



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Finta András

Univerzális aktuátor teszter fejlesztése

Diplomaterv

Tanszéki konzulens:

Dr. Sujbert László

Külső konzulens:

Gusztáv Tamás

2013

Tartalomjegyzék

Kivonat	5
Abstract	6
1 Bevezetés	7
2 Vizsgáló eszközök bemutatása	9
2.1 SENT protokoll bemutatása [1].....	11
2.1.1 SENT átviteli szekvencia	11
3 A vizsgáló berendezés rendszerterve	13
3.1 Követelmények.....	13
3.2 Rendszer funkcionális felépítése	14
3.3 Hardver-szoftver szétválasztás	17
3.3.1 Motorvezérlés megvalósítása	17
3.3.2 PC kommunikáció megvalósítása.....	18
3.3.3 Szenzoráram mérés megvalósítása	19
3.3.4 Adattárolás megvalósítása.....	19
3.3.5 Felhasználói interfész megvalósítása	19
3.3.6 Mikrovezérlő kiválasztása.....	19
3.4 Projekt ütemterv	20
3.5 Fejlesztő kártya és környezet bemutatása	22
4 A vizsgáló berendezés hardvertervének elkészítése	24
4.1 Tápellátás	24
4.2 Központi egység az STM32F103VET6 mikrokontrollerrel	25
4.3 Motorvezérlés	26
4.4 AD átalakító bemeneteinek védelme és szűrése.....	28
4.5 Szenzoráram mérés	30
4.6 FT232 USB UART konverzió.....	32
4.7 SENT bemeneti kapcsolás	32
4.8 Egyéb, kiegészítő kapcsolások	33
4.9 Automatikus felismerés biztosítása speciális kábel használatával	35
5 A vizsgáló berendezés szoftvertervének elkészítése.....	36
5.1 Szoftver felépítésének bemutatása.....	37
5.2 Főprogram részletes bemutatása.....	40

5.2.1 Menürendszer bemutatása	41
5.2.2 Timer interrupt működésének bemutatása	42
5.2.3 ADC interrupt működésének bemutatása.....	52
5.2.4 EXTI interrupt működésének bemutatása	52
6 Nyomatott áramköri kártya tervezése.....	54
6.1 Méretezés	54
6.2 Alkatrészek elhelyezése	54
6.3 Huzalozás elkészítése	55
6.4 Gyártási technológia	55
7 PC oldali szoftver készítése	57
7.1 LabVIEW program bemutatása.....	57
7.2 SD kártya fájlok bemutatása	58
8 Élesztés és kalibráció	60
8.1 PID szabályzás hangolása	60
8.2 Szenzoráram mérés	62
8.3 Motoráram mérés.....	63
9 Mérések és eredmények.....	65
9.1 Szenzoráram mérés pontossága.....	65
9.2 Motoráram mérés pontossága.....	65
9.3 Az eszközzel készített vizsgálatok eredményei.....	66
Összefoglalás.....	70
Köszönetnyilvánítás.....	72
Irodalomjegyzék	73

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Finta András**, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző, cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Kelt: Budapest, 2013. 05. 26.

.....
Finta András

Kivonat

A modern autókkal szemben egyre több és több követelmény fogalmazódik meg. Elég csak arra gondolni, hogy a teljesítmény folyamatos növelése mellett, az egyre szigorodó nemzetközi rendeletek betartása és a vásárlók igényeinek kielégítése miatt a gyártóknak folyamatosan csökkenteniük kell a káros anyag kibocsajtás, illetve az üzemanyag fogyasztás szintjét.

Ahhoz, hogy ezek az autók teljesítsék a rájuk kirótt jelenlegi és jövőbeli elvárásokat, illetve fejlesztésük a megfelelő irányban haladjon, szükséges a jelenlegi meghibásodott alkatrészek minél pontosabb és kimerítőbb vizsgálata.

A dolgozat egy olyan autonóm működésre is képes rendszer megtervezéséről és megvalósításáról szól, amely az AUDI Hungária Motor Kft.-ben gyártott motorokon található, állandó mágneses állórészű DC motorral rendelkező aktuátorok automatizált tesztelését képes elvégezni. Az eszköz képes különböző diagnosztikai méréseket futtatására a beavatkozókön annak meghatározására, hogy az adott beavatkozó teljesíti-e a specifikációban leírt értékeket. Ezen kívül segítséget nyújt az alkatrészek analízisében, a hibaokok feltárásában. A mérési eredményeket szabványosított formában eltárolja a későbbi felhasználás céljából. A rendszer képes az egyre terjedő digitális SENT protokollú szenzorok jelének értelmezésére és felhasználására.

A tester a következő funkciókkal rendelkezik: képes a szelepeken hiszterézis analízist végezni, melyet a számítógép segítségével meg is tud jeleníteni. Képes a szelepet biztonságos, szabályozott módon mozgatni, a véghelyzeteit megkeresni. Ezen kívül a szelep zárási, illetve nyitási idejének megmérése is lehetséges az eszközzel. Alkalmos hosszú idejű járató tesztek használatára is. Autonóm működéséből adódóan a válogatási folyamatok támogatását is ellátja.

Abstract

Nowadays, there are more and more expectations concerning modern automobiles. To begin with, besides continually increasing power and efficiency, producers have to decrease harmful gas emission and fuel consumption levels, due to more and more severe regulations and in order to fulfil customer needs.

In order that these vehicles would be able to satisfy present and future expectations and their development would advance in the proper direction, a regular and detailed survey of available faulty components is needed.

This thesis is about the design and implementation of an autonomously functioning system, which is capable of performing the automated testing of actuators disposing of DC engines containing static magnetic stators, to be found on motors produced by AUDI Hungary Motor Ltd. The device is able to run various diagnostic measurements to define whether a certain actuator satisfies the specification. Furthermore, it provides assistance in analysing components and revealing faults. It also stores measuring results in a standardised form for a further use. Moreover, the system is able to interpret and utilize the signs of sensors with the ever spreading protocol SENT.

Functions of the tester are the following: it can process a hysteresis analysis on valves and the analysis results are visualized by the computer. Furthermore, it is able to move the valve in a secure and controlled way and to search for its end positions. Furthermore, it is also possible to measure opening and closing times of the valve with the help of this device. It is also suitable for the use of long-time running tests. As an autonomous device, it serves support for selection processes as well.

1 Bevezetés

Napjainkban az egyre magasabb minőséget megkövetelő nemzetközi rendeletekre, illetve vásárlói igényekre reagálva, az autógyárak egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a minőségbiztosítás területére. Különösen igaz ez a prémium márkák körében. A megfelelő minőség előállításához, az előforduló gyártási és konstrukciós hibák kijavításához a gyártási folyamatnak egyfajta visszacsatolásként kell felhasználnia a vevői, illetve gyári reklamációkat.

A reklamált alkatrészek analízise alapvetően az adott alkatrészt gyártó beszállító feladata. Sok esetben kiderül azonban, hogy nem a reklamált darabban van a probléma, vagy nehezen reprodukálható a hibakép (pl. sporadikus hibák), esetleg még intézkedés előtti, ismert hibaképet mutat a darab. Az autógyárak ebből kifolyólag a reklamált alkatrészekben gyakran előanalízist végeznek és csak a bizonyítottan hibás darabokat küldik tovább a beszállító felé. Ilyen elektronikus analízis labor több éve működik az AUDI Hungária Motor Kft. győri motorgyárában, ahol ez a diplomaterv is készült. A diplomaterv csak azon alkatrészek vizsgálatával foglalkozik, melyekben egy állandó mágneses állórészű DC motor segítségével mozgatunk valamilyen szelepet, melynek aktuális pozíciójáról egy analóg vagy digitális szenzor ad visszajelzést. Tipikusan ilyen alkatrész például a fojtószelep.

A vizsgálatok célja - a beszállítókkal együttműködve - a hiba okának minél pontosabb felderítése, melynek következményeképpen az alkatrészek megbízhatóságának növelését hozó döntések, intézkedések születnek. Az alkatrészek komplexitása miatt a hiba csak triviális esetben határozható meg egyszerűen és rövid idő alatt. Ha sporadikus jelenségről van szó, ami csak meghatározott körülmények között, megfelelő idő után lép fel, az analízis hosszú időt vesz igénybe és igen költséges lehet. A működési rendellenesség reprodukálásához, mely nélkül a hibák feltárása esélytelen lenne, gyakran hosszú járatási tesztek vezetnek.

Az eddigi mérési folyamat - mely szerint a szelepet végállásokba vezéreljük, ott megmérjük a pozíciószensor által kiadott feszültséget, illetve a mozgatás közben a motor által felvett áramot - például az előbb leírt problémára gyakran nem ad megoldást. Abban az esetben, ha olyan hiba lép fel, amely alapján feltételezhető, hogy a motorokba újonnan beépítendő alkatrészek közül több azonos hibaképpel fog kiesni,

válogatást rendelnek el az adott alkatrésze. Ezen alkatrészek általában igen nagy számban kerülnek beépítésre, így válogatásuk meglehetősen körülményes és nehézkes a hagyományos módszerrel.

Ezen okokból kifolyólag felmerült az igény egy olyan eszköz kifejlesztésére, amely az eddig használt, hagyományos méréseken kívül, egyrészt hosszú távú járatási próbák közben is használható, másrészt egyéb, olyan paraméterek mérésére alkalmas, melyek esetleg még nem is specifikáltak az adott beszállító által, de valamilyen hibaokra adnak lehetőséget következtetni (pl. fojtószelep szenzor feszültsége meg nem vezérelt esetben, zárási, nyitási időmérés, hiszterézis analízis stb.). Mindemellett olyan konfigurálható, automatizált mérőfunkcióval rendelkezik, amely alkalmas a válogatások viszonylag egyszerű lebonyolítására, illetve a válogatás eredményének automatikus dokumentálására. Nem utolsó szempontként ezen aktuátorok a reklamált alkatrészek jelentős hányadát teszik ki, ezen berendezés segítségével az analízis ideje is csökkenthető, részben automatizálható, és az egyes mérések pontosan megismételhetők.

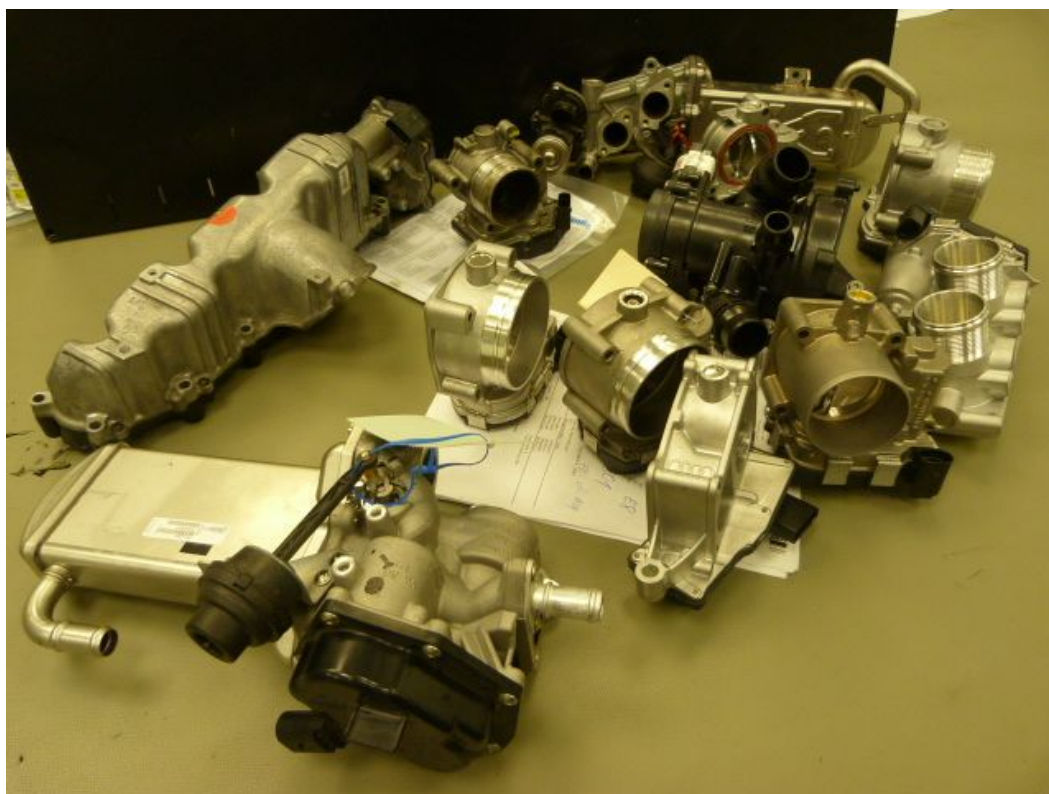
Fontos szempont volt, hogy az eszköz képes legyen értelmezni a SENT protokollú digitális jelet, mivel már jelenleg is vannak alkatrészek (elektromos termosztát), melyek nem a hagyományos analóg szenzorjelet használják, illetve várhatóan ezen alkatrészek száma folyamatosan nőni fog a következő években.

A diplomaterv keretében megvalósítandó feladat, egy ilyen elven működő univerzális aktuátor vizsgáló berendezés megtervezése és elkészítése. A fejlesztés során az AUDI Hungária Motor Kft. által gyártott 2.0 literes TFSI benzinmotor fojtószelepét használtam, de az eszköz alkalmas a feladatkiírásban szereplő feltételt teljesítő összes aktuátor tesztelésére.

A következőkben bemutatom a vizsgálandó alkatrészek jellegzetességeit, illetve az ezekből levezethető követelményeket az eszközre nézve, majd a vizsgáló berendezés rendszertervét, illetve a hardver és szoftver tervezés lépéseit. Ezek után a nyomtatott áramkörtérkép tervezés leírása, továbbá a PC oldali megjelenítő LabVIEW program ismertetése következik. Végül ismertetem az élesztés folyamán fellépő problémákat és megoldásukat, illetve az eszközzel végzett méréseket és ezek eredményeit, majd összefoglalom az elvégzett munkát, és rámutatok a lehetséges továbbfejlesztési irányokra.

2 Vizsgálható eszközök bemutatása

A vizsgálat tárgyát képező eszközök olyan beavatkozók, amelynél a mozgatót egy állandó mágneses DC motor végzi és az aktuális pozícióról valamilyen szenzor (analóg, vagy digitális jel) ad visszajelzést. Ezek az eszközök a következők: fojtószelepek, EGR szelepek (kipufogógáz visszavezető szelep), szívócső állító szelepek, turbóállító szelepek, dízel szabályzó szelepek, elektromos termosztátok és útválasztó szelepek. Az alkatrészek motorcsaládonként általában különböző paraméterekkel épülnek. Látható, hogy valóban sokfajta beavatkozó vizsgálatra alkalmas.

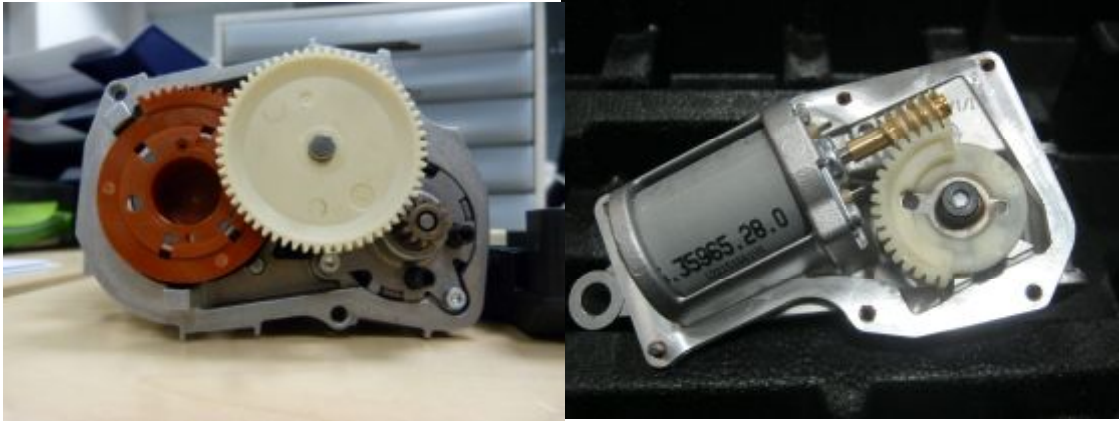


1. ábra Vizsgálható alkatrészek

A szelep mozgása minden esetben valamilyen mechanikus áttétel segítségével valósul meg, amint ez az 1. ábrán is látható. Alapvetően, mechanikailag kétfajta megoldást alkalmaznak ezekben az aktuátorokban. Az egyik esetben a motor kisebb áttételen keresztül csatlakozik a szelephez, amelyet spirálrugók kényszerítenek egy nyugalmi állapotba (ez az állapot más-más lehet a különböző beavatkozóknál). A másik esetben csigakeréken, ezáltal egy jóval nagyobb áttételen keresztül csatlakozik a motor

a szelephez. Ezeknél az eszközöknél nem található spirálrugó, ha nincs vezérlés, a szelep nem mozdul meg. Erre a különbségre a szabályzás során gondot kell fordítani.

A szelepet mozgató motor nyomatéka 12V-os PWM (impulzusszélesség modulált) feszültség jellel vezérelhető.



2. ábra Motor áttételezése szelepmozgatáshoz

A motor által mozgatott szelep aktuális pozíciójáról fojtószelep esetén két független, analóg feszültség kimenetű szenzor nyújt információt, a többi aktuátor esetében egy szenzor adja a pozíció információt. A szenzorok 5V-os tápfeszültségről működnek, így a kimeneti jelük feszültségtartománya 0-5V. A két szenzor a kimeneti feszültséget a pozíció függvényében ellentétes irányban változtatja, tehát az egyik szenzor a szelep zárt állapotában 0V körüli, a másik 5V körüli értéket ad ki, míg nyitott állapotban épp ellenkezőleg. A specifikációban meg van határozva, hogy az egyes szenzorok feszültségjelei a véghelyzetekben milyen határok között változhatnak, ezeket az értékeket a beszállítónak természetesen biztosítani kell. Valós helyzetben a motorvezérlő többek között a véghelyzeti határok ismerete alapján diagnosztizálja és szabályozza az adott alkatrészt.

Az analóg szenzorok mellett az utóbbi időben terjedőben vannak a digitális kimenetű szenzorok is. Ezek a szenzorok az úgynevezett SENT (Single Edge Nibble Transmission) protokoll alapján továbbítják - jelen esetben - a pozíció információt.

A digitális szenzoroknak több előnye is van az analóg szenzorokkal szemben. Mivel nem a feszültség amplitúdó hordozza az információt, így kevésbé zavarérzékeny, mint az analóg szenzor, ezzel nagyobb effektív felbontás érhető el (12bit, az analóg szenzor kb. 10bit-es pontosságával szemben). Továbbá fontos tulajdonság, hogy diagnosztikai üzeneteket is tud továbbítani. A csatlakozó kontaktusokkal szemben

enyhébb követelmények is megengedhetők, aranyozott helyett elegendő ónozott kontakt használata is. Amennyiben egyszerre többféle információ küldésére van szükség, mint a kombinált szenzorok esetén (pl. nyomás, hőmérséklet), megspórolható egy kontaktus, így olcsóbbá téve a hardvert.

A következő pontban összefoglalom a SENT protokoll jellegzetességeit.

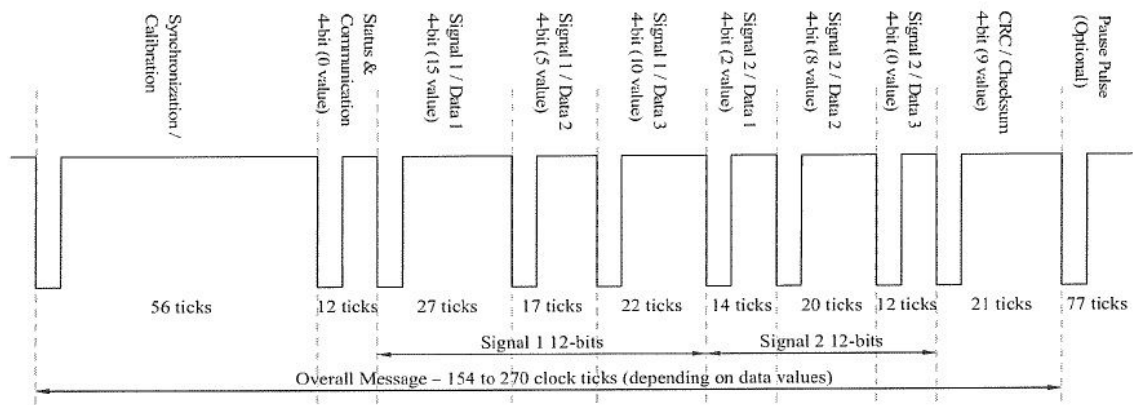
2.1 SENT protokoll bemutatása [1]

A SENT kódolási rendszert olyan alkalmazásokban használják, ahol nagy felbontású szenzorok kommunikálnak egy ECU-val (Engine Control Unit). A protokoll alternatívája lehet a 10 bites AD átalakítók kisebb felbontású módszerének, illetve az egyszerűbb és olcsóbb kialakítás miatt a CAN és LIN rendszereknek. A megvalósítás intelligens szenzort feltételez, amiben mikroprocesszor vagy cél IC hozza létre a jelet. A SENT egyirányú kommunikációt valósít meg a szenzor, vagy adóeszköztől a kontroller, vagy fogadóeszköz felé. A kommunikáció során a fogadó oldalról nem érkezik semmiféle egyeztető jel. A jelátvitel impulzusok sorozatából áll, az adat kódolás két lefutó él között történik, az információt az impulzusok szélessége hordozza. A szélességet egy úgynevezett tick (órajelütés) többszörösében méri, ami $\sim 3\mu\text{s}$ hosszú. A tick értéke a szinkronjelből határozható meg. Az üzenetek alapegysége az úgynevezett nibble (fél-byte). A következő pontban bemutatom az átviteli szekvencia felépítését.

2.1.1 SENT átviteli szekvencia

A kódolási rendszer impulzusok sorozatából áll, a következő sorrendben:

- kalibrációs és szinkronizációs impulzus 56 tick széles, ebből számolható a tick idő, ami $3\mu\text{s} \pm 25\%$ lehet
- egy 4 bites státusz üzenet, ami 12-27 tick széles az üzenet tartalmától függően
- 1-6 db 4 bites adat üzenet, szintén 12-27 tick széles az üzenet tartalmától függően
- egy 4 bites CRC üzenet, 12-27 tick széles az üzenet tartalmától függően



3. ábra SENT átviteli szekvencia

A szinkronizációs impulzuson kívül, mindegyik impulzus felépítése a következő: 12 tick + az impulzus tartalma, ami 4 bites üzenet lévén 0-15 értékű lehet. Ebből következik, hogy egy üzenet legalább 12, legfeljebb 27 tick hosszúságú lehet. A teljes üzenet így 154-270 tick széles az egyes impulzusok adattartalmától függően.

A státusz üzenet alsó két bitje alkalmazás specifikus adatok számára foglalt, a harmadik bit tartalmazza a soros adat üzenetet. A legmagasabb bit értéke 1, ha ez az első üzenet, különben 0. Megjegyzendő, hogy a státusz üzenet értéke nem kerül bele a CRC számításba.

Az adatüzenetek továbbítása a következőképpen történik: az adatüzenetek száma 1-től 6-ig terjedhet, azonban az üzenetek eloszlása alkalmazásonként eltérő lehet. Például a 3. ábrán két 12 bites szenzor adatait tartalmazza az üzenet.

Az üzenetet az ellenőrző fél-byte zárja, amit lehetőséget nyújt az átviteli hibák detektálására.

