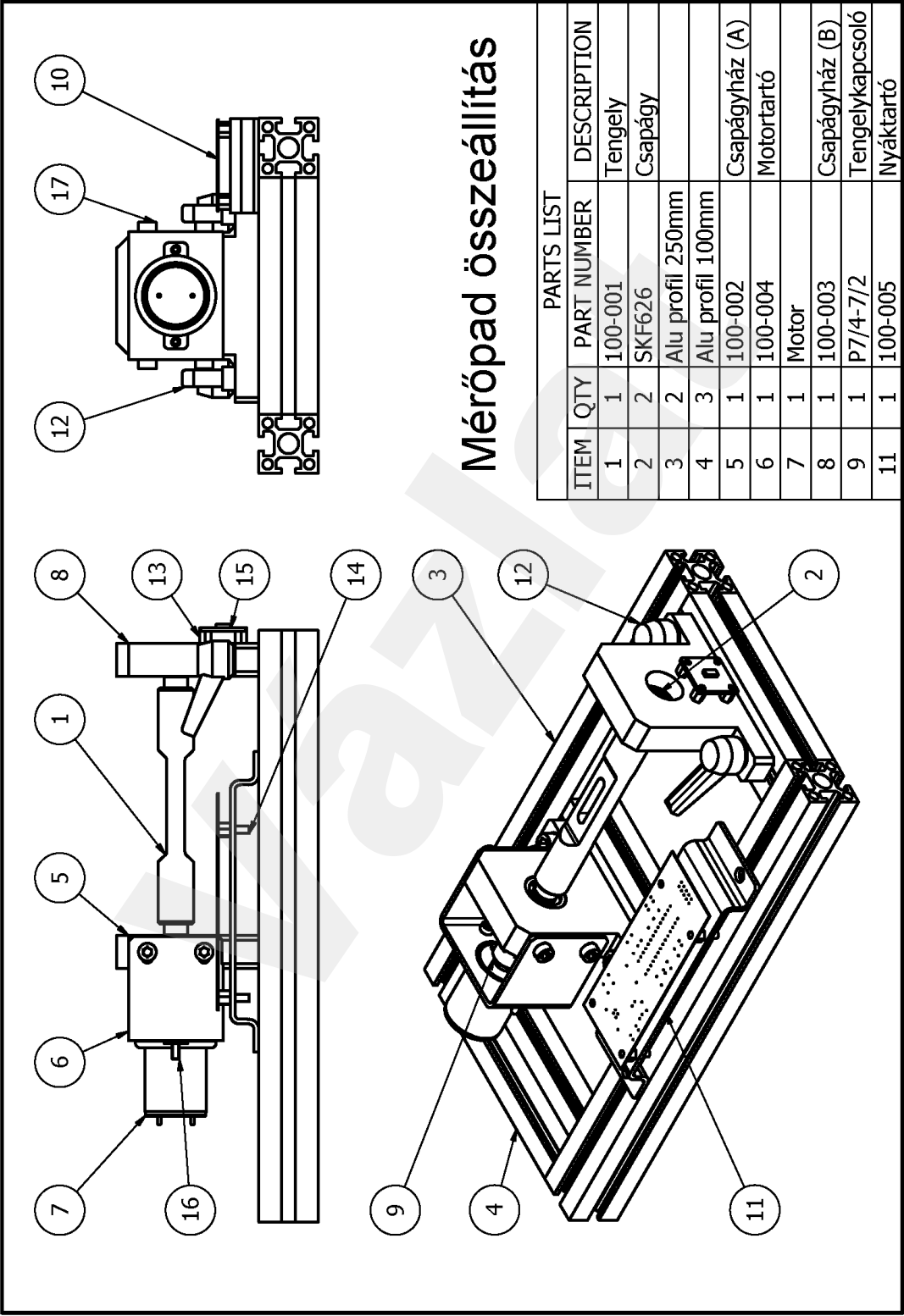
9. melléklet. Nyáktartó lemez.



10. melléklet. A 100mm hosszú aluprofil utólagos megmunkálása.



11. melléklet. A mérőpad összeállítási vázlata.



12. melléklet. Munkapad mérőegységgel és a mérés összeállítása.