3 A vizsgáló berendezés rendszerterve

Ebben a fejezetben bemutatom a feladatkiírásból adódó triviális és nem triviális követelményeket a rendszerre nézve, illetve az elkészült eszköz funkcionális felépítését, továbbá az egyes modulok feladatait és azok kommunikációját, majd a hardver-szoftver szétválasztással folytatom. Ezek ismeretében vázoló a két féléves munka ütemtervét és összefoglalom az előző félév eredményeit. Végül a feladat során használt fejlesztőkártya és - környezet bemutatásával zárom a fejezetet.

3.1 Követelmények

A vizsgáló berendezés tervezésének első lépése a rendszer alapvető felépítésének kidolgozása, a feladat részfeladatokra, modulokra bontása, illetve az egyes modulok közti kapcsolatok meghatározása. Egy jól működő eszköz fejlesztéséhez fontos szem előtt tartani az eszközzel szemben támasztott jelenlegi és jövőbeli várható igényeket, melyek részint a feladatkiírásból, részint az aktuátorok specifikált paramétereitől, illetve az eddig megismert hibaképekből adódnak. Ezek sorba vétele következők:

- Rendelkeznie kell 12V-os 1kHz-es PWM kimenettel a motor meghajtásának céljából.
- Képesnek kell lennie a szelepet megbízható, szabályozott mozgásra kényszeríteni, úgy hogy a szelep a véghelyzeteket maximálisan 1V/s (szenzor feszültség, kb. 18°/s) szögsebességgel érheti el.
- Az aktuátorok különböző fizikai megvalósítása miatt különböző szabályzási paraméterek, algoritmusok legyenek választhatóak.
- Fel kell tudnia dolgozni mind az analóg, mind a digitális pozíció szenzor információkat.
- A szenzor tápfeszültség tartománya 4.5-5.5V, tipikus értéke 5V. A szenzor feszültség felbontása 10 bites, a pontossága $\pm 5\text{mV}$.
- Szükséges a motor, illetve a szenzor által felvett áram értékének mérése, amiből következtetni lehet a szelep akadására vagy szenzorhibára. A

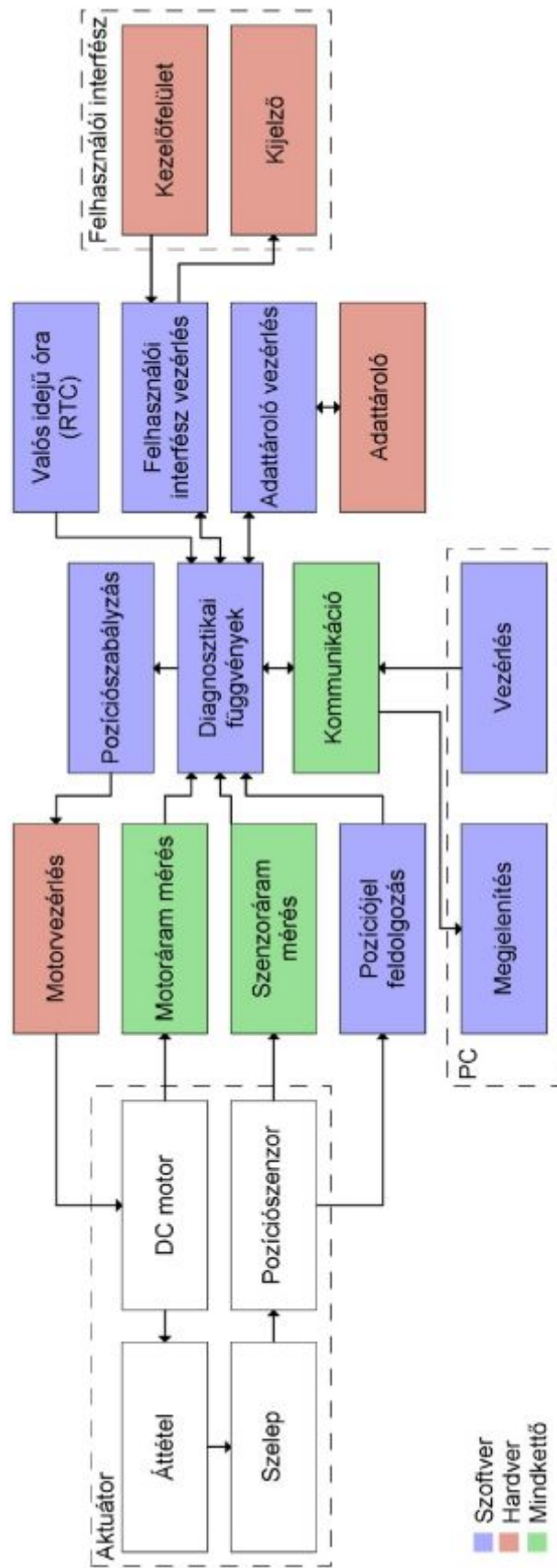
szenzoráram normál üzemben 10-15mA nagyságú, maximális értéke 50mA, a megkövetelt pontosság $\pm 1\text{mA}$. Motoráram esetén az üzemi érték 8A, a tervezési maximum 30A, a megkövetelt mérési pontosság $\pm 0.05\text{A}$.

- Egyszerű és megbízható kezelőfelülettel kell rendelkeznie.
- A diagnosztikai méréseket megfelelően dokumentálnia és tárolnia kell.
- A későbbi visszakövethetőség miatt a mérési eredményeket időbélyeggel ellátva kell elmentenie.
- A tesztek releváns adatait meg kell jelenítenie valós időben a számítógépen.
- Képesnek kell lennie autonóm működésre, válogatási feladat végrehajtására.
- Az egyszerűbb kezelhetőség végett legyen képes automatikusan felismerni az egyes aktuátorokat.
- A későbbiekben beépítésre kerülő beavatkozók hozzáadása a teszter-hez megoldható legyen az eszköz átprogramozása nélkül is

Fontos szempont továbbá, hogy a későbbiekben kifejlesztésre kerülő, hasonló elven működő aktuátorokat minél egyszerűbben lehessen csatlakoztatni az eszközhöz.

3.2 Rendszer funkcionális felépítése

A követelmények ismeretében elkészíthető a rendszer funkcionális blokkvázlata, amely tartalmazza, hogy az elkészült rendszernek milyen funkciókkal kell rendelkeznie. A rendszer blokkvázlata a 4. ábrán látható.



4. ábra A rendszer blokkvázlata

Az ábra alapján végigkövethetőek az egyes modulok által végrehajtott feladatok. A feladat alapján eldönthető, hogy az adott funkciót szoftveresen vagy külön hardver segítségével érdemes-e megoldani.

Felhasználói interfész: feladata, hogy a kezelő ki tudja választani és megfelelő paraméterekkel le tudja futtatni a kívánt diagnosztikai funkciót, továbbá visszajelzést adjon a mérés állapotáról és eredményeiről. Két részre bontható: a kezelőfelületre, ahol a kezelő be tud avatkozni, és a kijelzőre, ahol visszajelzést kap az általa kiadott parancsokról.

Diagnosztikai funkciók: ide tartoznak a felhasználói interfészen keresztül hívható függvények, melyek különböző mérési feladatokat valósítanak meg az adott beavatkozón. A következő funkciókkal rendelkezik az eszköz: hiszterézis analízis, véghelyzet mérés, zárasi időmérés, nyitási időmérés, járatás. Ezeken kívül az eszköznek van még egy szekvenciális végrehajtás funkciója, amely az előbb említett függvényeket képes tetszőleges sorrendben és számban meghívni. Ezen funkciók működésének részletes leírását a szoftverterv pontban fejtem ki.

Pozíció szabályzás: ez a modul a szelep pozíció szabályozását valósítja meg. A követelményeknek megfelelően sebesség korlátozottan kell működnie. Bár ez a függvény a kezelőfelületről is hívható, külön tárgyalom, mert valamelyest eltér a többi diagnosztikai funkciótól.

Az eszköz szabályzás közben folyamatosan figyeli a motor által felvett áramot, és ha az túllépi a megengedett tartományt, a szabályzás leáll és hibajelzést ad. A hiszterézis analízisen kívül minden más diagnosztikai funkció felhasználja ezt a modult.

Motorvezérlés: a modul feladata a megfelelő szélességű és polaritású PWM jel kiadása a motorra. A pozíció szabályzáson kívül a hiszterézis analízis kapcsolódik ehhez a modulhoz.

Pozíciószenzor jelfeldolgozás: a modul feladata a beavatkozón található szenzor, vagy szenzorok által kiadott analóg, vagy digitális feszültség jel értelmezése. A pozíció szenzor jelet egyrészt a pozíció szabályzás, másrészt a diagnosztikai funkciók használják fel.

Szenzor- és motoráram mérés: a modul feladata a szenzor(ok)on és a motoron átfolyó áram értékének mérése. Ez azért fontos, mert az áramfelvételtől következtethetünk a motor, illetve a szenzor állapotára. Például, ha a motornak nagyobb

az áramfelvétele a szelep mozgatása közben a megszokottnál, akkor valószínűsíthető, hogy a szelep akad vagy szorul. A hibamentesen működő szenzor áramfelvétele egy szűk tartományba esik, az ettől való eltérés valamilyen szenzorhibára utal, ez a jelenség kiinduló pont lehet az analízis során.

PC kommunikációs interfész: feladata a PC-vel való kétirányú kommunikáció lebonyolítása. A számítógépen egyrészt megjeleníthetőek valós időben adatok a mérésekről, másrészt a számítógépen keresztül is lehet utasításokat adni a vizsgálo berendezésnek.

Adattároló kezelés: ha nincs számítógépes kapcsolat (pl. válogatás esetén), a mérési eredményeket valamilyen strukturált rendszerben kell eltárolni, későbbi felhasználás esetére. Ezen kívül bizonyos adatokat úgy szükséges tárolni, hogy megváltoztatásukhoz ne kelljen az egész rendszert újra programozni (pl. egy adott szelepre vonatkozó specifikációs adatok). Ezért szükség van egy olyan nem felejtő adattároló egységre, amely kétirányú kommunikációt valósít meg, számítógépről is hozzáférhető és konfigurálható (pl. az előbb említett specifikációs adatok módosítása végett).

3.3 Hardver-szoftver szétválasztás

Az egyes modulok feladatainak definiálása után eldönthető, hogy melyik funkciót valósítsa meg szoftver, melyhez érdemes külön hardvert használni, esetleg a kettőt együtt. Az 4. ábrán látható, hogy mely funkciókat valósítottam meg hardverből és melyeket szoftverből, illetve melyhez volt szükséges mindkettő.

3.3.1 Motorvezérlés megvalósítása

A motorvezérlőt külön cél IC-vel valósítottam meg, méghozzá az ST Microelectronics VNH2SP30-E nevű H-híd IC-vel. Az IC a következő főbb jellemzőkkel rendelkezik [2]:

- Maximális tápfeszültség: 41V
- Maximális áramkimenet: 30A
- Drain-source ellenállás: 19mΩ
- PWM jel amplitúdója: 12V, megengedhető tartomány 5,5-16V
- Maximális PWM frekvencia: 20kHz

- Vezérlő bemenetek 5V és 3,3V-ról is működtethetőek
- Beépített áramfelvételt mérő szenzor, áram kimenettel
- Túlmelegedés elleni védelem, lineáris áramkorlát, túlfeszültség elleni védelem

A maximális 30A-es áramkimenet indokolt, bár nincs kihasználva teljes mértékben, mivel a motor a specifikáció szerint normál működési tartományban akár 8A-t is felvehet. A 19mΩ-os, alacsonynak számító drain-source ellenállás azt eredményezi, hogy ha a motoron 8A az átfolyó áramerősség, akkor a disszipált teljesítmény 1,216W, ami meglehetősen alacsony érték, így nincs szükség semmiféle külön hűtésre. Ezen kívül az IC tartalmazza a motoráram mérés funkciót, így ezt külön nem kellett megtervezni.

Fontos megjegyezni még, hogy az IC-t egyszerűen lehet vezérelni, három bemenettel rendelkezik: egy PWM bemenettel, ami lehet 3,3V vagy 5V-os is, illetve két logikai bemenettel, melyekkel az áram irányát lehet változtatni a H-hídon, ezzel meghatározva a motor forgásirányát. A következő egyszerű igazságtábla bemutatja az IC vezérlését.

1. táblázat H-híd IC vezérlését leíró igazság tábla[2]

IN_A	IN_B	OUT_A	OUT_B	Működés
1	1	Magas (5V)	Magas	Fékezi a motort
	0		Alacsony	Óramutató járásával megegyező irányba forogat
0	1	Alacsony (0V)	Magas	Óramutató járásával ellenkező irányba forogat
	0		Alacsony	Hatástalan

Az IC adatlapjában szereplő leírással ellentétben, ha mindkét bemenet alacsony szinten van, akkor a motor nem fékeződik, csak ha mindkét bemenet magas szintű. Továbbá az IC rendelkezik még két diagnosztikai kimenettel, melyek hibajelzésre szolgálnak. Normál üzemben mindkét kimenet magas (5V) értékű.

3.3.2 PC kommunikáció megvalósítása

A számítógéppel való kommunikáció megvalósításához is egy cél IC-t használtam fel. Mivel a kisebb mikrokontrollerek (lásd ütemterv első félév) nem feltétlenül tartalmazzák beépítve az USB protokollt, viszont a mai PC-ken egyre ritkább a soros port-os csatlakozó, ezért célszerű volt egy köztes megoldást választani. A Future Technology Devices International (FTDI) vállalat FT232 USB-UART szintillesztő IC-

jét használtam fel erre a célra. Ez az IC támogatja az RS422, RS485 és RS232 protokollt, 300Baud-tól 3MBaud-os sebességig [3]. Az IC az adatlapján található bekötés után a számítógép oldaláról érkező USB jeleket konvertálja az eszköz felé RS232 jelekké, illetve fordítva, megteremtve ezzel a kétirányú kapcsolatot.

3.3.3 Szenzoráram mérés megvalósítása

A szenzor által felvett kis amplitúdójú áram mérése és a pontos - a szenzor tápfeszültségével megegyező – referencia előállítása miatt szükséges volt egy mérőkapcsolás megtervezése, mely egy műveleti erősítő kapcsolásból és egy kapcsoló üzemi referencia feszültségszabályzóból áll. Ennek részletes ismertetését a hardver tervezés megfelelő pontjában fejtem ki.

3.3.4 Adattárolás megvalósítása

Adattároló eszköznek μ SD kártyát választottam, mivel viszonylag részletes szoftvertámogatás áll rendelkezésre hozzá. A számítógéphez való csatlakoztatása is könnyen megoldható, ami fontos a mérési adatok kiolvasása és a konfigurációs fájl megváltoztatása szempontjából.

3.3.5 Felhasználói interfész megvalósítása

A felhasználói interfészt természetesen külön hardver valósítja meg. A kezelő szervek gombok, illetve egy rotary encoder, a kijelző pedig egy 240x320 képpontos grafikus LCD kijelző.

3.3.6 Mikrovezérlő kiválasztása

Végül következzen a vezérlő kiválasztása. Erre a feladatra kézenfekvőnek tűnt egy mikrokontrollert választani, mivel ilyen feladatra cél IC-t nem gyártanak, az általános, programozható vezérlők közül pedig ez a legolcsóbb megoldás. A választásom a ST Microelectronics cég által gyártott STM32F103VET6 nevű 32 bites mikrokontrollerére esett. A kontroller a következő főbb jellemzőkkel rendelkezik [4]:

- 32 bit RISC architektúra
- 1.25 MIPS/MHz (maximum 72MHz)
- HW szorzó és osztó
- 514 kbyte Flash programmemória

- 64 kbyte SRAM
- 3.3V-os tápfeszültség szükséglet
- beépített 32 bites RTC modul (Real Time Clock)
- 3 db 21 csatornás 12 bites ADC
- DMA vezérlő, támogatott perifériák: ADC, DAC, SDIO, I²S, I²C, SPI, USART
- Debug mód JTAG interfészen keresztül
- 80 db GPIO láb 5V-os toleranciával és külső megszakításkéréssel
- 11 timer PWM kimenettel, input capture móddal

Az analóg jelek fogadásához a kontroller beépített 12 bites AD átalakítóját használtam fel. Ennél nagyobb pontosságú külső analóg-digitális átalakító használata felesleges, mivel a beavatkozókba épülő pozíció szenzorok maximális felbontása 10 bit körül van. A pozíció szabályzást illetve a diagnosztikai funkciókat természetesen szoftverből oldottam meg.

A 80 darab felhasználható GPIO lábból 70 darabot használok, így elmondható, hogy a kontroller lábkihasználtsága megközelítőleg optimális. A sok párhuzamosan futó számításigényes és időkritikus feladat miatt (SENT, PID, SD, grafikus LCD, USART, stb.) indokolt volt egy nagyteljesítményű 32 bites mikrokontroller alkalmazása.

3.4 Projekt ütemterv

Miután a hardver-szoftver szétválasztás megtörtént, el lehetett készíteni a két féléves munka előzetes ütemtervét. Ez megkönnyítette a fejlesztés folyamatát és követhetőségét. Az táblázatban látható, hogy a fejlesztés alapvetően két fázisra bontható (2. táblázat). Az első félévben elkészült egy redukált képességű eszköz egy 8 bites mikrokontroller maggal (AtMega128), mely már tartalmazza a szelep pozíciószabályozását, illetve hiszterézis analízist tud végezni. A tesztek során mérendő releváns adatokat a fent említett módon PC-re küldve LabVIEW-ban meg is tudja jeleníteni. A második félév folyamán a nagyobb teljesítményű kontrollernél is az FT232 IC-t használtam a PC-vel való kommunikációra, mivel így a megírt LabVIEW megjelenítő szoftveren nem kellett változtatni.

2. táblázat A projekt ütemterve

		Name	Duration	Start	Finish	Prede...	R...
1		1.fázis	70 days?	2012.09.17. 8:00	2012.12.21. 17:00		
2		HW terv	65 days?	2012.09.17. 8:00	2012.12.14. 17:00		
3		Kapcsolási rajz	15 days?	2012.09.17. 8:00	2012.10.05. 17:00		
4		LCD kijelző illesztése	5 days?	2012.09.17. 8:00	2012.09.21. 17:00		
5		USB illesztése	5 days?	2012.09.17. 8:00	2012.09.21. 17:00		
6		Szenzoráram mérés	5 days?	2012.09.17. 8:00	2012.09.21. 17:00		
7		Motormeghajtás	10 days?	2012.09.24. 8:00	2012.10.05. 17:00		
8		AD bemenetek védelme	10 days?	2012.09.24. 8:00	2012.10.05. 17:00		
9		Alkatrészek beszerzése	20 days?	2012.10.08. 8:00	2012.11.02. 17:00	3	
10		Huzalozási rajz	10 days?	2012.10.08. 8:00	2012.10.19. 17:00	3	
11		NYÁK gyártás	5 days?	2012.10.22. 8:00	2012.10.26. 17:00	10	
12		Összeszerelés	5 days?	2012.11.05. 8:00	2012.11.09. 17:00	11;9	
13		Dobozolás	10 days?	2012.12.03. 8:00	2012.12.14. 17:00	12	
14		SW terv	55 days?	2012.10.08. 8:00	2012.12.21. 17:00	3	
15		Analóg bemeneti jelek kezelése	4,875 days?	2012.10.08. 8:00	2012.10.12. 16:00		
16		LCD vezérlése	5 days?	2012.10.15. 8:00	2012.10.19. 17:00	15	
17		PKommunikáció	9 days?	2012.10.15. 8:00	2012.10.25. 17:00		
18		Hiszterézis teszt	10 days?	2012.10.29. 8:00	2012.11.09. 17:00	17	
19		PID	10 days?	2012.10.29. 8:00	2012.11.09. 17:00		
20		LabVIEW program	30 days?	2012.11.12. 8:00	2012.12.21. 17:00	18;19	
21		Sebességkorlátozás	5 days?	2012.12.17. 8:00	2012.12.21. 17:00	19	
22		2.fázis	74,875 day...	2013.01.14. 8:00	2013.04.26. 16:00	1	
23		HW terv	45 days?	2013.01.14. 8:00	2013.03.15. 17:00		
24		Kapcsolási rajz megtervezése	10 days?	2013.01.14. 8:00	2013.01.25. 17:00		
25		Szenzoráram mérés	4,5 days?	2013.01.14. 12:00	2013.01.18. 17:00		
26		Motormeghajtás	5 days?	2013.01.14. 8:00	2013.01.18. 17:00		
27		AD bemenetek védelme	5 days?	2013.01.14. 8:00	2013.01.18. 17:00		
28		Grafikus kijelző	5 days?	2013.01.21. 8:00	2013.01.25. 17:00		
29		USB	5 days?	2013.01.21. 8:00	2013.01.25. 17:00		
30		SD kártya	5 days?	2013.01.21. 8:00	2013.01.25. 17:00		
31		Huzalozási rajz	10 days?	2013.01.28. 8:00	2013.02.08. 17:00	24	
32		NYÁK gyártás	10 days?	2013.02.11. 8:00	2013.02.22. 17:00	31	
33		Összeszerelés	10 days?	2013.02.25. 8:00	2013.03.08. 17:00	32	
34		Dobozolás	5 days?	2013.03.11. 8:00	2013.03.15. 17:00	33	
35		SW terv	54,875 day...	2013.02.11. 8:00	2013.04.26. 16:00	31	
36		Analóg bemeneti jelek kezelése	5 days?	2013.02.11. 8:00	2013.02.15. 17:00		
37		PKommunikáció	5 days?	2013.02.11. 8:00	2013.02.15. 17:00		
38		Identifikáció	10 days?	2013.02.11. 8:00	2013.02.22. 17:00		
39		Pozíciószabályzás	10 days?	2013.02.25. 8:00	2013.03.08. 17:00	38	
40		PID	5 days?	2013.02.25. 8:00	2013.03.01. 17:00		
41		Sebességkorlátozás	5 days?	2013.03.04. 8:00	2013.03.08. 17:00	40	
42		Áramkorlát	2 days?	2013.03.04. 8:00	2013.03.05. 17:00	40	
43		Grafikus kijelző vezérlése	5 days?	2013.03.11. 8:00	2013.03.15. 17:00		
44		Diagnosztikai funkciók	19,875 day...	2013.03.18. 8:00	2013.04.12. 16:00		
45		Szelep akadás	5 days?	2013.03.18. 8:00	2013.03.22. 17:00		
46		Szenzor hiba	5 days?	2013.03.18. 8:00	2013.03.22. 17:00		
47		Nyílt hurkú hiszterézis	5 days?	2013.03.26. 16:00	2013.04.02. 16:00		
48		Egyéb funkciók	14,875 days?	2013.03.25. 8:00	2013.04.12. 16:00	39	
49		SENT protokoll értelmezése	9,875 days?	2013.04.15. 8:00	2013.04.26. 16:00		
Tester							

Egy ilyen komplexitású rendszer tervezése során számos hibalehetőség merülhet fel, illetve a számomra még új perifériák (SD kártya, grafikus LCD, stb.) illesztése és használata egy meglévő panelen, próbakapcsolásokkal kiegészítve, könnyebb és gyorsabb fejlesztést eredményezhet, mint egy saját tervezésű hardveren.

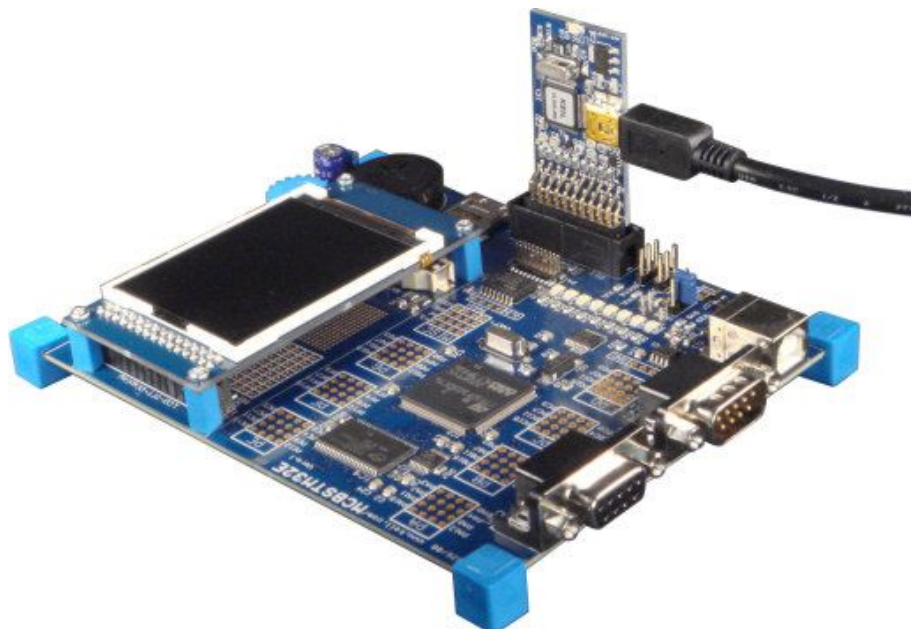
Így a második fázisban elkészült szoftver komponenseket egy általános célú fejlesztő kártyán kezdtem el készíteni. Ezt a fejlesztő kártyát a Keil cég gyártja és az általam választott controllerrel teljesen kompatibilis vezérlővel rendelkezik (STM32F103ZET6). A kártya típusa MCBSTM32E. A következő pontban röviden bemutatom ezt a fejlesztő panelt, illetve a hozzá járó fejlesztő környezetet, a μ Vision-t.

3.5 Fejlesztő kártya és környezet bemutatása

A Keil által kínált MCBSTM32E fejlesztőkörnyezet tartalmaz egy ARM Cortex M3 processzor alapú fejlesztő kártyát, egy ULINK-ME nevű JTAG interfésszel rendelkező programozó és debug-oló kártyát, a μ Vision nevű fejlesztő szoftvert, illetve nagyszámú mintaprogramot és periféria driver-t az egyes perifériák működésének bemutatására és használatára. A fejlesztő kártya a következő tulajdonságokkal rendelkezik:

- 72MHz –es STM32F103ZET6 ARM Cortex M3 144 lábú processzor
- On-Chip memória 1Mbyte Flash és 96kbyte RAM
- külső memória 8Mbyte SPI Flash és 1Mbyte RAM
- USB 2.0 interfész
- CAN 2.0 és soros interfész
- AD átalakító bemenetére kötött potenciométer
- 42 kivezetett GPIO láb
- LCD-TFT kijelző 16 bites interfésszel
- μ SD kártya interfész
- analóg kimenetre kötött hangszóró
- 5 állású joystick
- 8db LED és 4 db nyomógomb

- a tápfeszültséget a programozó kártyán és az USB csatlakozón keresztül is kaphatja
- 20 lábú ARM JTAG debug interfész csatlakozó



5. ábra MCBSTM32E fejlesztőkártya

A fejlesztő kártyának több előnye is volt számomra. Egyrészt, a saját hardver elkészültéig ezen lehetett a fejlesztést végezni, ráadásul több olyan perifériával is rendelkezik, amelyeket a későbbiekben is fel kell használni és működésük megegyezik az általam választott controller perifériáinak működésével (μ SD kártya, LCD kijelző, soros port, ADC, stb.). Másrészt, a kártyához kapott programozót és fejlesztő szoftvert is fel tudtam használni az elkészült eszköz programozására. Megemlítendő, hogy az ARM JTAG-es debugger-e jóval intelligensebb az AVR debugger-énél, az interrupt-ok közben is meg lehet állítani és itt is képes lépésenkénti végrehajtásra.

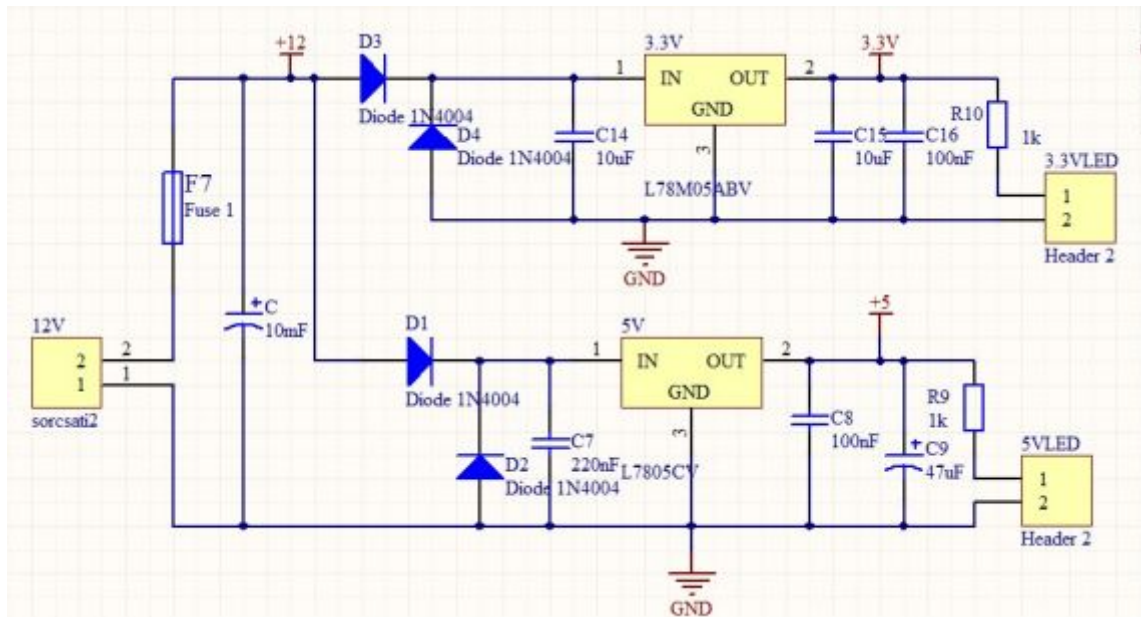
4 A vizsgáló berendezés hardvertervének elkészítése

Ebben a fejezetben a hardver-szoftver szétválasztásból adódó hardver modulok tervezési megfontolásait és megoldásait ismertetem. A bonyolultabb tervezést igénylő részeket külön pontokban vezetem elő.

4.1 Tápellátás

A tápellátásnak egyrészt biztosítania kell a mikrokontroller tápfeszültségét, ami a központi tápegységből érkező 12V feszültségből stabil 3.3V tápfeszültség előállítását jelenti. Az FT232 IC-nek, illetve a SENT jelet vevő kapcsolásnak szükséges az 5V-os tápfeszültség előállítása, továbbá a motorvezérlő működéséhez szükséges a 12V-os feszültség szint is. Az utóbbi feszültség közvetlenül a központi tápegységről van táplálva egy nagy kapacitású szűrőkondenzátoron keresztül. Az 5V-os és 3.3V-os feszültség szintek előállításának legegyszerűbb módja készen kapható feszültség stabilizátor IC-k alkalmazása.

Az IC típusa az áramfelvétel várható értéke alapján határozható meg, melynek nagysága az egyes alkatrészek adatlapjain található csúcsra méretezett fogyasztás figyelembevételével becsülhető. A fordított polaritású tápfeszültség okozta esetleges meghibásodás elkerülése végett két-két egyenirányító dióda, a túlzott áramfelvétel okozta károsodás megelőzésére pedig biztosíték is betervezésre került. Ezen kívül még további szűrőkondenzátorok és a tápfeszültség meglétét jelző LED-ek alkotják a tápellátás kapcsolását. A teljes kapcsolás az 6. ábrán látható.



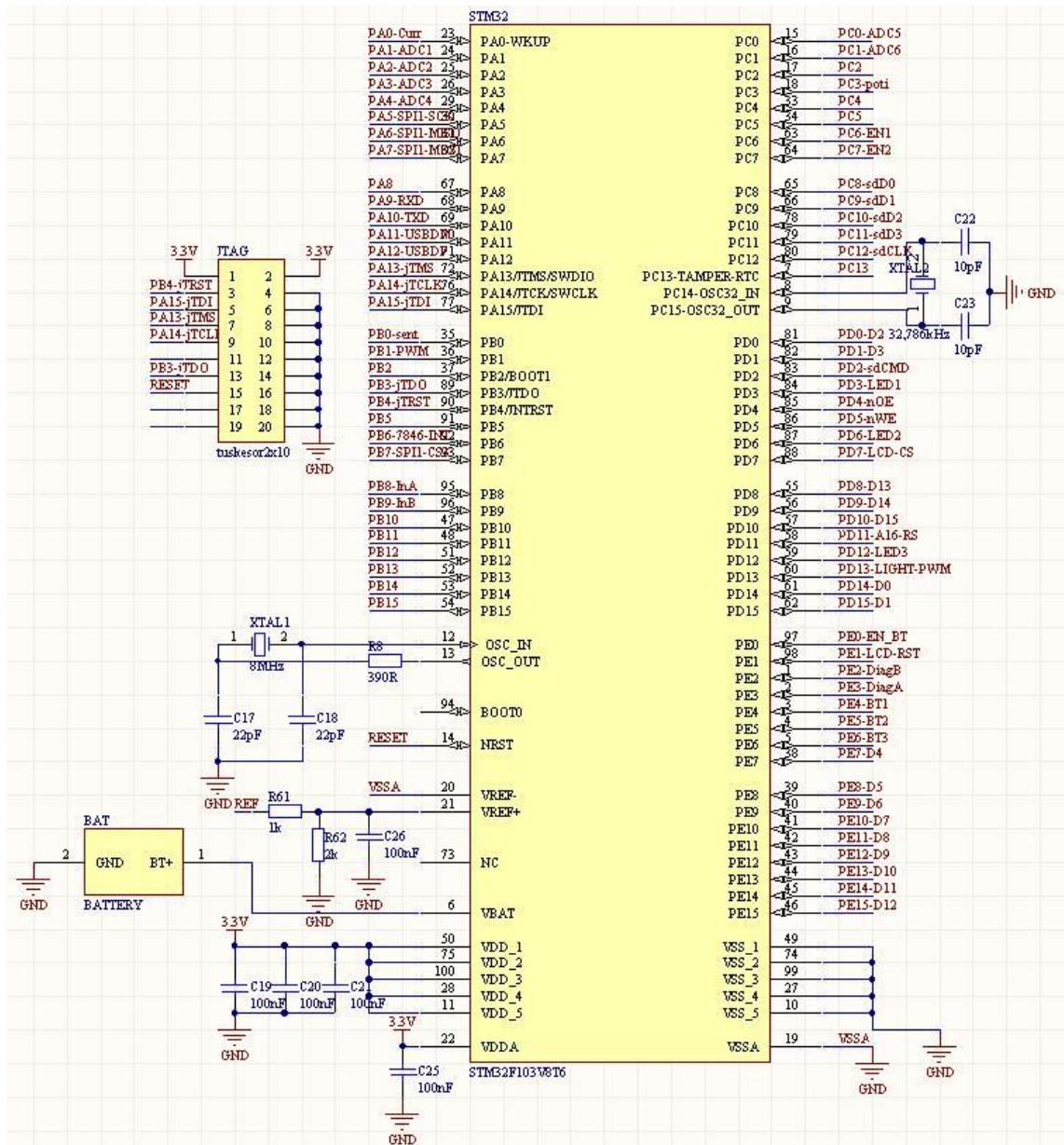
6. ábra Tápellátás kapcsolási rajza

4.2 Központi egység az STM32F103VET6 mikrokontrollerrel

A mikrokontroller tápellátása a VDD lábakon keresztül történik, a helyes működés feltétele, hogy $2V < VDD < 3,6V$. A tápfeszültség és a föld lábak közé, amelyek a kontrolleren körszimmetrikusan helyezkednek el, szűrőkondenzátort kell tenni a zavartalan működés biztosítására. A kontroller reset lába összeköttetésben van az LCD reset lábával, és egy felhúzó ellenálláson keresztül tápfeszültségre van húzva. Esetleges hiba esetén a központi tápfeszültség megszakításával lehet az eszközt újraindítani.

A processzor órajelét egy kvarc oszcillátor szolgáltatja, mely a C_{17} , C_{18} kondenzátorokból, egy kvarckristályból és a kontrollerbe integrált meghajtó fokozatból áll. A kondenzátorok a felharmonikusok elnyomására szolgálnak, a kapacitásuk értékére a kontroller adatlapja ad ajánlást a kristály frekvenciájától függően. Az adatlap 8MHz-es kristályt ajánl, melyet PLL segítségével 72MHz frekvenciájú órajellé szoroz fel. Egy másik kvarc oszcillátor is csatlakozik a kontrollerhez, ennek a feladata, hogy ellássa órajellel az RTC-t akkor is, ha az eszköz ki van kapcsolva. Ez az oszcillátor elemről üzemel. Azért, hogy az elem ne merüljön le idő előtt, ennek az oszcillátornak a frekvenciája csak 32,786 kHz, így az áramfelvétele minimális.

A kontroller felprogramozása, azaz a működtető program betöltése a Flash memóriába a már említett JTAG interfészen keresztül lehetséges.



7. ábra A mikrokontroller és a kiegészítő elemek kapcsolási rajza

4.3 Motorvezérlés

A motor meghajtását az ST Microelectronics VNH2SP30-E H-híd IC segítségével végzem. Az IC 5,5V-16V tartományban tud üzemelni, a jelenlegi konstrukcióban közvetlenül a központi tápról kap 12V tápfeszültséget. Az IC vezérlése a 3.3-as pontban már bemutatott módon történik. Az IC a HOutA és HOutB lábakon csatlakozik a motorhoz. Fontos megjegyezni, hogy a helyes működés eléréshez a $DIAG_A$, $DIAG_B$ lábakat felhúzó ellenállással a tápfeszültségre kell húzni.

A CS áram szenzor kimenetet az adatlapban ajánlott 1,5kΩ helyett 3,7kΩ-os ellenálláson keresztül alakítom át feszültség jellé. Ez azért célszerű, mert az IC 30A-os

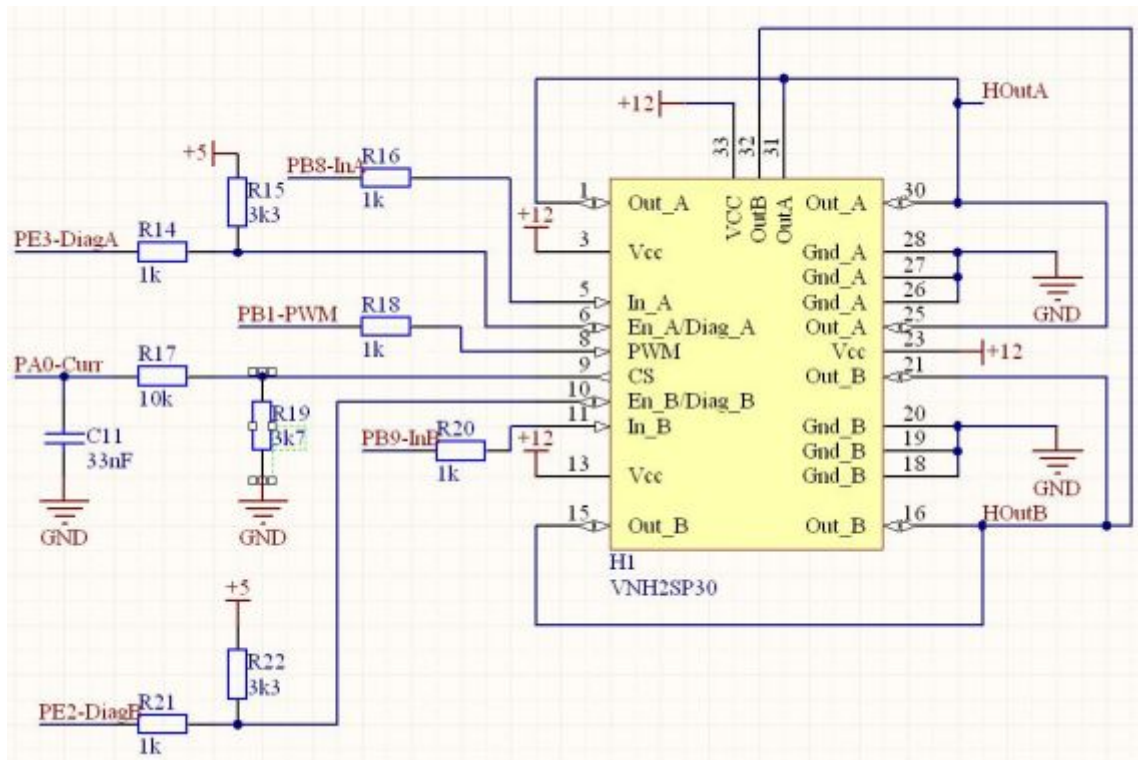
tartományban képes működni és a szenzor kimenet úgy van beállítva, hogy a maximális 30A-es áramfelvétel esetén adjon ki akkora áramot, hogy az ellenálláson 5V essen. Ezzel szemben a motor tipikus áramfelvétele 0-5A (ritkább esetben 8A), ezért nagyobb ellenállást választottam, hogy ebben az áramtartományban nagyobb legyen az R₁₉-en mérhető feszültség. Az ellenállás értékét úgy kell meghatározni, hogy 8A-es motoráram esetén a rajta mérhető feszültség kb. 3,3V legyen. Linearitást feltételezve a következő egyenlet alapján kiadódik az ellenállás értéke.

$$\frac{3,3V}{5V} \times \frac{30A}{8A} \times 1,5k\Omega \cong 3,7k\Omega$$

Az AD átalakító 12 bites, effektív felbontása 11 bit, így az 3,3V-os jelet ~1,6mV pontossággal lehet mérni, ami ~3,9mA áramfelbontást jelent. Így nagy biztonsággal teljesíthető a követelmények között meghatározott 0,05A pontosság.

Az R17 ellenállás és a C11 kondenzátor egy hagyományos RC szűrőpárt alkotnak a szenzor jel kisimítására, ezzel segítve a digitalizálást. A fő zavarforrás az 1kHz-es 12V amplitúdójú PWM jel. Az oszcilloszkópon kimérve is látható, hogy a zavarjel periodikus, periódus ideje 1ms. A zavarszűrést egyrészt a 100Hz vágási frekvenciájú RC szűrő, másrészt az 1ms hosszú jel átlagolása valósítja meg, ami az ADC megszakítás rutinban található. A szűrés nélküli jel hullámosságának maximuma 85mV. A kalibrálás alapján kiszámolt (8.3 fejezet) áramerősítési érték alapján az 50mA-es megkövetelt pontosság eléréséhez a hullámosságot 8,81mV-nál kisebbre kell szorítani. A 100Hz-es vágási frekvencia -10dB erősítést jelent a vizsgált 1kHz-es tartományon, ami teljesíti ezt a feltételt.

A kapcsoláson látható soros 1kΩ-s ellenállások bemenetvédelmet, a bemeneti áram csökkentését szolgálják.



8. ábra A motorvezérlő kapcsolási rajza

4.4 AD átalakító bemeneteinek védelme és szűrése

A mikrokontroller AD bemeneteire kapcsolt eszközök esetleges zárlatától létrejövő meghibásodás elkerülése végett, az ADC bemenetek zener diórával és biztosítókkal védettek. Ezen kívül zajszűrés céljából szintén egy RC szűrőpárt használtam, a tagok értékének meghatározása méréssel történt. Mivel a legtöbb mérendő jel 0-5V tartományban mozog, a kontroller AD átalakítója viszont 3,3V-os referenciával rendelkezik, szükséges a jelek leosztása a kisebb feszültségtartományba.

Ezt a feladatot egy egyszerű ellenállás osztóval oldottam meg, az ellenállás pontatlanságából adódó hibát pedig kalibráció után szoftveresen korigáltam. Mivel az eszköz nincs kitéve nagyobb hőmérsékletváltozásnak, így az ellenállások névleges értéküktől való eltérése időben állandónak tekinthető, ami mérés után egyszerűen kompenzálható a programban. Azonban arra figyelni kell, hogy az ellenállásosztó tagjait nem lehet tetszőlegesen megválasztani. A kontroller adatlapjában szerepel a 3. táblázat, amely összefoglalja, hogy a helyes működés eléréséhez az AD konverzió sebességének megfelelően mekkora lehet a maximális analóg bemeneti impedancia értéke.

3. táblázat AD konverzió sebessége és a megengedhető analóg bemeneti impedancia

$T_s(\text{ciklus})$	$t_s(\mu\text{s})$	$R_{\text{AIN max}}(\text{k}\Omega)$
1.5	0.11	0.4
7.5	0.54	5.9
13.5	0.96	11.4
28.5	2.04	25.2
41.5	2.96	37.2
55.5	3.96	50
71.5	5.11	NA
239.5	17.1	NA

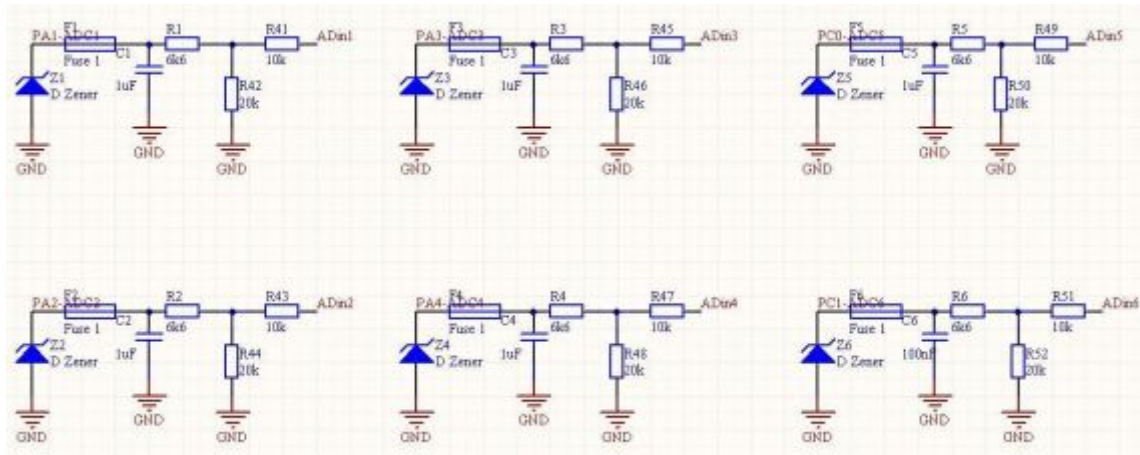
Természetesen érdemes minél nagyobb sebességgel mintavételezni, mivel utána több adatból lehet átlagolni. Látható, hogy az impedancia illesztésnél kompromisszumot kell kötni, mivel az ADC 400 Ω -os bemeneti ellenállása kizárja az ellenállásosztás alkalmazhatóságát, ugyanis olyan kicsi ellenállás értékek adódnának az osztóban, amelyek túl nagy terhelést jelentenének a szenzor számára, ezzel torzítva a kimeneti jelét.

Műveleti erősítő kapcsolással azonban megvalósítható a nagy sebesség, mivel ennek a kimeneti ellenállása minimális. A szenzoráram mérésnél használt differenciálerősítő kapcsolás kis változtatásával (az ellenállás értékeket úgy kell meghatározni, hogy 0,66-os erősítést valósítson meg a kapcsolás) alkalmas a feladat ellátására. A két megoldás közül végül az ellenállásosztásra esett a választás, mivel az ADC által nyújtott legkisebb sebéségen is elegendő a mintavételezés. A 4.3 fejezetben leírtak alapján a mintavételi idő sebessége ismeretében meghatározható az átlagolt adatok száma, 5,11 μs esetén 196 minta átlagolása szükséges a periodikus zavarjel kiszűrésére.

Az AD átalakítóra kötött jelek bár lassan változóak, a hálózati zavar, illetve a motorvezérlő működéséből adódó 1kHz-es zaj kiszűrése szükségszerű. A szűrőpár vágási frekvenciájának 20Hz-t határoztam meg. Ehhez például egy 6,8 μF -os szűrőkondenzátor és egy 1k Ω ellenállás megfelelő, mivel

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{6,6 \times 10^{-6} \text{Hz} \times 1000\Omega \times 2\pi} = 23,4 \text{Hz}$$

A 9. ábrán látható az elkészült AD átalakító bemenet kapcsolási rajza.



9. ábra AD átalakító bemenet kapcsolási rajza

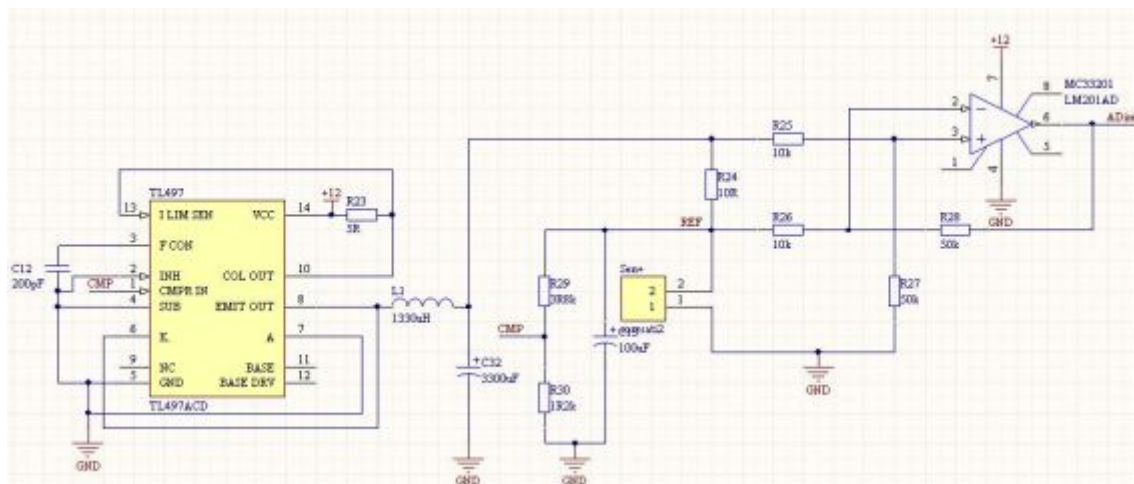
4.5 Szenzoráram mérés

A pozíciószenzor hibás működésének felismeréséhez segítséget nyújthat a szenzor által felvett áram folyamatos mérése. Két független pozíciószenzorral rendelkező szelepeknél (fojtószelepek), csak a két szenzor által együttesen felvett áramot lehetséges mérni. Egy eszköz áramfelvételét általában egy sönt ellenálláson eső feszültség segítségével szokás mérni.

Fontos megjegyezni azonban, hogy a szenzor adott pozícióban kiadott feszültségjelének értéke (a szenzor kialakításából adódóan) arányos a szenzor tápfeszültségének nagyságával. Ezért, ha valahogy sikerülne elérni, hogy a kontroller AD átalakítójának referencia feszültsége megegyezzen a szenzor tápfeszültségével, akkor a tápfeszültség esetleges változása nem okozna problémát a pozíciójel kiértékelésénél (mivel a szenzorfeszültség és a referenciafeszültség is a tápfeszültséggel együtt változna).

Ebből az következik, hogy a szenzor a tápfeszültségét nem kaphatja a 4.1-ben említett 5V-os feszültség stabilizátorról, mert a sönt ellenálláson eső feszültséggel kevesebb esik a szenzoron. Ezért a szenzoráram méréshez olyan megoldást kell találni, ami nem befolyásolja a szenzor tápfeszültségét.

Az egyik lehetséges megoldás: olyan feszültségszabályozó használata, amelynél a feszültségszabályozáshoz szükséges visszacsatolás a tokon ki van vezetve, így lehetőség van a külső sönt utáni pontot visszacsatolni, és arra szabályozni. Ilyen tulajdonsággal rendelkezik a TL497A kapcsoló üzemű feszültség szabályzó [5].



10. ábra Szenzoráram mérés kapcsolási rajza

Amint az a 10. ábrán látható, a feszültség szabályzó kimenete (8-as láb) egy tekercsen keresztül olyan feszültséget állít elő, hogy a szenzor pontosan 5V-os tápfeszültséget kapjon. Ezt úgy éri el, hogy a komparálási bemenetre a szenzorra jutó feszültség kerül egy leosztás után. A sönt ellenállás tehát valamivel nagyobb potenciálra kerül, mint a szenzor (pont annyival, amennyi a söntön esik). Az ábrán is látható REF pont – leosztva - a kontroller ADC referencia bemenetére kerül, ezzel elérve, hogy a tápfeszültség kisebb mértékű (specifikációban szereplő 4,5 - 5,5V tartományon belüli) megváltozása sem okoz gondot a pozíciójel kiértékelésekor. Ugyanis a szenzor kialakításából adódóan a szenzor feszültsége arányos a szenzor tápfeszültségével. A söntön eső feszültség arányos a szenzoron átfolyó árammal, mivel a műveleti erősítő és a CMP bemenet, illetve a föld felé elfolyó áram értéke minimális (az CMP bemenet felé az ellenállásosztón kb. 1mA veszteség keletkezik, amelyet a kalibrálás során figyelembe kell venni, a műveleti erősítő bemenete felé elfolyó áram értéke elhanyagolható).

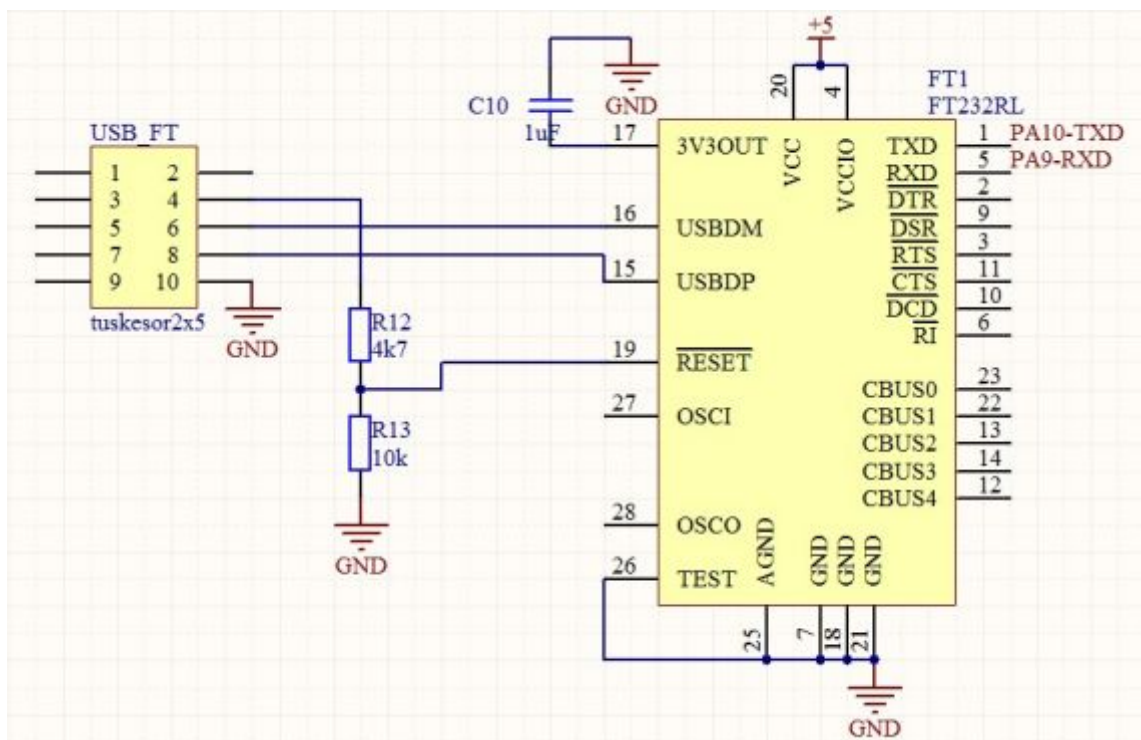
A feszültséget egy differenciális erősítő kapcsolás felerősíti, oly mértékben, hogy az ADC tartománynak megfelelően. Az áramjel feszültségé alakítása 10Ω-os sönt ellenálláson keresztül történt. Ez azt jelenti, hogy a 10-15mA tipikus áramérték esetén a söntön 100-150mV feszültség esik, a maximumnak vett 50mA esetén pedig 500mV. Ezt a jeltartományt egy ötszörös erősítésű differenciál erősítő kapcsolás a 0,5-2,5V jeltartományba transzformálja. Ehhez két 10kΩ, két 50kΩ ellenállás és egy műveleti erősítő 10. ábra szerinti bekötése szükséges.

Ezzel a módszerrel megoldott a szenzorok megfelelő tápfeszültség ellátása, illetve a szenzor által felvett áram mérése egyaránt.

4.6 FT232 USB UART konverzió

Amint azt a 3.3 pontban bemutatom, a PC-vel való kommunikációt a FTDI FT232 szintillesztő IC-vel valósítom meg. Ennek a megoldásnak az előnye az, hogy a fizikai réteg USB csatlakozót használ, de a felhasználói rétegben USART üzeneten keresztül folyik a kommunikáció. Az adattovábbítás megoldható lett volna közvetlenül USB-n keresztül is, de gyorsabb fejlesztést eredményezett egy általam már ismert megoldás alkalmazása. Mivel az SD kártya számítógépről való elérése USB kapcsolaton keresztül megoldott, a későbbiekben a kontroller és a PC közötti kommunikáció is folyhat itt.

A kapcsolás megtervezése nem túl bonyolult (ezért is esett rá a választás), az IC adatlapján szereplő példa alapján könnyen megoldható, nincs szükség semmilyen beállításra, a teljes konverziót az IC végzi [3].

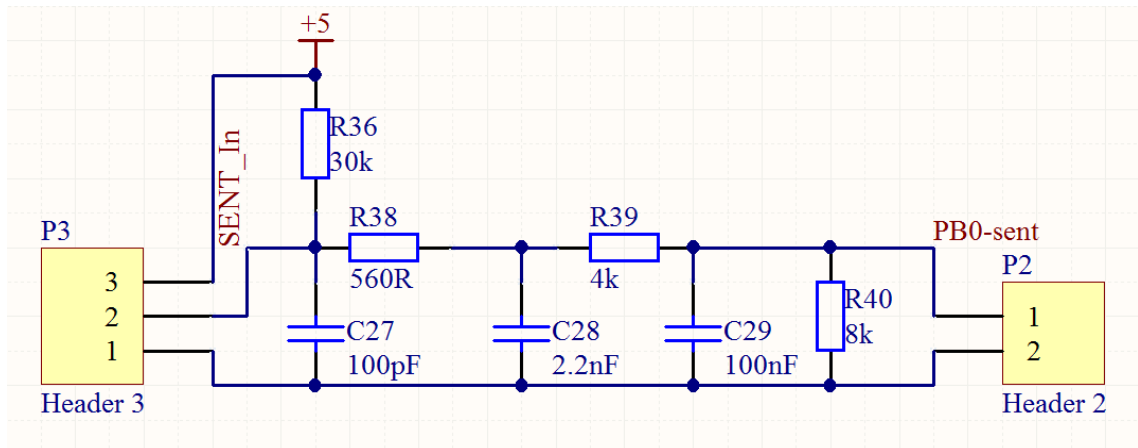


11. ábra USB UART szintillesztő kapcsolási rajza

4.7 SENT bemeneti kapcsolás

A protokoll az átviteli szekvencián kívül meghatározza azt is, hogy milyen bemeneti kapcsolással kell rendelkeznie a SENT-et fogadó eszköznek a megfelelő

működés elérése érdekében [1]. A specifikációban szereplő tartományok és értékek alapján a következő bemeneti védő-szűrőkapcsolás készült el.

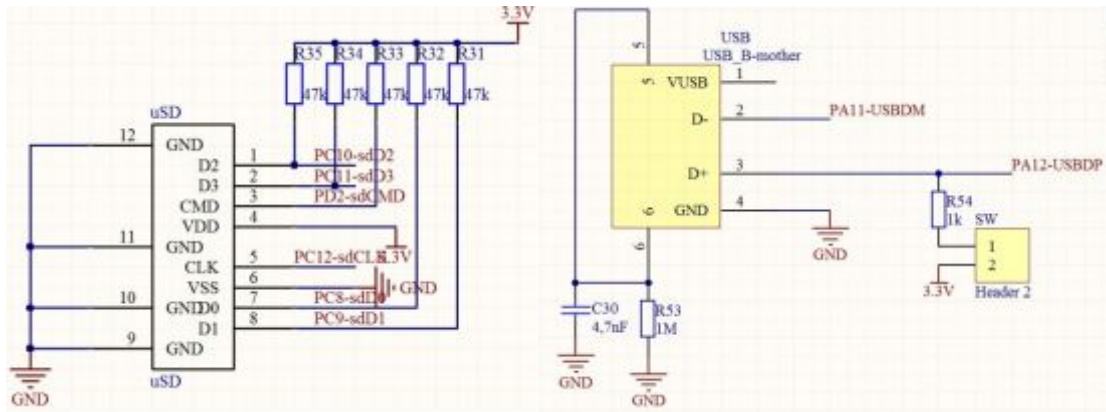


12. ábra SENT szenzorjel bemeneti védelme és szűrése

Mivel a különböző SENT-es eszközöknek a specifikáció szerint más-más szűrő értékek lehetnek szükségesek, ezért beépítésre került egy foglalat, amire a jövőbeli eszközök bemeneti szűrő tagjai illeszthetők rá egy kártya képében.

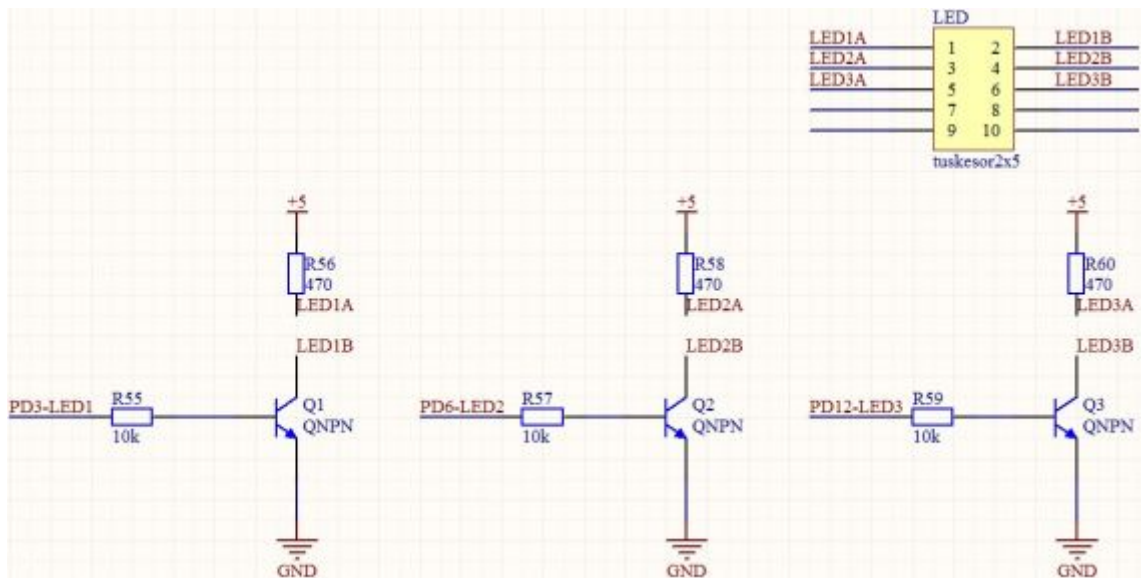
4.8 Egyéb, kiegészítő kapcsolások

A teljesség érdekében feltüntetésre kerülnek a következő kapcsolások is, bár ezek nem igényelnek különösebb tervezést. Elsőként a μ SD foglalat és az USB csatlakozó bekötése következik. Az USB csatlakozásra azért van szükség, mert így az SD kártya kivétele nélkül is el lehet érni a kártyát. Az SD bekötésénél a vezérlő lábakat felhúzó ellenállással a tápfeszültségre kell kötni, az USB bekötésénél az R_{53} ellenállás és C_{30} kondenzátor az ESD védelmet valósítja meg. Egy kapcsoló segítségével pedig kikapcsolható az SD kártya elérése az USB keresztül.



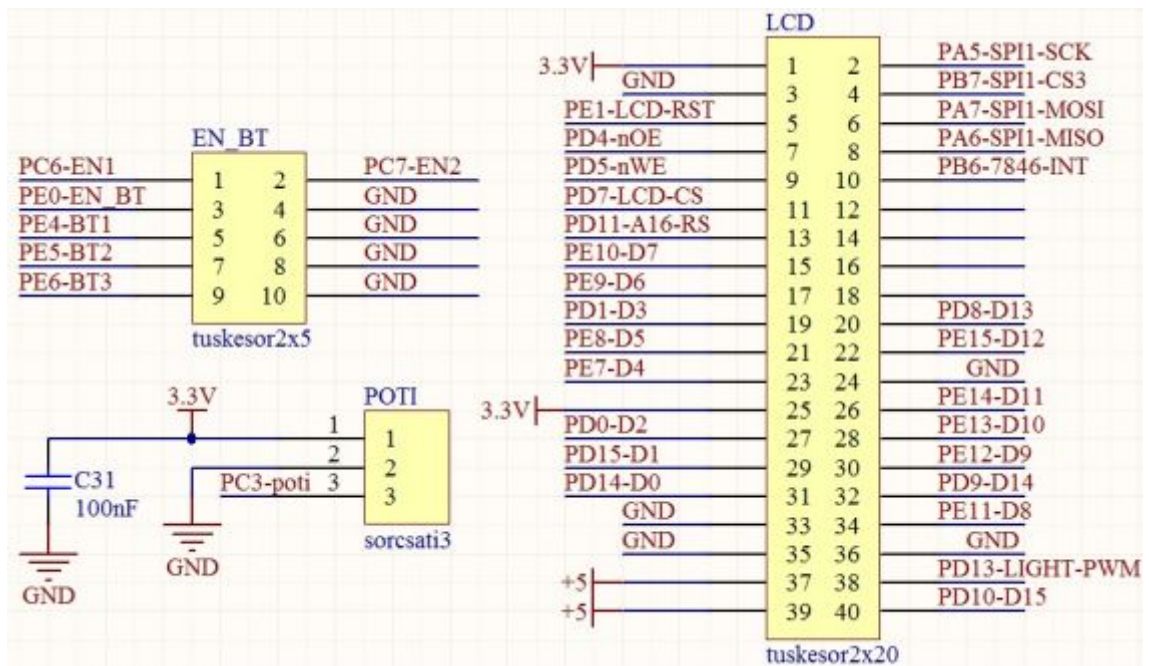
13. ábra µSD kártya és USB csatlakozó kapcsolási rajza

Következő kiegészítő kapcsolás az univerzális célra használható LED-ek. A LED-ek nem a nyomtatott huzalozású panelon kaptak helyet, hanem egy szalagkábelen keresztül csatlakoztathatóak.



14. ábra LED-ek kapcsolási rajza

Végül pedig következnek a felhasználói interfész részegységei a gombok, az encoder, a potenciométer és az LCD kijelző kapcsolási rajza.



15. ábra Kezelő szervek és kijelző kapcsolási rajza

4.9 Automatikus felismerés biztosítása speciális kábel használatával

Ahhoz, hogy a követelmények között megfogalmazott automatikus aktuátor felismerés teljesíthető legyen, valamilyen speciális megoldásra van szükség. A feladat az, hogy a mérendő beavatkozó a mérőeszközhöz való csatlakoztatása után a rendszer felismerje az aktuátort. Így csökkenteni lehet az esélyét annak, hogy az óvatlan, rossz bekötés hatására károsodjon az alkatrész. A problémára talált megoldás a következő: minden egyes aktuátornak külön kábelt kell készíteni, méghozzá úgy, hogy a vizsgáló felől egy DSUB15 típusú csatlakozó található. A csatlakozó alkatrészekontaktusain felül maradt pin-jeit fel lehet használni az egyes alkatrészek azonosítására. A kódolás lényege, hogy minden kábelnél a fennmaradó kontaktusok közül mindig másik van összekötve a földdel (egyszerre akár több is), melyek a controller belső felhúzó ellenállással ellátott GPIO lábaira csatlakoznak. Külső interrupt szintérzékeléssel meg lehet különböztetni az egyes kábeleket és így az aktuátorokat is. A 15 pin-es csatlakozónál, 9 szabad pin esetén maximum 512 eszközt lehet megkülönböztetni. Ez a kapacitás bőven nagyobb, mint a jelenleg használt aktuátor típusok száma (~30).

5 A vizsgáló berendezés szoftvertervének elkészítése

A hardver-szoftver szétválasztás alapján a következő modulok vannak megvalósítva szoftverből:

- Diagnosztikai funkciók:
- Pozíciószabályzás
- Pozíciószenzor jelének feldolgozása
- Szenzor- és motoráram érték feldolgozása
- SD kártya vezérlés
- RTC
- Kijelző kezelés
- Encoder és gombkezelés
- USART kommunikáció

Számos időkritikus feladatot kell ellátnia a szoftvernek, így a különböző típusú megszakítás rutinok száma magas (6). Ennek ellenére a megoldás nem igényelt különböző prioritású interrupt-okat, mivel a megszakítások rendben lefutottak a működés során, nem maradt ki közülük egy sem. A leggyakrabban futó rutinok futási aránya a következő:

- ADC IT: 17,8%
- TIMER IT: maximum 6%
- Összes IT: 25%

A végleges kódméret 45kbyte lett, melynek egyik oka a megannyi felhasznált periféria kezeléséhez szükséges illesztő program. A kód terjedelméből kifolyólag a szoftver ismertetése közben tartózkodom a kódrészletek bemásolásától, helyette magyarázó folyamatábrákkal szemléltetem a működést.

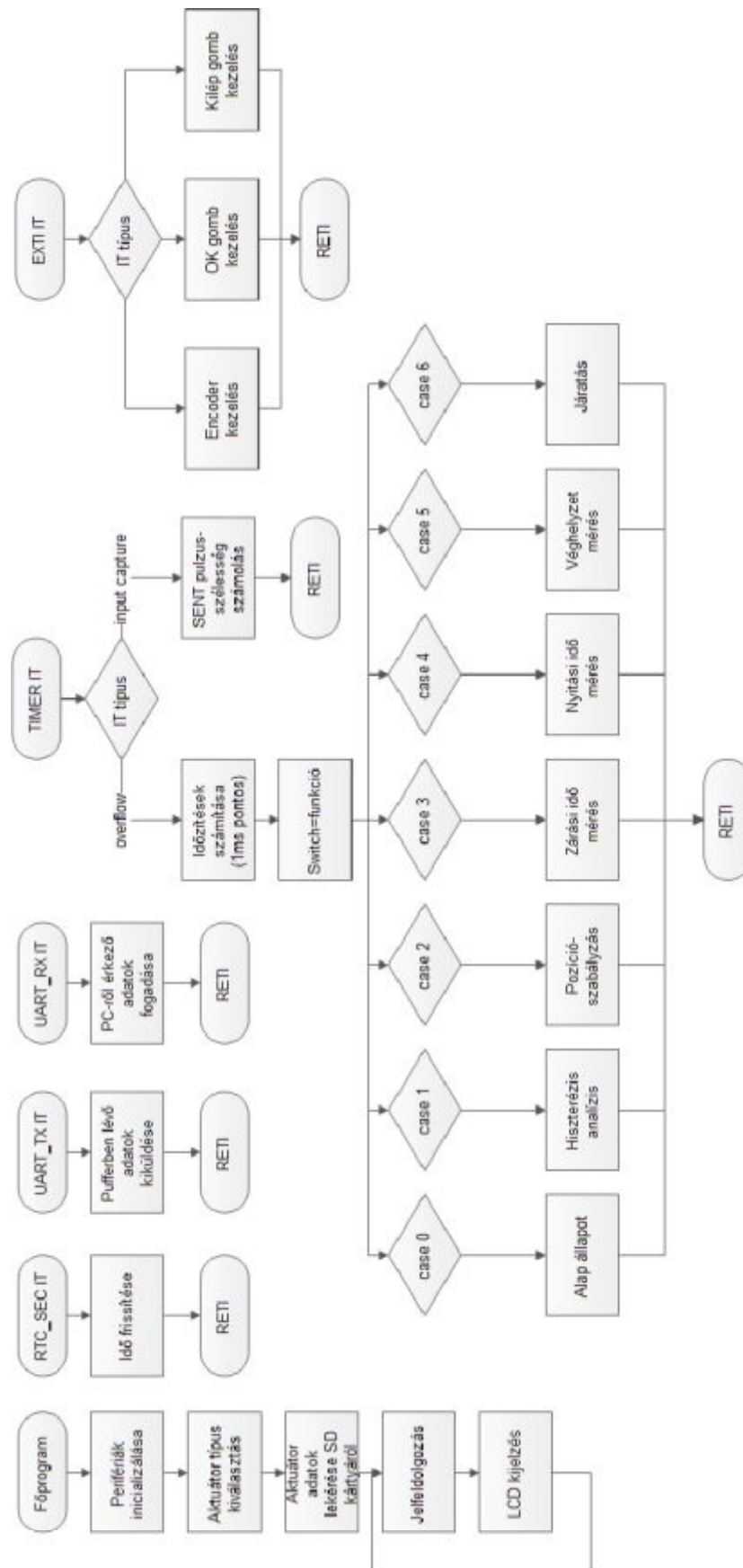
A következőkben bemutatom az elkészült szoftver felépítését, illetve a nem triviális modulokat részletesen is ismertetem.

5.1 Szoftver felépítésének bemutatása

A szoftver a folyamatábrán is látható főbb részekből áll:

- **Főprogram:** a perifériák inicializálása után lekérdezi a kiválasztott aktuátor specifikációban szereplő, a feladat szempontjából releváns adatait, majd belép a végtelen ciklusba, ahol feldolgozza az interrupt-ok által átadott adatokat és az üzemmódtól megfelelően megjeleníti ezeket a kijelzőn. A főprogram által hívott nem triviális függvények részletezése külön pontokban történik.
- **Timer interrupt:** a timer időzíti a pontos ütemezést igénylő feladatok végrehajtását. Két feladata van, egyrészt az 1kHz-es timer túlszordulásakor (1ms-ként) megvizsgálja, hogy melyik funkció van kiválasztva, és a megfelelőt meghívja a korábban beállított paraméterekkel, illetve ha SENT-es eszköz van csatlakoztatva a vizsgáló berendezésre, akkor a SENT jel előfeldolgozását is elvégezi a főciklus számára. A timer-ben futó függvények részletes leírása a nagy számuk és hangsúlyos mivoltuk miatt külön pontban található.
- **RTC interrupt:** Az RTC modul alapvető feladata, hogy az egyes mérések, illetve mérési eredmények archiválásához előállítsa az megfelelő időbélyeget. Az időbélyeg információ mind az analízisnél, mind a válogatásoknál fontos, mivel segíti a mért adatok későbbi visszakeresését és feldolgozását. Az időadat kinyerése polling-al történik, tehát az adott függvény lekérdezi az aktuális időadatot a felhasználás (pl. SD kártyára mentés) során. A funkció megvalósításához a kontroller belső RTC modulját használom. Ahhoz, hogy az időadat az eszköz kikapcsolása után se vesszen el, szükséges külső oszcillátor és elem illesztése a vezérlőhöz, a 4.2 fejezetben leírtak szerint. A modul úgy van inicializálva, hogy a külső oszcillátorról kapja az órajelet, illetve másodpercenként megszakítást kérjen, ilyenkor frissíti az érvényes idő és dátum adatokat.

- **ADC interrupt:** feladata az AD átalakító bemeneteire kötött analóg jelek konverziója. Az egyes mért értékek átlagolása is az interrupt-ban történik. Bár a jelfeldolgozást általában a főciklusban szokták elhelyezni, a processzor sebessége, illetve az adatkonzisztencia megtartása érdekében maradtak a megszakítás rutinban. A részletes működés ismertetése az 5.2.3 pontban található.
- **UART_TX interrupt:** a programkódban deklarálva van egy puffer tömb, ennek a használata a következő: az egyes diagnosztikai funkciók feltöltik a puffert előre meghatározott számú adattal, majd kiküldenek egy szinkron karaktert a soros port-on keresztül, ez automatikusan aktiválja az UART_TX interrupt-ot, ami a tömb minden egyes elemét sorban elküldi a soros port-on a számítógépnek. Ezzel a módszerrel elkerülhető, hogy a hosszadalmas soros port-os kommunikáció miatt az 1ms periódus idejű timer interrupt-ban hívott diagnosztikai függvények kicsússzanak az időből, mellyel felborítanák a teljes működést.
- **UART_RX interrupt:** a megszakításrutin feladata, hogy a számítógép által küldött, előre definiált adatokat eltárolja. A kommunikáció szintén szinkron karakter segítségével van megoldva, melyet a számítógép küld. Az interrupt addig vár, amíg a megfelelő karakter jön. Ekkor a szinkron karakter után jövő, előre definiált sorrendben érkező adatokat megfelelően eltárolja, majd újra vár a szinkron karakter érkezésére.
- **EXTI interrupt:** feladata a külső lábakon érkező esemény interrupt-os kezelése. Ezt a rutint az encoder és a kezelő gombok figyelésére használom. Ezen eszközök feladata a menüben való navigáció, paraméter beállítás és mérésindítás. A külső interrupt kérésre és a rutin működésére egy külön pontban részletesen is kitérek.



16. ábra A szoftver felépítése

5.2 Főprogram részletes bemutatása

A kontroller indulása után a vezérlést a főprogram kapja meg, amely első lépésként inicializálja a használt perifériákat, majd vár, amíg a kezelő egy aktuátort ki nem választ. Ez kétféleképpen történhet meg: egyfelől az eszköz felkínálja az általa ismert aktuátorokat, melyeket az SD kártyán található konfigurációs fájlból olvas ki. Ha a kezelő ezek közül kiválaszt egyet, akkor az eszköz megmutatja az alkatrész lábkiosztását a helyes bekötés megkönnyítésére, majd vár egy nyugtázó parancsra. A másik lehetőség, hogy a kezelő a 4.9 pontban bemutatott speciális kialakítású kábellel csatlakozik az eszközhöz, amely a kábel kialakítás miatt automatikusan felismeri a rádugott beavatkozót. Az esetleges hibák elkerülése érdekében, a program megjeleníti a kijelzőn az általa felismert aktuátor alkatrészsorszámát, illetve betölti az adott eszközhöz tartozó specifikációs adatokat és vár, amíg nyugtázó parancsot nem kap.

A nyugtázó parancs után mindkét esetben automatikusan megkezdődik a szelep nyugalmi és véghelyzeteinek megkeresése, mivel ezek az értékek szükségesek a további tesztek elvégzéséhez, nélkülük a tesztek hibás működést produkálnának. A teszt végeztével a kijelzőn megjelennek a mért értékek, annak megfelelően zöld, vagy piros színnel, hogy az adott mért érték beleesik-e a specifikációban megadott tartományba.



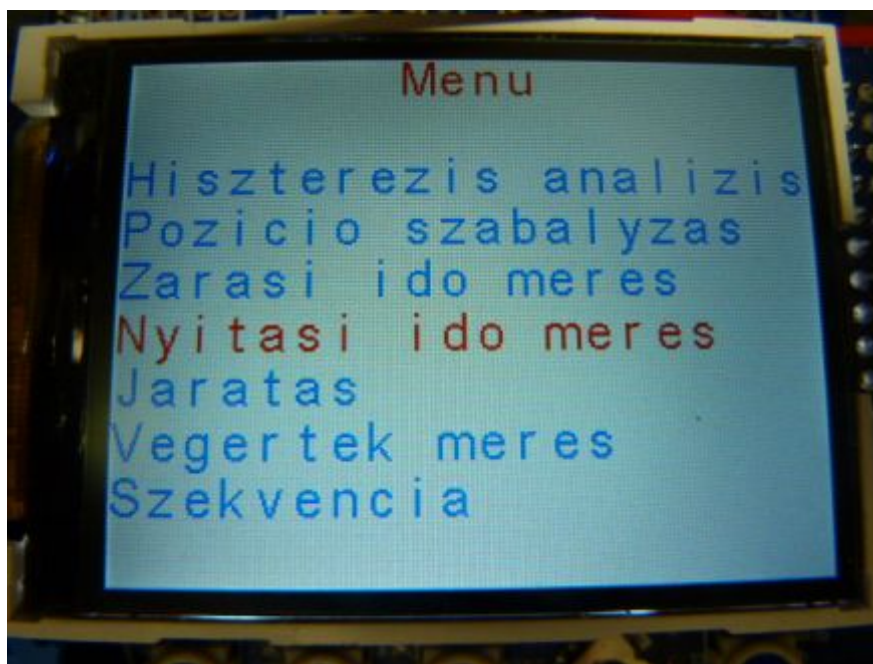
17. ábra Végérték mérés eredménye

A kijelzésen kívül az eszköz a mért értékeket - időbélyeggel ellátva - elmenti az SD kártyára, archiválás céljából. Újabb nyugtázó parancs után a program belép a

végtelen ciklusba, ahol a jelfeldolgozás történik. A jelfeldolgozás modulban egyrészt az ADC által szolgáltatott átlagolt értékek átszámolása folyik mV mértékegységre, mivel a kijelzőn így jelenik meg. Másrészt a szenzor és motor által felvett áram értéke is itt értékelődik ki (megfelel-e a specifikációban meghatározott határoknak). Mindemellett, ha SENT-es aktuátort csatlakoztatunk az eszközhöz, akkor szükséges a SENT protokoll alapján kiszámolni a pozíciószenzor értékét. Ennek pontos módját az 5.2.2.8 pontban részletezem.

5.2.1 Menürendszer bemutatása

Mivel ez egy vizsgáló berendezés, így a menürendszerben az egyes diagnosztikai funkciók találhatók meg, a következő sorrendben: hiszterezis analízis, pozíciószabályzás, zárasi idő mérés, nyitási idő mérés, véghelyzet mérés, járatás, szekvenciális végrehajtás. Az éppen kijelölt funkciót a kijelzőn piros színnel jelenítem meg, ahogy ez a 18. ábrán is látható.



18. ábra Menü megjelenítése

A menü programszervezése egy állapotgépen alapul, ahol az encoder segítségével lehet a szomszédos állapotok között váltani. Az OK gomb lenyomásával az éppen kijelölt diagnosztikai funkció, illetve ennek inicializáló függvénye hívódik meg. Ha szükséges, az inicializáló függvény további adatokat kér a kezelőtől az adott funkció elindításához. Ezek után elindul a meghívott mérés, melynek végén az eszköz kijelzi a mért értékeket, mértékegységükkel együtt. Hasonlóan az előbbieken leírtakhoz, ha a

mért érték belesik a specifikált tartományba, zöld színnel - ha nem, piros színnel jelenik meg a kijelzőn. Nyugtázás után a program visszatér a főmenübe, ahonnan újabb mérés indítható.

Mivel az LCD kezelése nagyrészt a menüből történik, ezért itt térek ki röviden az LCD kijelzőn való megjelenítés módjára.

5.2.1.1 LCD kezelés bemutatása

A színes grafikus LCD kijelző inicializálás és vezérlése a fejlesztőkörnyezettel járó periféria meghajtó segítségével történt. A driver lehetővé teszi karakterek, státusz bar-ok, illetve különböző jelek és függvények megjelenítését. A karakter mérete egyértelműen meghatározza az LCD-re írható karakterek számát. A képernyő 240x320 képpontból áll, jelenleg a betűméret 24x16 pixel. Így 10 sornyi és soronként 20 karakter fér el a kijelzőn. Amennyiben a későbbiekben a képernyő mérete szűkösen bizonyulna, a karakterméret csökkentésével növelhető az effektív kijelzőméret.

A fentiekből látható, hogy a kijelző menürendszerének állapotgépe a főciklusban található. Az LCD-re való írás időigényes feladat, emiatt nem megengedhető interrupt rutinban kezelni, veszélyeztetve a többi interrupt időben való lefutását.

5.2.2 Timer interrupt működésének bemutatása

A kontroller 3. timer-ének 3-4. csatornáját használom fel a működés során. A 3. csatorna úgy van inicializálva, hogy 1ms időközönként megszakítást kérjen. A megszakítás rutinban egyrészt különböző időzítéseket valósítok meg (ms-os pontossággal), másrészt itt található a diagnosztikai függvények állapotgépe. A menüben kiválasztott funkció itt kerül meghívásra minden egyes megszakítás alkalmával, amíg a mérés véget nem ér. Ez alól egyedül a szekvenciális végrehajtás a kivétel, mely gyakorlatilag átveszi a vezérlést a főprogramtól és a beállított függvényeket a megfelelő sorrendben meghívja. A sor végére érve visszaadja a vezérlést a főprogramnak. Mivel a diagnosztikai függvények itt hívódnak meg, ezért részletesen itt ismertetem működésüket.

5.2.2.1 Hiszterézis analízis

A hiszterézis görbe kirajzolásával tetten érhető a szelep akadása olyan esetekben is, amikor ez szemmel, illetve kézzel nem észrevehető. Ezen kívül a hiszterézis görbén

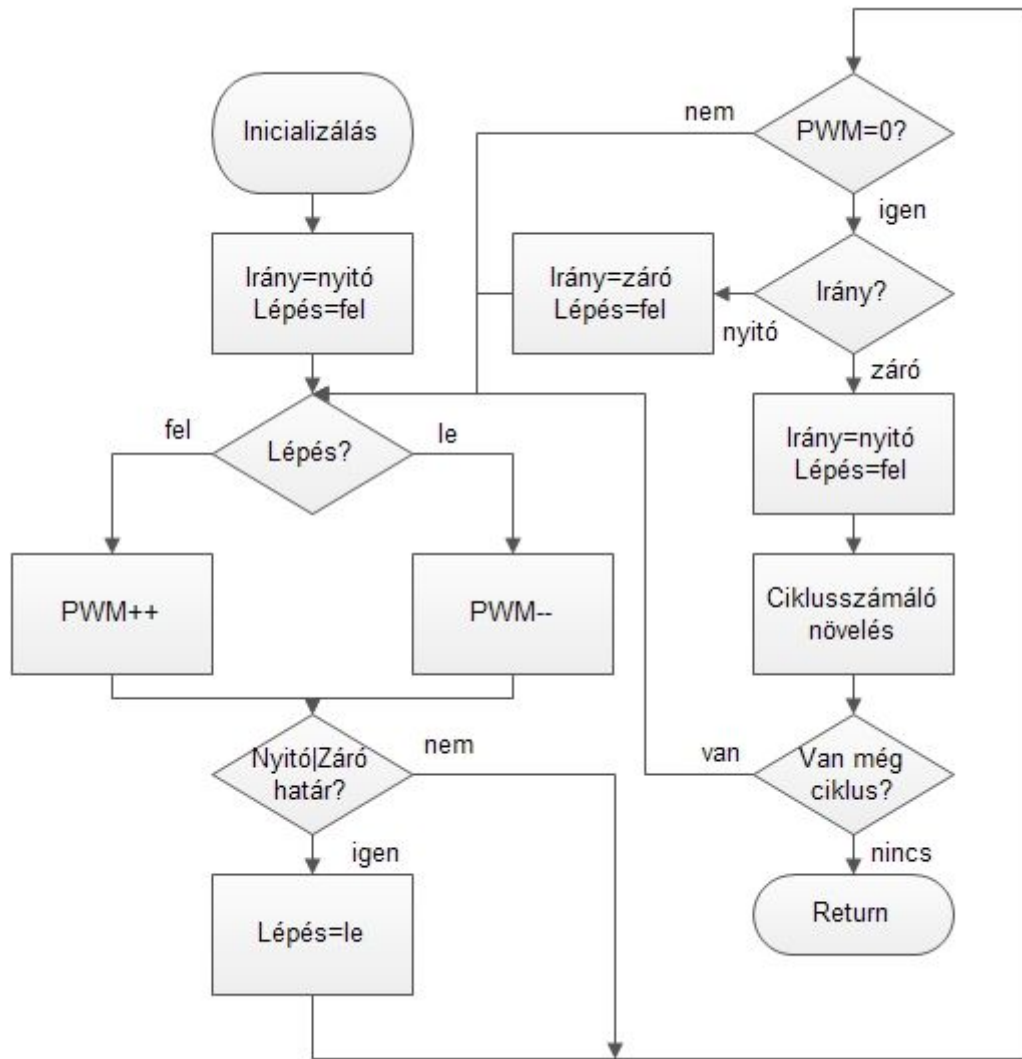
leolvasható, hogy a nyitáshoz és a záráshoz mekkora PWM jel szükséges, ez utalhat az adott beavatkozó hibás működésére.

A hiszterézis analízis teszt futtatásához a következő paraméterek megadására van szükség:

- a nyitó irányú PWM jel értéke százalékban megadva
- a záró irányú PWM jel értéke százalékban megadva
- PWM lépésköz – ms-ként mennyivel változzon a PWM jel
- ciklusszám

A funkció működése a következő: 1%-os PWM-ről indulva először nyitó irányban interrupt hívásonként (ms-ként) a lépésköz mértékével növeli a motorra kiadott PWM feszültségjel értéket a beállított nyitó irányú határig, majd visszacsökkenti a kiadott PWM jelet szintén a lépésköz nagyságú lépésekben egészen 0%-ig (a legkisebb lépésköz 1% ms-ként). Ekkor záró irányban vezérli meg a motort és a beállított záró irányú határig növeli a PWM jelet, majd megint visszacsökkenti 0%-ra. Ezt a folyamatot addig ismétli, amíg el nem éri a beállított ciklusszámot. A végrehajtás közben minden megszakítás rutin végén feltölti a már említett USART puffert a következő értékekkel: pozíció jel 1 és 2 (ha van), kiadott PWM jel, szenzor áram, motor áram. Ezek az értékek a mérés folyamán a főciklusban szintén kijelzésre kerülnek.

A hiszterézis teszt végeztével az eszköz eltárol 8 jellemző pontot az SD kártyán. Ezek a pontok a következők: a szelep két végértéken mérhető feszültsége, a felfutó és lefutó élen mérhető - a végérték feszültségéhez képest 10%, 50%, 90%-ú pontokhoz tartozó - PWM érték, illetve ezen párok közti különbség PWM értéke. Ezen értékek reprezentálják a görbe lényeges pontjait, mely alapján a teljes görbe tárolása nélkül a vizsgált alkatrész eredményei kvalitatívan összehasonlíthatóak más alkatrészek eredményeivel.



19. ábra Hiszterézis analízis folyamatdiagramja

5.2.2.2 Pozíciószabályzás

A szabályzás feladata, hogy a paraméterként kapott feszültség alapjellel megegyező szenzor feszültségen tartsa a szelepet, illetve az alapjel változása esetén a szelep túllövés és offset hiba nélkül, viszonylag gyorsan kövesse az alapjelet. A szabályzás megvalósításának egy lehetséges módja a PID szabályzó tervezése. Ennek legnagyobb előnye, hogy az algoritmus könnyen megvalósítható, és nem igényel nagy erőforrást a folyamatos futtatása. Hátránya viszont, hogy a szabályzási paraméterek beállítása legtöbb esetben empirikus úton történik. Léteznek különböző módszerek (pl. Ziegler-Nichols módszer), amelyekkel közelítőleg optimális megoldást lehet találni, de a finomhangolást mindenképpen manuálisan kell végrehajtani. A szabályzó paramétereinek beállítását részletesen a 8. pontban ismertetem.

A szabályzó működésének megértése végett röviden ismertetem a PID szabályzó működésének alapjait:

A PID szabályzó úgy van kialakítva, hogy reagáljon az aktuális hibára, a múltbeli hibára az aktuális pillanattig bezárólag, valamint a hiba jövőbeli alakulására. Technikai rendszerekben a múltbeli hibát jellemezhetjük a hibaintegrállal, a jövőbeli hibát pedig a hibatrenddel vagy az azzal kapcsolatban álló hibaderiválttal. Ebből a három párhuzamos csatornából épül fel a szabályzó, egyszerű kivitelezhetőségének köszönhetően hamar elterjedt lett a mérnöki megoldásokban, és még mindig sokat megőrzött a népszerűségéből, bár az idők folyamán sokkal intelligensebb szabályzók is megjelentek [6].

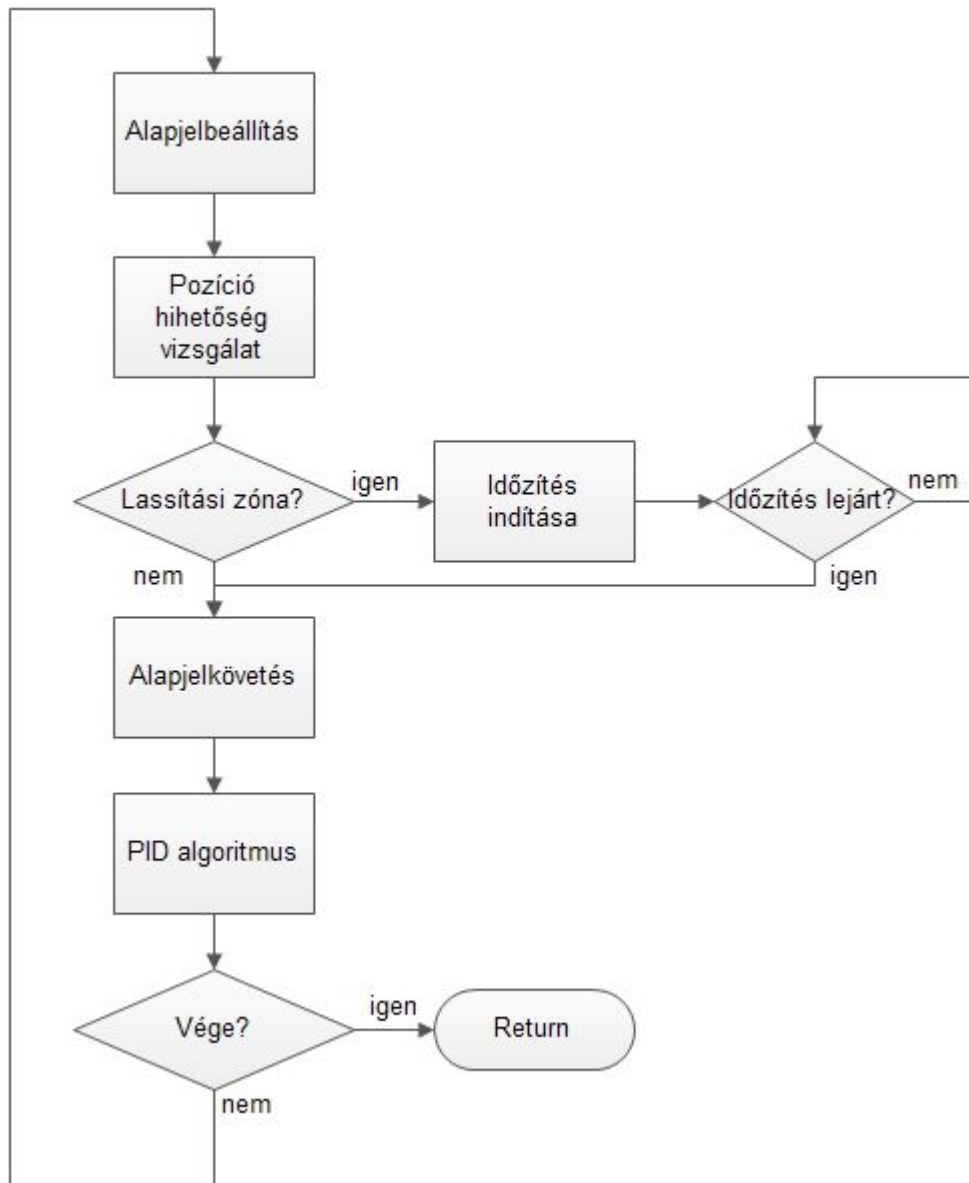
A hibajel az alapjel és az aktuális pozíciójel előjeles különbsége. Ezek alapján az algoritmusban a P tagot össze kell szorozni a mindenkor aktuális hibával, a I tagot a hibák előjeles összegével, a D tagot pedig az aktuális és a legutóbbi hiba különbségével, majd ezeket előjelesen össze kell adni, így megkapjuk a beavatkozó PWM jelet. A helyes működéshez azonban további kiegészítő lépéseket kell tenni. Először is a kiszámolt PWM jelet korlátozni kell, mivel a 100% kitöltésnél nagyobb jelet nem lehet kiadni. Másodszor pedig érdemes az integráló tagot is korlátozni, mert a folyamatos összegzés túlsorduláshoz vezethet.

A szabályzás megkezdése előtt a program hihetőség vizsgálatot végez a szenzoron, mivel hibás szenzor esetén a szabályzás legtöbb esetben nem lehetséges.

A szelepek a véghelyzeteiket az esetleges károsodás elkerülése érdekében maximum 1V/s (szenzor feszültségben) szögsebességgel érhetik el, ezért szükséges valamilyen sebesség korlátozás beiktatása a szabályzó körbe. Erre több módszer is rendelkezésre áll. Az egyik megoldás a kaszkád szabályzó alkalmazása, ahol a külső hurok a sebesség alapjelre szabályoz, és előállítja a pozíció alapjelet a belső huroknak. Ez a struktúra azonban nem illeszkedik a feladathoz, mivel alapvetően továbbra is pozíció alapjelet lehet csak előírni és értelmes sebesség alapjel nincs a rendszerben, csak egy sebesség felső korlát, amit nem lehet átlépni a véghelyzetek közelében. Ezen kívül a kaszkádosítás felesleges bonyolultságot hoz a szabályzásba.

Az általam választott megoldás nem közvetlenül a szelep sebességét korlátozza, hanem alapjel ugrás esetén fokozatos alapjel növelést valósít meg. Tehát az alapjel változásának sebességét korlátozza, ezzel befolyásolva a szelep sebességét. Ezt úgy

lehet elérni, hogy alapjel váltás esetén a valós alapjel az aktuális pozíció lesz és ms-ként egy bizonyos értékkel növelve közelíti a megváltozott alapjelet. A lépésköz állításával lehet a szelep szögsebességet szabályozni.



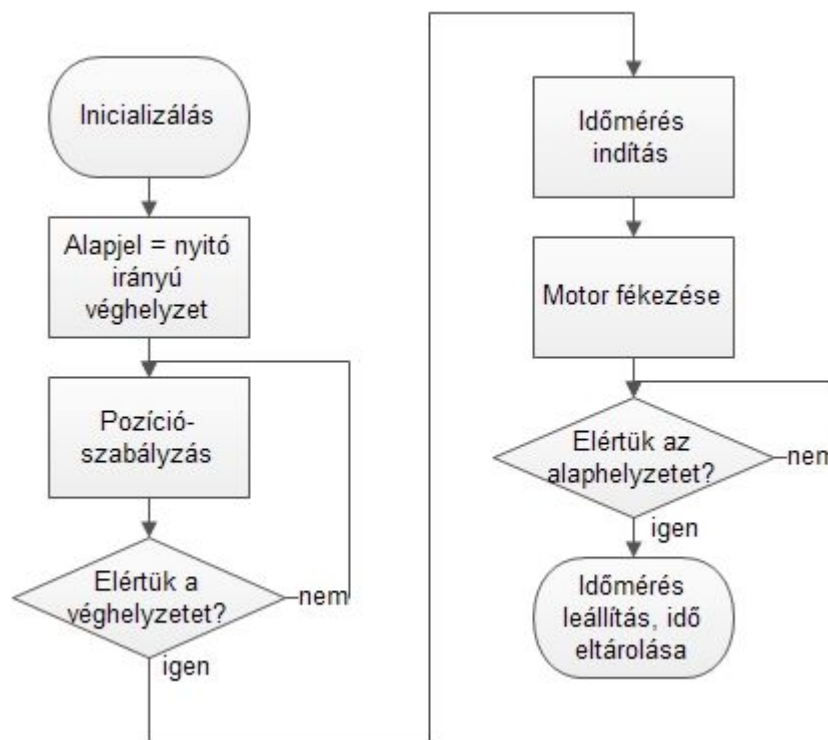
20. ábra Pozíciószabályzás folyamatdiagramja

5.2.2.3 Zárási idő mérés

A mérés a vészfunkció tesztelését teszi lehetővé. A vészfunkció, például fojtószelep esetén a következő: ha valamilyen oknál fogva a szelepet mozgató motort nem lehet vezérelni, a spirálrugók visszatérítik a szelepet egy enyhén nyitott állapotba (alap, vagy nyugalmi állapot), hogy az autó ne fulladjon le (teljesen zárt állapot esetén), illetve ne gyorsuljon tovább (nyitott állapot). Tehát a vizsgálat tárgya, hogy a szelep visszatér-e az alaphelyzetébe és mennyi idő alatt tér vissza. Az időt befolyásolja a

szelep mechanikus súrlódása, a rugó erőssége és a motor fékhatásának erőssége. A méréssel ezen erők együttes hatásáról lehet információt kapni.

A funkció működése a következő: a pozíció szabályzásnak alapjelül a korábban kiszámolt nyitott állapotú véghelyzetet adja értékül. Amikor a szelep eléri a végérték helyzetét, a program elindít egy számlálót, illetve a DC motor kontaktusait rövidre zárja, hogy a motor fékeződjön. Ebben az esetben a szelepbe épített spirálrugó a motor fékező hatását legyőzve, visszahúzza a szelepet a nyugalmi állapotába. Amikor a szintén korábban kimért nyugalmi állapotot eléri a szelep, a program leállítja a számlálót és elmenti az értékét. Ez az érték lesz a zárási idő ms-ban kifejezve, mivel a számláló, illetve az egész függvény az 1kHz-es timer interrupt-ban fut. A mérés befejeztével a megszakítás rutin megjeleníti a mért értéket a kijelzőn, illetve eltárolja időbélyeggel ellátva az SD kártyán. Nyugtázás után a programvezérlést visszakapja a menürendszer, ezzel lehetővé téve újabb diagnosztika lefuttatását.



21. ábra Zárási idő mérés folyamatdiagramja

5.2.2.4 Nyitási idő mérés

A teszt feladata, hogy megvizsgálja a szelep alapállapotból képes-e a nyitott véghelyzet 90%-áig kinyitni a specifikációban meghatározott időn belül. Erre a feladatra két megoldás is kínálkozik. Az első a pozíciószabályzást használja fel ahhoz,

hogy elérje a kívánt pozíciót a legrövidebb idő alatt. Mivel a specifikációban csak az van meghatározva, hogy az alapállapottól a végállapotig mekkora a rendelkezésre álló maximális idő, a szabályzás sebessége kritikussá válik. Ugyanis, ha a szabályozott szelep nem teljesíti az időspecifikációt, nem mondható teljes biztonsággal, hogy a darab hibás (nem lehet a beszállítónak reklamációval elküldeni), mivel elképzelhető, hogy egy gyorsabb szabályzással képes lenne teljesíteni a rászabott időkeretet. Mindemellett a szelepek állapota közel sem egyforma, így elképzelhető, hogy a fejlesztéshez használt szelepeken a szabályzás megbízhatóan teljesíti a specifikációt, de egy használtabb szelepen már hibát jelez. Így adódik a második megoldás: a nyitás idejére maximális nyomatékot kap a motor, majd valamilyen módon (ellenkező irányú vezérlés) a program megállítja a szelepet. A mérés végpontja nagyon közel van a szelep véghelyzetéhez, így felmerül a veszélye annak, hogy a szelep nekicsapódik a véghelyzetének és maradandó károsodást szenved.

Az imént említett okokat mérlegelve egy gyors, de túllövés nélküli szabályzás végzi a mérést. A legfőbb ok, hogy ezáltal kizárható a szelep véghelyzeteknek való túl gyors nekivezérlése, mely károsodást és a garancia elvesztését okozza.

A függvény működése a következő: alap állapotból indulva a pozíciószabályzás megkapja alapjelül a korábban kimért véghelyzeti pozíció 90%-át. Ezzel egy időben elindul a számláló is. A szelep nyílása közben ms-ként a program kiértékeli, hogy a pozíció átlépte-e már a beállított határt, ha igen, akkor kikapcsolja a szelep vezérlését, és leállítja a számlálót (hasonlóan a zárási idő méréshez). A szelep motorfék hatása mellett visszaáll a nyugalmi pozícióba. A számláló értéke egyrészt megjelenítésre kerül a kijelzőn, másrészt eltárolódik az SD kártyán, időbélyeggel ellátva.

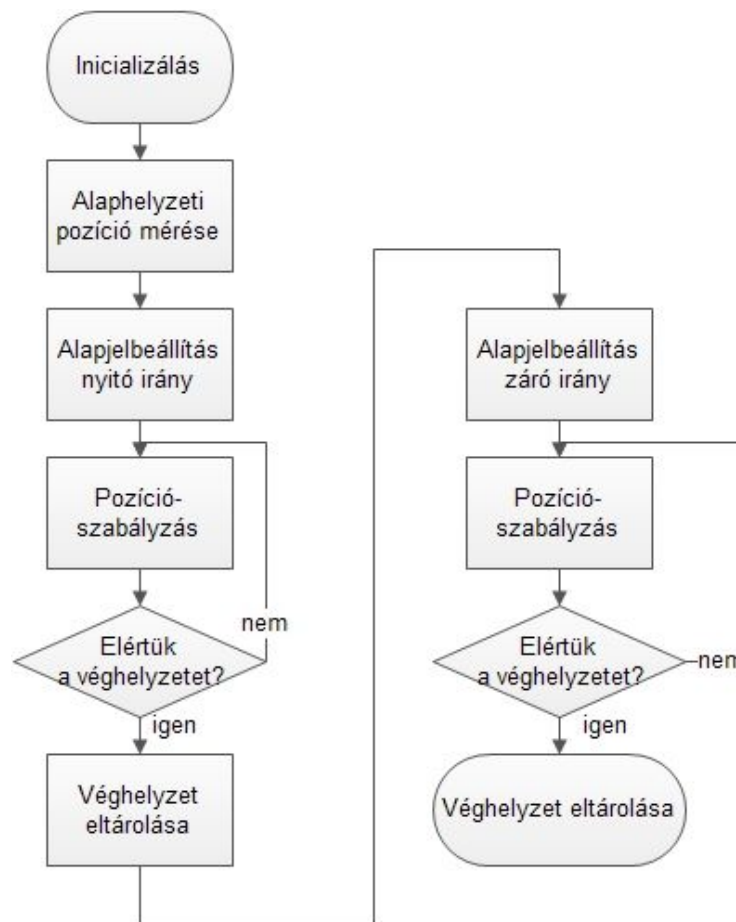


22. ábra Nyitási idő mérés folyamatdiagramja

5.2.2.5 Véghelyzet mérés

A függvény segítségével ellenőrizhető, hogy a szelep eléri-e a specifikációban meghatározott véghelyzeteit, illetve ezeken a helyeken a pozíció szenzor feszültség értéke a megadott határokon belül található-e.

A program első lépésként eltárolja a nyugalmi helyzetben érzékelhető szenzor feszültséget. Ezek után a pozíció szabályzás segítségével addig növeli az alapjelet nyitó irányba, amíg vagy elérjük a maximális PWM kitöltést, vagy az 1 másodperccel korábbi pozíció érték megegyezik a jelenlegivel. Ekkor feltételezhető, hogy a szelep elérte a nyitó irányú véghelyzetét. A program ezután, az előzőhöz hasonlóan megkeresi a záró irányú véghelyzetet is. Azoknál az aktuátoroknál, ahol az áttétel csigakerékkel van meghajtva, nagy nyomaték érhető el, mely a végállapotokban a mechanikát károsíthatja. Ilyenkor az algoritmus csak a megadott érték elérését vizsgálja meg. Természetesen ezt a mérést meglehetősen alacsony sebességgel kell végezni, az esetleges károsodás elkerülése végett, illetve korlátozni kell a PWM jelet is (nem érheti el a 100%-ot). A véghelyzetek megtalálása után a függvény megjeleníti a kijelzőn a mért értékeket és időbélyeggel ellátva eltárolja az SD kártyán.



23. ábra Véghelyzet mérés folyamatdiagramja

5.2.2.6 Járatás

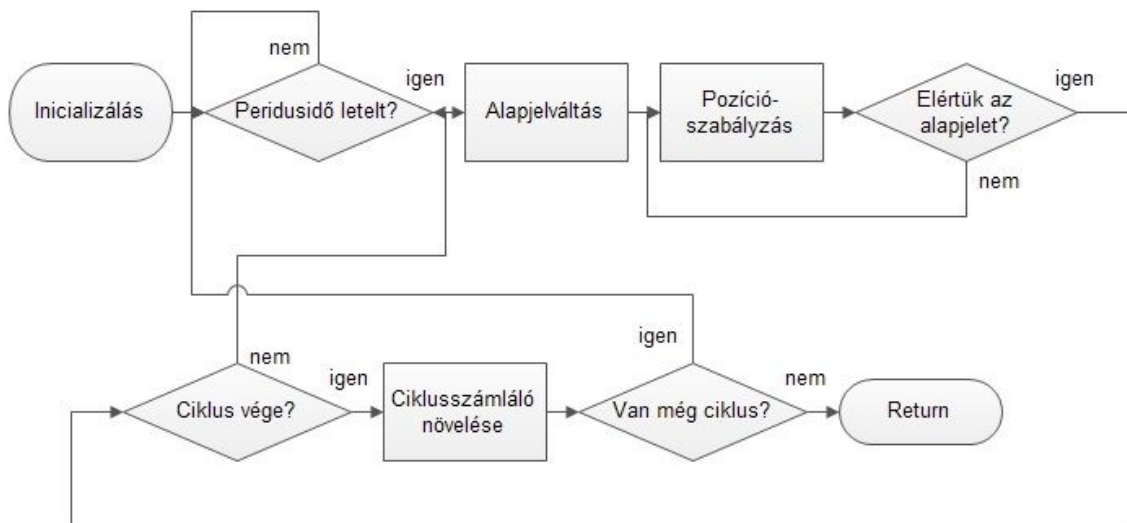
A járató függvény segítségével hosszabb időtartamú tesztek lehet végezni. Számos alkalommal igény van több órás (esetleg napos) járató tesztek végrehajtására,

miközben az aktuátort különböző nagyságú és sebességű hőingadozásnak teszik ki. Ezekkel az öregítési tesztekkel szimulálható az adott alkatrész több éves használata.

A helyes működéshez szükséges megadni a következő paramétereket:

- két pozíció érték százalékban megadva a nyitási véghelyzethez képest
- alapjel váltási frekvencia
- ciklusszám

Ez a függvény is a pozíciószabályzást használja fel működése során. Alapjelnek a két megadott pozíciót adja értékül, az alapjelváltási frekvencia gyakoriságával. A ciklusszám eléréseivel leáll a működés és visszatér a program a menürendszerbe. Mérés közben, ha hibát észlel jegyzi, és a mérés végén SD kártyán eltárolja.



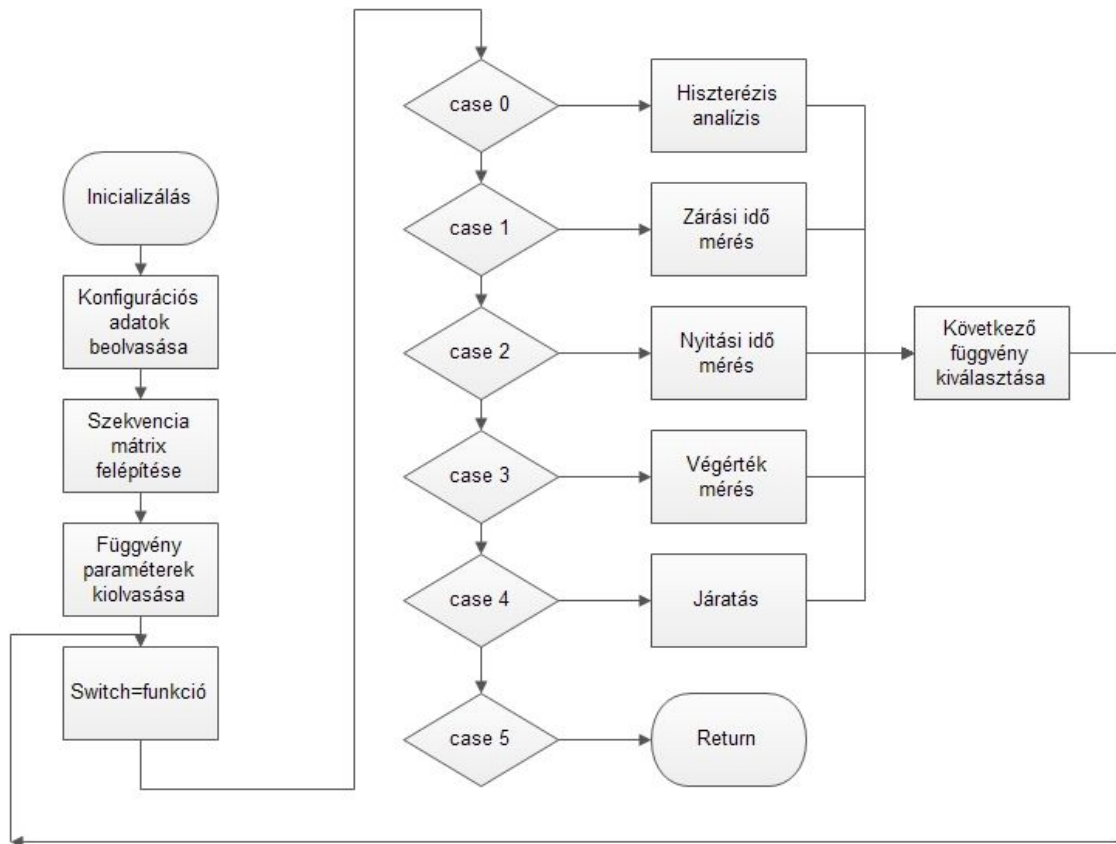
24. ábra Járatás folyamatdiagramja

5.2.2.7 Szekvenciális végrehajtás

Ennek a függvénynek főleg a válogatásoknál van jelentősége. Lényege, hogy a fent említett teszteketszöveges sorrendben és számban meghívva egy teszt szekvenciát futtat az adott alkatrészen. Minden egyes teszt eredményét dokumentálja az SD kártyára, illetve a kijelzőn is megjeleníti.

Meghívása után a programvezérlést átveszi a főciklustól és az SD kártya szekvenciát tartalmazó fájljából kiolvassa a teljes tesztsekvenciát. A fájl soronként tartalmazza az adott funkció ID-jét, illetve a hívásához szükséges paramétereket. Az ID alapján a program tudja, hogy melyik adat mire vonatkozik, így végighaladva a

szekvencián sorban meghívja a diagnosztikai függvényeket Végül pedig visszatér, visszaadva a vezérlést a főciklusnak.



25. ábra Szekvencia folyamatdiagramja

5.2.2.8 SENT adatok feldolgozása

A timer megszakítás rutin másik feladata, hogy az esetleges SENT jeleket fogadja és előkészítse kiértékelésre. A megszakításban csak az egyes fél-byte-ok eltárolása történik, a kiértékelést a főciklus hajtja végre. Ennek oka, hogy az interruptban nem lenne elég idő az adat kiszámolására. A 3-as időzítő 3-as csatornáját úgynevezett input capture módba kell inicializálni, ezzel figyelve a lefutó éleket. A SENT jel fogadása a következőképpen zajlik: az input capture értékekből a program kiszámolja az adott impulzus szélességét (két lefutó él között eltelt idő). Ha ez az érték nagyobb, mint a protokollban meghatározott 56 tick alsó specifikált küszöbértéke, akkor szinkronizációs üzenet érkezett és elkezdődik az adatok fogadása. A program minden impulzus szélességét eltárolja Egy üzenet 9 impulzusból áll, a 2.1.1 fejezetben bemutatott szekvencia értelmében. Az adatok tárolása két puffer tömbben történik, míg az egyiket a megszakítás rutin feltölti, a másikat a főciklus kiolvassa.

A jobb érthetőség kedvéért az adatok kiértékelését is itt ismertetem, annak ellenére, hogy ennek helye nem a megszakításban, hanem a főciklusban van. A program a megtelt puffer tömbből kiolvassa az első értéket, ami a szinkronizációs impulzus. Ennek a szélességét elosztva 56-al megkapja egy tick hosszát. Ezek után a protokollban meghatározott módon visszaszámolja az egyes fél-byte-ok értékeit:

$$\text{nibble}[x] = (\text{adott impulzus szélesség} - 12 \text{ tick}) \div \text{tick},$$

A megfelelő adatokból visszaállítja a pozíciójelet:

$$\text{pos} = \text{nibble}[0] \times 256 + \text{nibble}[1] \times 8 + \text{nibble}[2]$$

Végül kiszámolja az ellenőrzőösszeget, amely ha megegyezik a CRC tábla megfelelő elemével, akkor kiadja a CRC OK jelzést, ezzel elismerve az imént kiszámolt pozíciójel helyességét.

5.2.3 ADC interrupt működésének bemutatása

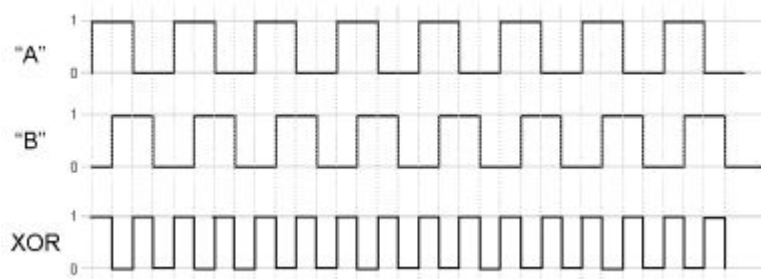
A 32 bites kontroller AD átalakítója jóval intelligensebb, mint például az AtMega128 azonos funkciója. A 8 bites kontroller esetén a konverzió után minden alkalommal külön csatornát kellett váltani, továbbá le kellett kezelni, hogy a csatornaváltás utáni első konverzió érvénytelen adatot szolgáltat. Ezzel szemben az STM32-nél felállítható egy konverzió sorrend (egy csatornát a sorban többször is lehet szerepeltetni, ha szükséges), amely alapján az ADC automatikusan végighalad a beállított csatornákon, ráadásul a mintavételi idő csatornánként igény szerint változtatható. A konverzió befejezése után pedig képes DMA (Direct Memory Acces) kérést adni, így gyorsabban és a kontroller lefoglalása nélkül kerülnek a mért értékek a változóba. Mint ahogy azt már említettem a 4.4 pontban, a mintavételi idő beállítását körültekintően kell végezni. A mérések alapján 5,11µs érték adódott. A jelenlegi konstrukcióban a következő értékeket méri az AD átalakító: pozíciószenzorok feszültségjelei, potenciométer feszültsége, motor által felvett árammal arányos feszültség és a szenzor által felvett árammal arányos feszültség.

5.2.4 EXTI interrupt működésének bemutatása

A kontroller lehetőséget nyújt arra, hogy bármely GPIO lábára lehet külső megszakítást kérni. Húsz különböző külső megszakítást tud kezelni a vezérlő. Az egyes lábakat hozzá kell rendelni a megfelelő külső megszakítás kezelőhöz. Annyi megkötés

van, hogy egy port adott számú lábához az azonos számú kezelőt kell csatlakoztatni. Tehát például a B port 6. pin-jét csak a 6. megszakítás kezelőn lehet figyelni. Ez azt is jelenti, hogy azonos sorszámú különböző port-on lévő lábak egyidejű megfigyelése nem engedélyezett.

A feladatban a külső megszakításkezelést az encoder és a gombok figyelésén kívül a speciális mérőkábelek azonosítására használom. Az encoder egy olyan jeladó, ami egy tengely elfordulását érzékelve az elfordulás szögével arányosan valamilyen elektromos jelet szolgáltat. Jelen esetben elfordulás esetén jelváltás történik mindkét lábon a következő ábra alapján.



26. ábra Encoder működése

A gombok kezelése belső felhúzó ellenállás és lefutó él érzékelésével történt. Az encoder jelének értelmezéséhez is belső felhúzó ellenállásra volt szükség. Továbbá a megszakítás kezelő úgy lett inicializálva, hogy az egyik lábon mérhető jel lefutó éle esetén interrupt-ot generáljon, az interrupt rutinban pedig a másik láb állapotát kell kiolvasni, hogy el lehessen dönteni az encoder csavarásának irányát. Mivel mindkét periféria mechanikus alkatrész, ezért figyelmet kell fordítani a megfelelő pergésmentesítésre.

Az aktuátorok 4.9 pontban ismertetett azonosításánál a megfelelő lábak szintvezérelt megszakításra inicializáltak. A kontaktusok definiált sorrendje alapján, a beolvasott értékek megfeleltethetőek egy bináris számnak. Ebből megkapható az adott beavatkozó sorszáma, ami az SD kártyáról beolvasott adatokból egyértelműen azonosítja az adott alkatrészt.

6 Nyomtatott áramköri kártya tervezése

A diplomaterv keretében feladat volt a megtervezett áramkör nyomtatott huzalozású kártyájának elkészítése is. A kapcsolási és a huzalozási rajz is az Altium Designer kombinált tervezőprogram használatával történt.

6.1 Méretezés

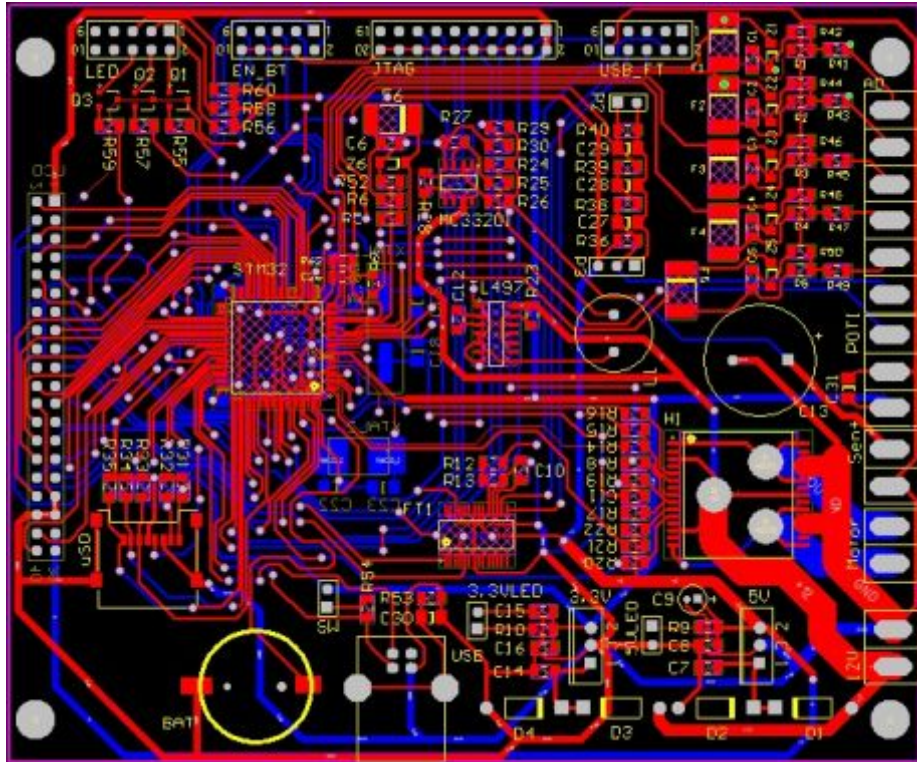
A panel PCB tervének megtervezése során a kapcsolási rajzban meghatározott összeköttetések megfelelő huzalozásán kívül hangsúlyt kell fektetni a mechanikai tulajdonságok megfelelő átgondolására is. Az alkatrészek méretét figyelembe véve meg kell becsülni a panel méretét, és ehhez első lépésként megfelelő méretű műszerdobozt kell keresni. A műszerdoboz méretei meghatározzák a PCB pontos méretét. Esetemben ez 126x105mm-re adódott. Általában a dobozokban elhelyeznek rögzítési pontokat, ezeket érdemes követni. A csavarozási pontok helyét és méretét pontosan kell a meghatározni, mert a kész panelen utólag meglehetősen nehézkes a változtatásuk.

6.2 Alkatrészek elhelyezése

A terv elkészítése a következő pontokból állt:

Elsőként az alkatrészek modulonkénti elhelyezése volt a feladat. A különböző csatlakozási pontokat (szalagkábel és sorcsatlakozók) mindenképpen a kártya szélén kell elhelyezni. Az aktuátorhoz kapcsolódó csatlakozókat egymás mellé helyeztem, így az ADC bemenetek, a szenzoráram mérőkapcsolás és a motorvezérlő egymás alá kerültek a panel jobb oldalán. Ide került még a potenciométer, illetve alul helyezkednek el egymás mellett a tápfeszültségeket előállító stabilizátor IC-k és kiegészítő alkatrészeik. A szalagkábel csatlakozóval rendelkező kapcsolások a panel felső részén találhatóak a következő sorrendben: LED csatlakozó, encoder és gombok csatlakozója, JTAG csatlakozó, FT232 szintillesztő IC csatlakozója. A panel alján helyeztem el az USB csatlakozót, az SD kártya foglalatot, illetve az RTC-hez tartozó elemtartót. A SENT szűrő bemenet és kártya helye a PCB közepén található. A mikrokontroller a kártya közepétől enyhén balra tolva kapott helyet, mellette az LCD kijelzővel. Ezt a két elemet mindenképp egymás mellé kellett helyezni, mivel közöttük fut a legtöbb összeköttetés. A kontroller kiegészítő elemeit, mint a szűrőkondenzátorokat és

oszillátorokat a panel alsó felén helyeztem el, ezzel is megkönnyítve a nehézkesnek ígérkező vezetékeezést.



27. ábra Az eszköz elkészült layout terve

6.3 Huzalozás elkészítése

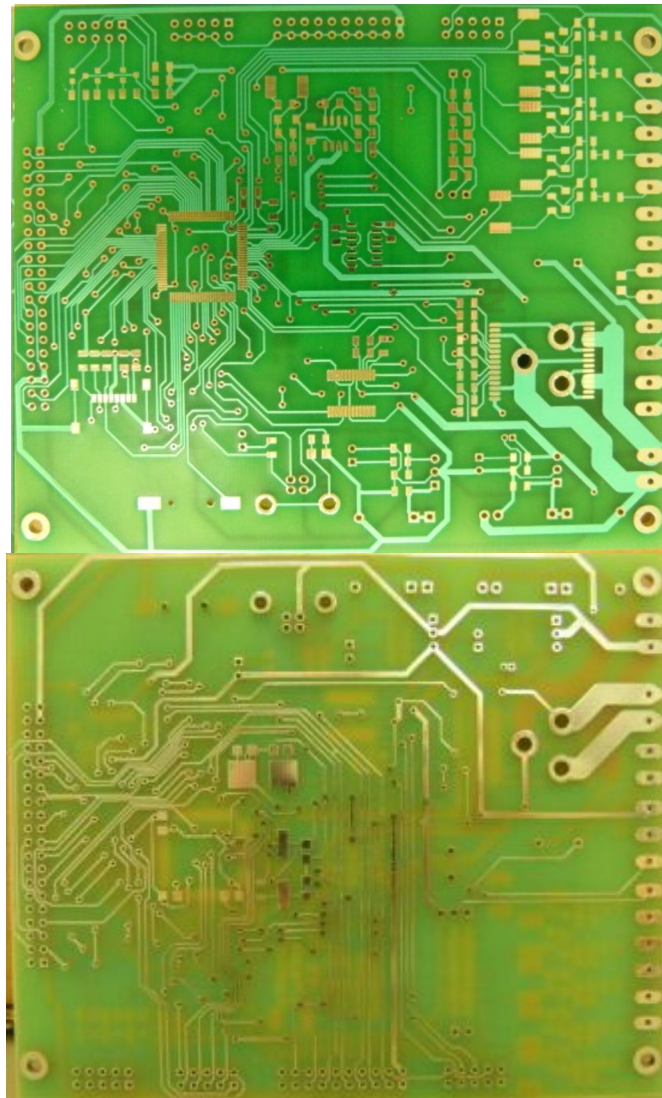
Az egyes modulok elhelyezése után következhetett a huzalozás. A controller lábainak száma, azok távolsága és a számos különféle csatlakoztatott periféria megnehezítette az alkatrészek bekötését. Ezért viszonylag sok átkötés található a panelen, főleg a controller közelében. A huzalozási rajzon észrevehető, hogy igyekeztem a felső oldalon vízszintesen, az alsó oldalon függőlegesen elhelyezni a vezetékeket. Ezzel a módszerrel egyszerűbb volt a feladat megoldása és a végeredmény is áttekinthetőbb lett. A nagyáramú vezetékeknél 4mm, a tápvezetékeknél 0.635-1-1.5mm, a jelvezetékek esetén 0.3mm vezeték szélességet használtam.

6.4 Gyártási technológia

Ahogy ez a 28. ábrán is látható a PCB kétrétegű, az alkatrészek zöme a felső oldalon – alkatrész - található, kivéve a controller néhány kiegészítő elemét (szűrő kondenzátorok, kristályok), melyek az alsó – forrasztási – oldalon kaptak helyet. A megfelelő mechanikai és elektromos kontaktus elérése érdekében a csatlakozók és

furatszerelt alkatrészek furatfémmezéssel lettek ellátva. Mint látható, a panelon nem található meg az alkatrészek számozása. Ennek oka, hogy ez egy prototípus és a költséghatékonyság jegyében nem került szitanyomat a kártyára. Az egyes hibák kijavítása után (pl. reset láb tápfeszültségre kötése), több ilyen eszköz gyártása is tervben van, ezeken már szerepelni fognak az alkatrészsorszámok, mivel ezek jelentősen megkönnyítik a forrasztást és a későbbiekben az egyes alkatrészek cseréjét is. Hasonló okokból csak az alkatrész oldalon van forrasztásgátló maszk, ugyanis a legtöbb felhasznált elem felületszerelt (SMD).

Az elkészült tervet a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Elektronikai Technológia Tanszék NYÁK laborja készítette el megrendelésre.



28. ábra Az elkészült PCB kártya két oldala

7 PC oldali szoftver készítése

Ebben a fejezetben részletezem a számítógépen használt programokat és fájlokat.

7.1 LabVIEW program bemutatása

Az analízis során szükséges lehet a mért adatok kirajzolása, megjelenítése. Ez azoknál a teszteknel lényeges elsősorban, ahol a szelep mozgásának profilja a vizsgálat tárgya (pl. hiszterézis teszt). A megjelenítés abban az esetben is hasznos, ha a szabályozott mennyiségek változását vizsgáljuk. Alapjelváltás esetén vizsgálni lehet többek között a túllövés, beállási idő és beállási hiba mértékét.

A megjelenítő szoftvert a National Instruments által gyártott LabVIEW (LV) szoftverben készítettem. Az LV környezet egyszerűen teszi lehetővé a grafikus felület elkészítését és számos - a feladathoz jól illeszkedő - felhasználói felületelemet tartalmaz. Mindemellett a soros port kezelése is kiforrott, könnyen elsajátítható. A program jelenleg a következő funkciók ellátására alkalmas:

- hiszterézis teszt grafikus megjelenítése, a PWM jel függvényében kirajzolja a pozíciószenzor feszültségjelét
- pozíciószabályzás közben kijelzi az alapjelet és pozíciójelet, ezzel segítve a szabályzás paramétereinek vizsgálatát
- képes a szabályzóparaméterek (P, I, D tag) és az alapjel megváltoztatására, ezzel ugrásválaszt is lehet vizsgálni

A 29. ábrán látható az elkészült LabVIEW program felhasználói felülete. Két képernyő között lehet váltani, az egyik a hiszterézis analízis a másik a pozíciószabályzás megjelenítésére szolgál. A középső képernyőn látható az időbeli változás, de a pillanatnyi értékeket is lehet olvasni, ezek a képernyő mellett baloldalon találhatóak. A szabályzás paramétereit és az alapjelet a képernyő alatt található tekerőkkel lehet állítani.



29. ábra LabVIEW program felhasználói felülete

A program felépítése a következő: első lépésként inicializálódik a soros port, majd egy végtelen ciklusban vár a tester által küldött megfelelő vezérlő karakterre. A vezérlő karakter függvényében egy switch case struktúrából vagy a hiszterézis analízis, vagy a pozíciószabályzás megjelenítése hívódik meg. Mindkét esetben egy speciális karakter szinkronizálja a kommunikációt, amely után az előre meghatározott számú byte-nyi adat beolvasásra kerül. Az adatok feldolgozása után a hiszterézis teszt esetén a pozíciójel a PWM érték függvényében, a pozíciószabályzásnál az idő függvényében rajzolódik ki. Ebben az esetben az alapjel is megjelenítésre kerül, ezzel lehetővé téve a szabályzó tulajdonságainak vizuális vizsgálatát. Pozíciószabályzás esetén lehetőség van a szabályzó paraméterek, illetve az alapjel megváltoztatására. Ha az *adatok küldése* gomb aktiválódik, a LabVIEW kiküldi az éppen aktuális P, I, D paramétereket és az új alapjelet.

7.2 SD kártya fájlok bemutatása

A működés során SD kártya Config.txt fájljában tárolódnak az aktuátorok konfigurációs adatai, melyek a következők: aktuátor ID-ja, bekötése és a specifikált paraméterek. A paramétereket mV-ban, ms-ban és mA-ben adtam meg, hogy a

beolvasásnál elkerüljem a tört- egészszám konverziót. A fájlt értelmező fejléccel láttam el - hogy a további adatokat könnyebben fel lehessen venni -, a fájl végét pedig a @ karakter jelzi. A fájlbeolvasást végző függvény a fejléct nem veszi figyelembe és a fájlvége karakterig olvas.

Ahhoz, hogy minden aktuátor alkatrész számát ne kelljen a kontroller memóriájában tárolni, létrehoztam egy külön fájlt, ami az ID-alkatrésszám hozzárendelést tartalmazza. Miután kiderült, hogy melyik aktuátor lett csatlakoztatva a program az ID alapján kiolvassa az alkatrészszámot is.

Az SD kártyán található a szekvenciát tartalmazó Sequence.txt, melynek felépítése a következő: minden meghívandó függvény ID-ja és paraméterei, hívási sorrendben, függvényenként külön sorban. Mivel a különböző függvények különböző paramétereket várnak a működésükhöz, ezért a program csak az ID alapján tudja, hogy az adott szám milyen paramétert is jelent. A konfigurációs fájlal ellentétben a funkciók nevei a kontrollerben tárolódnak, mivel ezek száma sokkal kisebb és az idő folyamán sem fog megsokszorozódni. Az ID-név hozzárendelés a következő:

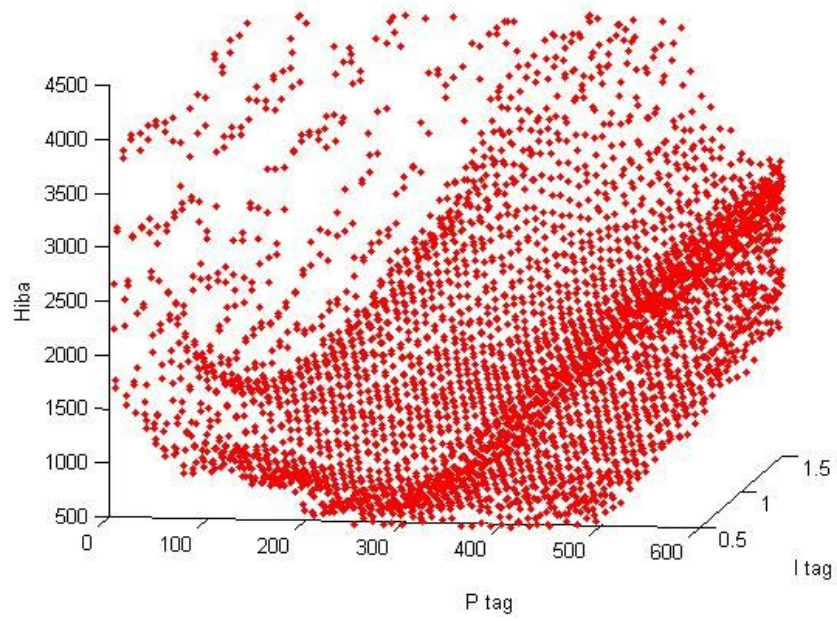
- 0: hiszterézis analízis
- 1: nyitási idő mérés
- 2: zárási idő mérés
- 3: véghelyzet mérés
- 4: járatás

8 Élesztés és kalibráció

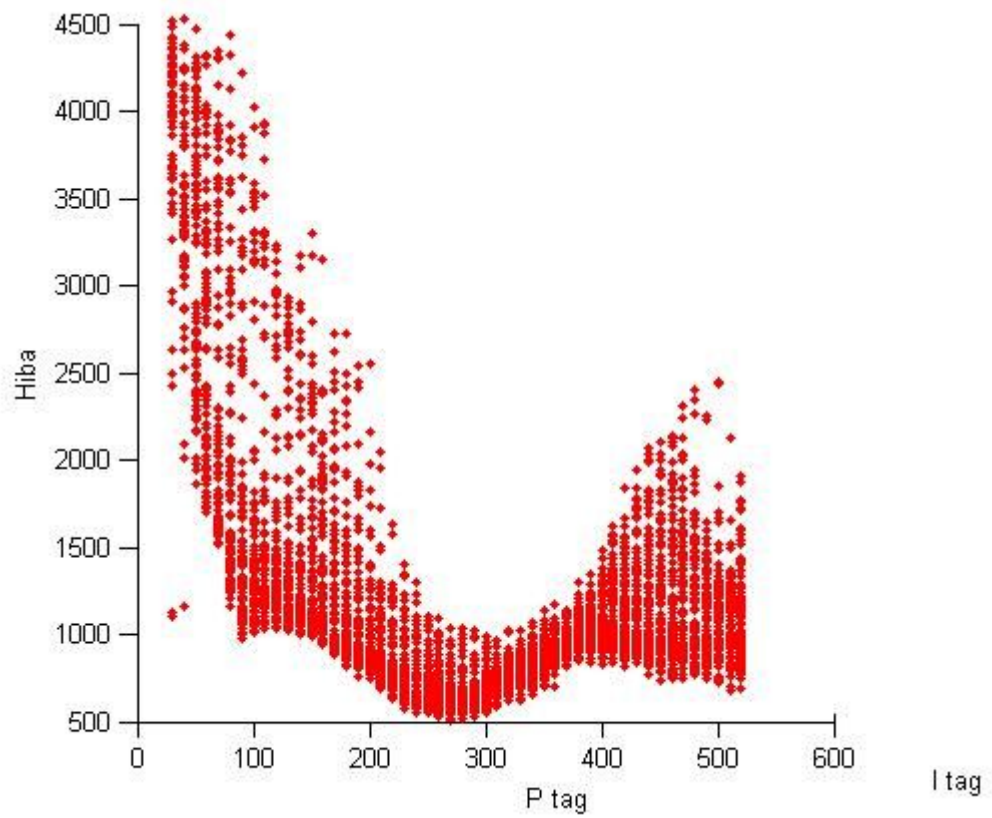
A vizsgáló berendezés tervezése során több, nem triviális áramkör- és kalibrációs számítást is szükséges volt elvégezni. Ezeket a méréseket külön pontonként itt ismertetem:

8.1 PID szabályzás hangolása

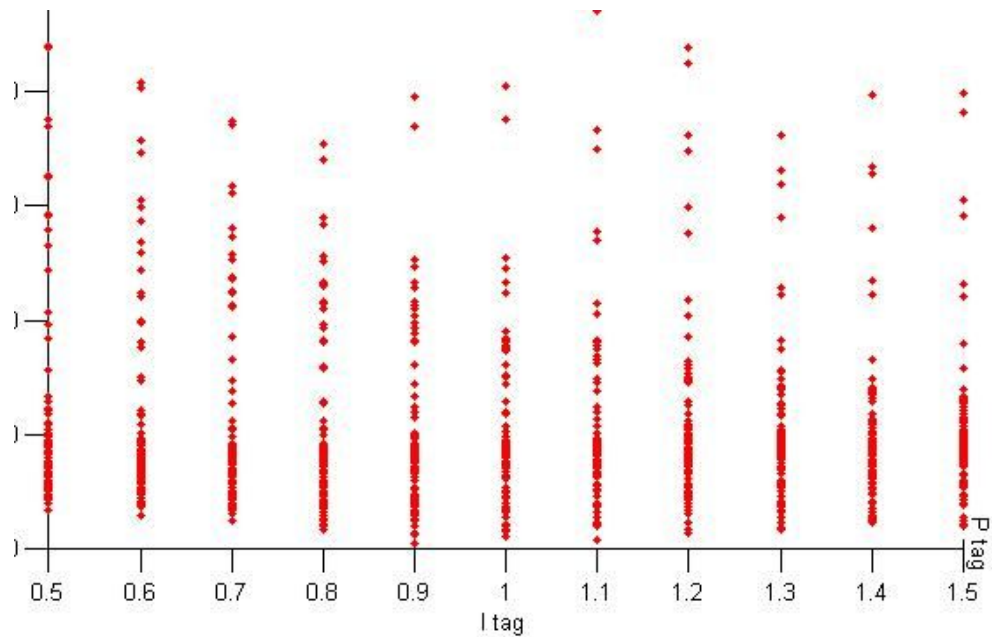
Ahogy azt az 5.2.2.2 fejezetben is megemlítem a PID szabályzás paramétereinek beállítása általában empirikus úton történik. Az egyik leggyakrabban használt Ziegler-Nichols módszer ebben az esetben nem ad jó megoldást, mivel ez a hangolás főleg lassabb folyamatok szabályzására alkalmas. Azért, hogy ne kelljen teljes mértékben manuális állítani a paramétereiket, kidolgozásra került egy egyszerű módszer. Lényege, hogy a LabVIEW periodikusan változtatja a szelep alapjelét két érték között, miközben a beállítás során létrejövő abszolút hibát összegzi. Érdeemes nagyobb ugrást választani (30-70%), hogy a szabályzó hibája szignifikánsabb legyen. Minden egyes periódus után a program elmenti az adott paraméter szetthez tartozó hibaértéket, majd nullázza a hibát és megváltoztatja a valamelyik szabályzó paramétert. A létrehozott hibamatrixot a futás végén egy txt fájlba írja. A paraméterek állítása 3 *for* cikluson belül történik, így konfigurálható az egyes paraméterek esetén a lefedett tartomány és pontosság. Az adatok feldolgozása MATLAB-ban történik, ennek során a program kikeresi a legkisebb hibához tartozó paraméter szettet, illetve megjeleníti a hibafelületet. A megjeleníthetőség végett csak két paramétert (P, I) és a hibát rajzolja ki az algoritmus. Ilyen hibafelületek láthatóak a következő ábrákon. Látható, hogy a $P \approx 270$ és $I = 0.9$ értéknél minimális a hiba.



30. ábra A szabályzó beállításának hibája a P és I tag függvényében ábrázolva



31. ábra A hibafelület P tag szerinti metszete



32. ábra A hibafelület I tag szerinti metszete

8.2 Szenzoráram mérés

A kapcsolat felépítését részletesen ismertettem a 4.5 fejezetben. Ennek a pontnak a témája az egyes elemek értékeinek meghatározása. Előbb a referencia feszültség előállításához szükséges elemek megfelelő méretezését, majd az erősítőkapcsolás értékeinek kiszámolását ismertetem. A hivatkozott alkatrészek számozása a 10. ábra alapján történik. A méretezés elvégzéséhez a következő információkra van szükség [5]:

- maximális kimeneti áram: 50mA (normál üzemben a szenzorok áramfelvétele 10-15mA, bizonyos hibák esetén ez az érték magasabb lehet)
- bemeneti tápfeszültség: 12V
- kimeneti feszültség: 5V
- kimeneti feszültség ingadozás maximuma: 0.001V (tervezési döntés alapján; ennél kisebb ingadozás már irreális paramétereket feltételez)
- kapcsolási gyakoriság: 19 μ s (a kimeneti szűrőkondenzátor értékével arányos, ezért a lehető legkisebbre érdemes választani)

A TL497A egy kapcsoló üzemű feszültség szabályozó, amelynek a bekapcsolt állapota fix ideig tart, a kapcsolási frekvenciája változtatható. A frekvenciát a C12-es kondenzátorral lehet beállítani, a 4. táblázat alapján.

4. táblázat C12 kondenzátor és a kapcsolási gyakoriság összefüggése [5]

TIMING CAPACITOR, C _T (pF)	200	250	350	400	500	750	1000	1500	2000
ON TIME (μs)	19	22	26	32	44	56	80	120	180

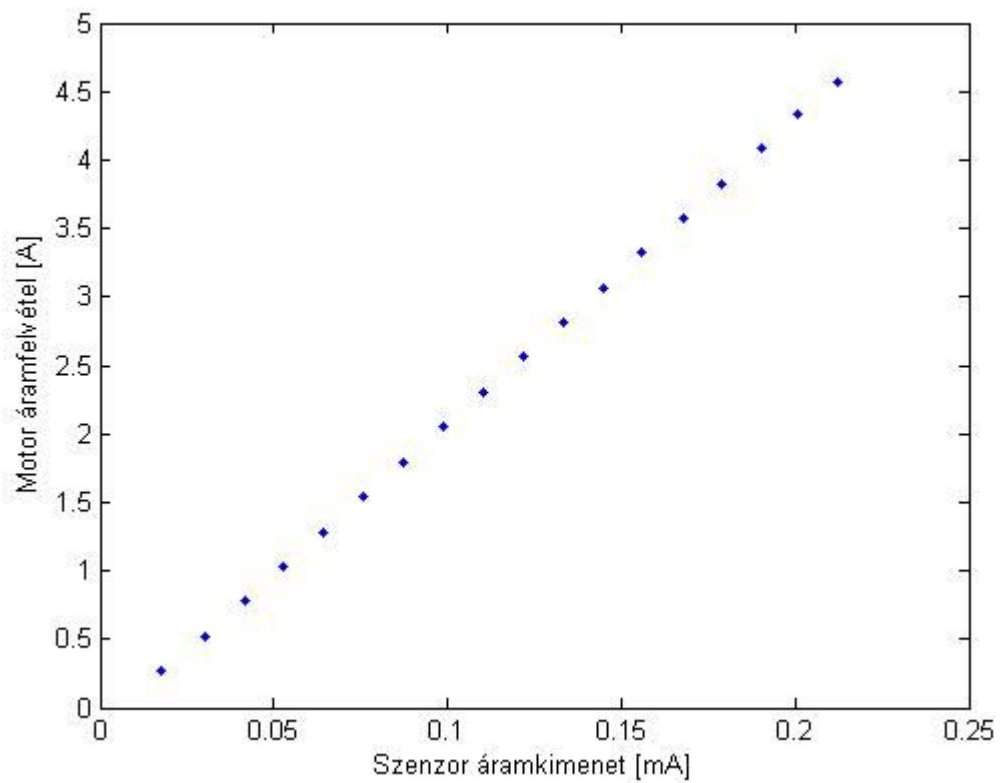
A kimeneti feszültség ismeretében meghatározható az R29-es ellenállás értéke, mert az R30-al olyan ellenállás osztót kell alkossanak, ami ha bemenetként a kívánt kimeneti feszültséget kapja, akkor 1,2V-ot ad ki, ugyanis ennyi az IC komparálási feszültsége. Az R30-at érdemes 1,2kΩ-nak választani, így könnyen kiszámolható az R29 értéke, ami 3,8kΩ.

Az IC rendelkezik beépített áramkorlátozó kapcsolással is, hogy megvédje a tekercset a túl nagy áramcsúcsok esetén létrejövő saturációtól, illetve a meghajtó tranzisztort a túlterheléstől. Az áramkorlátozás akkor lép életbe, ha a R23-as ellenálláson 0.7V-nál nagyobb feszültség esik. Ezért a megengedhető maximális áramcsúcs ismeretében kell meghatározni az R23 értékét. $R23 = 0.5/0.1 = 5\Omega$

Az L1-C13 szűrőpár a kapcsoló üzemű kimenet kisimításáért felel.

8.3 Motoráram mérés

A motorvezérlő IC-ben található árammérő szenzor erősítése nem katalógus adat, hanem minden IC-nél különböző érték. Ebből következik, hogy a megfelelő pontosság eléréséhez élesztés után kalibrálni kell a szenzort. Ez a következőképpen történt: a motorvezérlőt egy nagyteljesítményű ellenállásra kötöttem, majd több különböző PWM érték esetén multiméterrel megmértem az ellenálláson átfolyó áramot és a szenzor által kiadott, ellenálláson mérhető feszültséget. A szenzorkimenetre kötött ellenállás értékének ismeretében kiszámolható a szenzor áram kimenet, amelyet elosztva a mért áramfelvétellel, megkapható az erősítési tényező. Minden mérési pontra adódik egy érték, ezeket érdemes ábrázolni, hogy látható legyen, lineáris-e az erősítés a teljes tartományon.



33. ábra A motor áramfelvétele a szenzor áramkimenete függvényében ábrázolva

Látható, hogy az erősítési tényező a teljes áramtartományban lineárisnak tekinthető, így elég csak egy értékkel számolni a motor által felvett áram kiszámításakor, ez az érték ~21.

9 Mérések és eredmények

9.1 Szenzoráram mérés pontossága

A tervezés és kalibráció után érdemes megvizsgálni, hogy a tervezett kapcsolás valóban helyesen működik-e. A vizsgálatot úgy végeztem, hogy különböző ellenállásokat kötöttem a szenzor helyére, multiméterrel mértem az ellenálláson átfolyó áram értékét, illetve az eszköz által számolt értékeket feljegyeztem. A mérés során a feszültség szabályozó által kiadott tápfeszültség a mérési pontosságon belül (mA) nem változott.

A program a számolás során a sönt ellenállás és a műveleti erősítő tényleges értékével számol, ami $10,3\Omega$ és $5,14$ -es erősítés. A következő táblázat mutatja a multiméterrel mért és az eszköz által számolt értékeket.

5. táblázat A szenzoráram mérőkapcsolás eredményei

Ellenállás árama [mA]	Mért feszültség [V]	Számolt áram [mA]
28	1,51	28,59
19,5	1,06	19,9
14,7	0,816	15,4
11,64	0,66	12,45
9,57	0,56	10,56

Látható, hogy az értékek az előre meghatározott ± 1 mA pontosságon belül vannak, tehát a tervezett kapcsolás megfelel a követelményeknek.

9.2 Motoráram mérés pontossága

A motoráram mérés pontosságának vizsgálata hasonlóan történt a 9.1 fejezetben leírtakhoz. A kalibráció során is felhasznált nagyteljesítményű ellenállásokon átfolyó áramot multiméterrel mértem, és összehasonlítottam az LCD kijelzőn megjelenő adatokkal. Néhány jellemző adatot feltüntetek a mérés eredményéből:

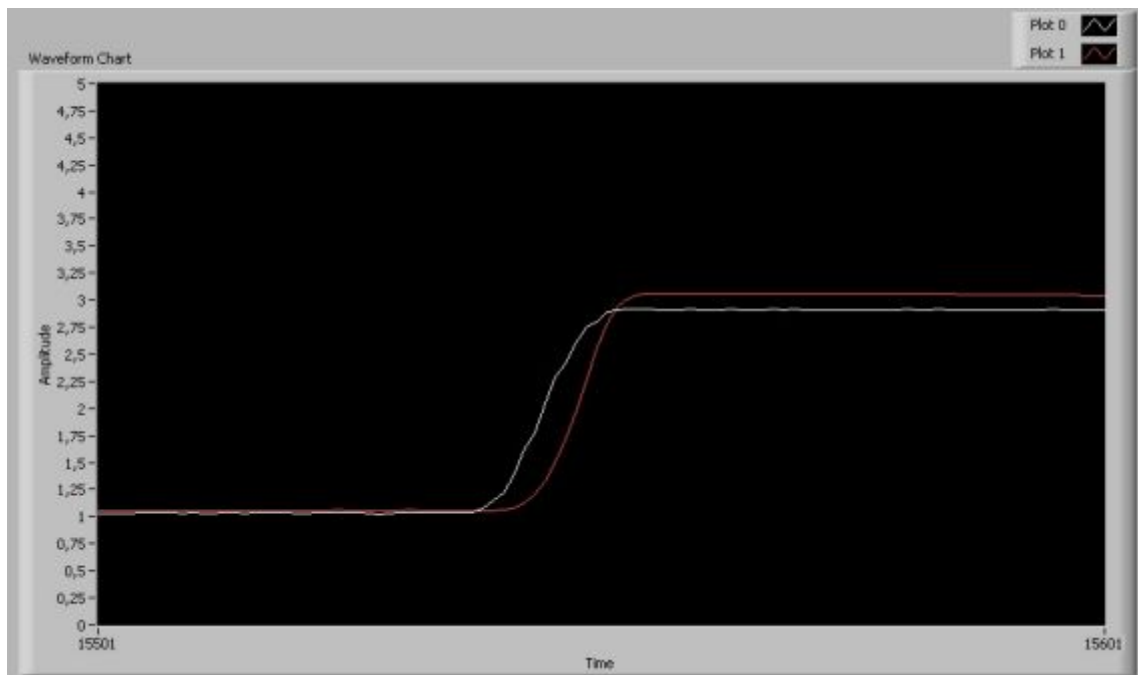
6. táblázat Motoráram mérés pontosságának vizsgálata

Mért áram [A]	Számolt áram [A]	Hiba [A]
0,2679	0,3684	0,1005
0,7778	0,8737	0,0959
1,2834	1,3503	0,0669
1,7905	1,8289	0,0384
2,303	2,3157	0,0127
2,8165	2,800	0,01586
3,3201	3,2753	0,0447
3,8289	3,7564	0,07245
4,333	4,219	0,11391

Látható, hogy a hiba csak a középső tartományban van a specifikált $\pm 0.05A$ -es hibatarományban. Ennek oka a következő: bár a33. ábrán látható függvény lineárisnak tűnik, ez nem teljesen igaz. Ezért ezeken a tartományokon a kiszámolt áramerősítési tényező nagyobb hibát eredményez. Ennek kiküszöbölésére javaslatot teszek a továbbfejlesztési lehetőségek között, valószínűleg valamilyen nagyobb fokú függvény illesztése lenne a megoldás.

9.3 Az eszközzel készített vizsgálatok eredményei

Elsőként a pozíciószabályzás működését bemutató ábrákat ismertetem. Az 34. ábrán látható egy nem optimális paraméterekkel működő szabályzó. Látható, hogy az integráló tag hatása olyan kismértékű, hogy csak a mérés végén kezd el csökkenni a hiba. Ebben az esetben az alapjelet az ADC-re kötött potméterről kapta a szelep, így az alapjelváltás viszonylag lassú.



34. ábra Rosszul beállított szabályzó működése

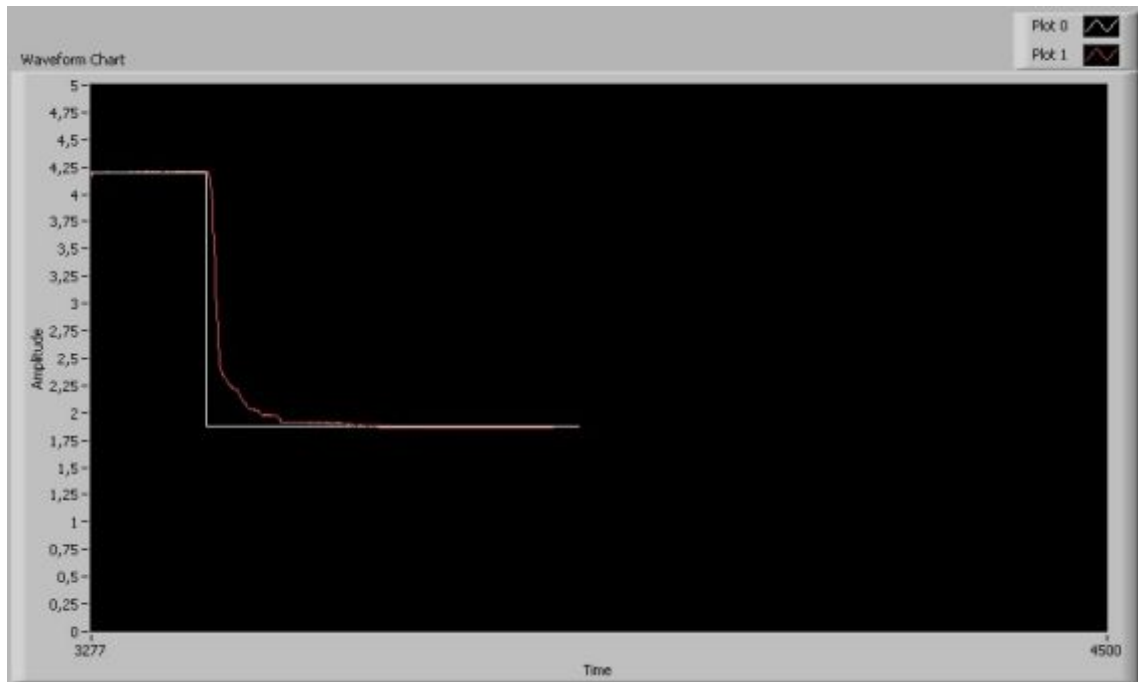
A szabályzó paramétereinek hangolása után jóval gyorsabb és pontosabb szabályzás érhető el. Egy paraméterhangolt szabályzó működése látható a 35. ábrán. Megfigyelhető, hogy kisebb a reakcióidő és a túllövés mértéke, illetve az integráló tagnak köszönhetően nincs állandósult hiba.



35. ábra Hangolt paraméterű szabályzó működése

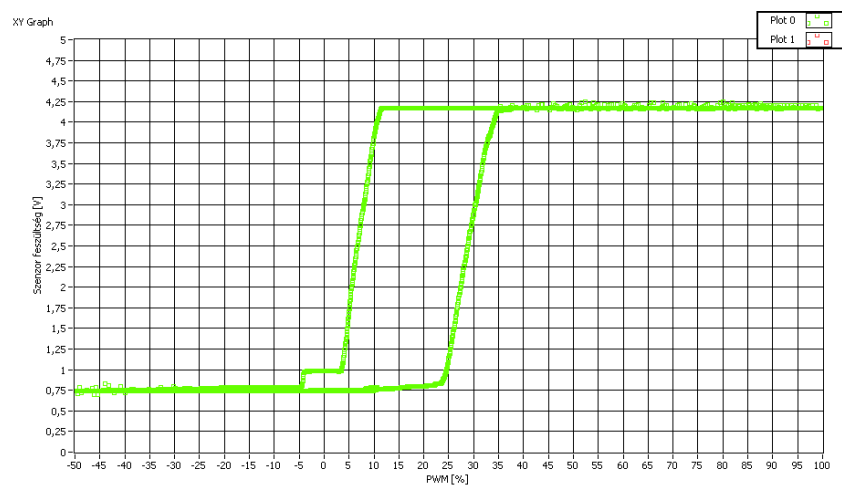
Az előző ábrákon az alapjelet a controller ADC-jére kötött potenciométer szolgáltatta. A LabVIEW-ban megírt program segítségével ennél pontosabb és gyorsabb

alapjelváltások is kiadhatóak. A 36. ábrán látható egy nagyobb alapjelugrásra adott válasz, illetve jól látszik a sebességkorlátozás hatása a szabályzásra. A kép készültekor - tesztelés közben - a sebességkorlátozás bekapcsolásának határa nem a véghelyzetek közelében volt, hogy az esetleges hibás működés esetén se csapja a szelepet a véghelyzetekhez a szabályzó.



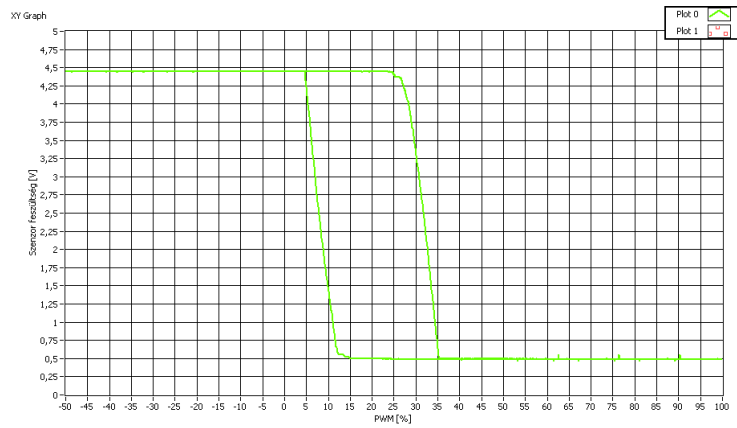
36. ábra Sebesség korlátozás szabályzás közben

A következő ábrák a hiszterézis analízis eredményét mutatják különböző szelepeken. A hibás működés sok esetben már szemmel is látható. A 37. ábrán a szelep akadása figyelhető meg.

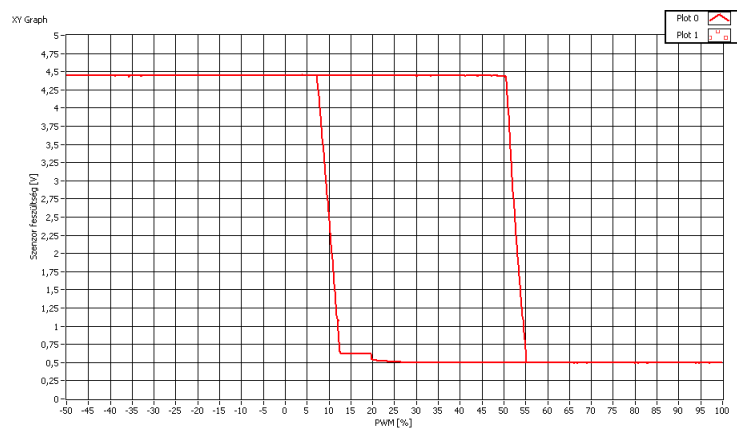


37. ábra Megakadt szelep hiszterézis görbéje

A 39. ábrán látszik, hogy a szelep túl nagy nyomaték esetén nyit csak ki, valószínűleg a megnövekedett belső, mechanikai súrlódás hatására. Viszonyításképpen egy referencia is látható a 38. ábrán.



38. ábra Referencia darab hiszterézis görbéje



39. ábra Hibás darab hiszterézis görbéje

Összefoglalás

A diplomaterv keretében megvalósítottam egy olyan rendszert, ami képes állandó mágneses állórészű DC motort tartalmazó aktuátorok vizsgálatára, a számítógéppel való kommunikáció segítségével az adatok megjelenítésére, illetve az SD kártya segítségével a mérési eredmények eltárolására.

A berendezés képes a vizsgálandó szelepen hiszterézis teszt futtatására, a szelep véghelyzeteinek megkeresésére, a pozíció szenzorjel feldolgozására és felhasználásra, a szelep nyitási és zárási idejének megmérésére, hosszú idejű járató vizsgálatok elvégzésére és autonóm működésének segítségével a válogatási folyamat támogatására.

A feladat során megtervezésre került az eszköz hardvere, amelynél külön figyelmet kellett fordítani a szenzoráram és motoráram mérés megvalósítására.

Dolgozatomban részletesen bemutattam a hardver- és szoftvertervezés során felmerülő problémákat és a rájuk adott megoldást, illetve ennek indoklását.

A szoftverfejlesztés során gondot okozott az AVR kontrollereknél megszokott beállítási lehetőségekhez képest sokkal részletesebb beállítási opciók átgondolása és használata.

Elmondható, hogy sikerült olyan rendszert létrehozni, amely működése a kiírásban megfogalmazott céloknak megfelel. A végleges összeállításban sikerült a fejlesztésre használt fojtószelepen a diagnosztikai funkciókat lefuttatni, ezek eredményét eltárolni, illetve a megfelelő adatokat a számítógépen kijelezni. Sikerült azt is megoldani, hogy a később kifejlesztésre kerülő, hasonló elven működő szelepek vizsgálta könnyen megoldható legyen.

A rendszer továbbfejleszthető több irányban is. A számítógéppel való kommunikációt érdemes lenne szintén USB-n keresztül végrehajtani, ha már az SD kártyára való kommunikáció ezen van megoldva. A LabVIEW program továbbfejlesztése is indokolt, a mérések megjelenítésén kívül, riportok készítése is szükséges lehet. Az aktuátor felismerése után a controller megjeleníthetné - az SD kártyáról betöltve – az adott alkatrész fotóját, ezzel segítve a biztos azonosítást. A

motoráram mérés kalibrációjánál egyenes illesztés helyett, valamilyen magasabb fokú függvény illesztése lenne célszerű, ezzel minimalizálva a hibát.

Lehetséges lenne az autóba beépített szelepek különböző mozgásprofiljainak (gyorsítás, hidegindítás, fékezés, stb.) lemérése, majd ezt a profilt betölteni az eszközbe. Így az említett szituációkat lehetne szimulálni a laborban - természetesen megfelelő hőmérséklet- és nyomásérték mellett. Ezzel a módszerrel bizonyára pontosabb képet lehetne kapni a hibáról, ami lehet, hogy csak ilyen körülmények között észlelhető.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm Dr. Sujbert László tanár úrnak a témakeresésben nyújtott segítségét, és a dolgozatírás során megfogalmazott építőjelleget kritikáját.

Szeretném megköszönni Gusztáv Tamásnak, hogy a diplomatervem készítése során mindig készségesen állt rendelkezésemre, hasznos tanácsai és ötletei elősegítették a munkám sikeres elvégzését.

Köszönet Tóth Attilának és Klausz Péternek a mechanikai megmunkálás során nyújtott szakértelmüket.

Köszönet az E-labor összes munkatársának, hogy megfelelő munkakörülmények között, baráti társaságban dolgozhattam.

Irodalomjegyzék

- [1] SAE International SENT for automotive applications
- [2] VNH2SP30-E Automotive fully integrated H-bridge motor driver Datasheet
- [3] FT232L USB UART IC Datasheet Version 2.10
- [4] STM32F103xx advanced ARM-based 32-bit MCU Reference manual
- [5] TL497A Switching voltage regulator Datasheet
- [6] Lantos Béla: Irányítási rendszerek elmélete és tervezése I – Egyváltozós szabályozások