

TDK dolgozat

Boros Péter Bálint

2014

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS INFORMATIKAI KAR
MŰSZAKI INFORMATIKA TANSZÉK

Univerzális szenzormodul ipari és mérés technikai alkalmazásokhoz

Készítette:

Boros Péter Bálint

II. Mérnök informatikus MSc

Témavezető:

Dr. Gingl Zoltán, egyetemi docens

SZTE Műszaki Informatika Tanszék

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés, célkitűzés	3
2. Elméleti bevezető	4
2.1. Szenzorok az iparban	4
2.2. Jelkondicionálás, jelfeldolgozás	5
2.3. Az információ továbbítása, a távadók	6
2.4. A piacon elérhető megoldások	8
3. Az univerzális szenzorinterfész felépítése	9
3.1. Az eszköz vázlatos felépítése	9
3.2. A szenzorválasztó interfész	10
3.3. A mikrovezérlő jellemzése, szerepe a rendszerben	14
3.4. A másodfokú szűrő	15
3.5. A 4-20 mA-es konverter	18
3.6. Az USB interfész	20
3.7. A fogyasztás optimalizálása	21
4. A szoftver	24
4.1. Szoftver funkciók	25
4.2. Az alkalmazott szenzorok	26
5. A rendszer tesztelése	29
6. További fejlesztési lehetőségek	31
7. Eredmények összefoglalása	32
8. Köszönetnyilvánítás	33
9. Irodalomjegyzék	34
10. Melléklet	35

1. Bevezetés, célkitűzés

Az ipari automatizált rendszerek hibamentes működése, valamint a működés monitorozásának biztosítása végett információszerzésre van szükség a rendszerre ható, valamint a rendszer által generált fizikai mennyiségekről. Ilyen fizikai mennyiségek lehetnek például az elmozdulás, a hőmérséklet, a nyomás, a fényintenzitás, stb. A mérést legtöbbször a közvetlenül a mérési pontnál elhelyezett kompakt eszköz végzi. Ennek feladata, hogy a mért fizikai mennyiségből megfelelő jelkondicionálással szabványos analóg vagy digitális jelformát állítson elő a kimenetén. Ezeket az információkat leggyakrabban egy központi adatgyűjtő eszköz begyűjti, feldolgozza, tárolja, és ha szükséges, a megfelelő vezérléssel befolyásolja a rendszer működését.

A különböző fizikai mennyiségek méréséhez eltérő működésű szenzorok szükségesek. Léteznek feszültség, áramerősség, ellenállás, kapacitás (az előzőek analóg működésűek) valamint digitális kimenetű szenzorok is, továbbá egy adott fizikai mennyiséget is többféle szenzorral mérhetünk meg (pl. hőmérsékletet termisztorral, termoelemmel, Pt100 szenzorral, stb.). A piacon természetesen elérhetők olyan mérőeszközök, amelyekkel a fent említett feladatok elvégezhetők, ezekkel azonban az a probléma, hogy funkcionalitásuk szempontjából nem rugalmasak – legtöbbször csak egy-egy szenzor csatlakoztatását teszik lehetővé.

Munkám során egy mikrovezérlő alapú, kompakt, alacsony fogyasztású, univerzális ipari szenzorinterfész fejlesztését végeztem el, amely bemeneti interfészének segítségével analóg és digitális érzékelők csatlakoztatását is lehetővé teszi a hardver módosítása nélkül (csupán szoftveres konfigurálással). Dolgozatomban részletesen bemutatom a szenzormodul felépítését és egyes részáramköreinek működését, valamint ismertetem a hardverhez fejlesztett demóalkalmazást is, amelyen keresztül bemutatom a műszer funkcióit. Végezetül továbbfejlesztési lehetőségeket is megadok.

Az elvégzett munka egy fejlesztési folyamat része. A bemutatott eszköznek létezik korábbi verziója is, amely BSc-s szakdolgozatom tárgya volt [1]. Ezt továbbfejlesztve született a jelenlegi változat, amely az elérhető funkciók, a fogyasztás, a továbbfejlesztési lehetőségek, valamint az illeszthető szenzorok tekintetében is jóval fejlettebb.

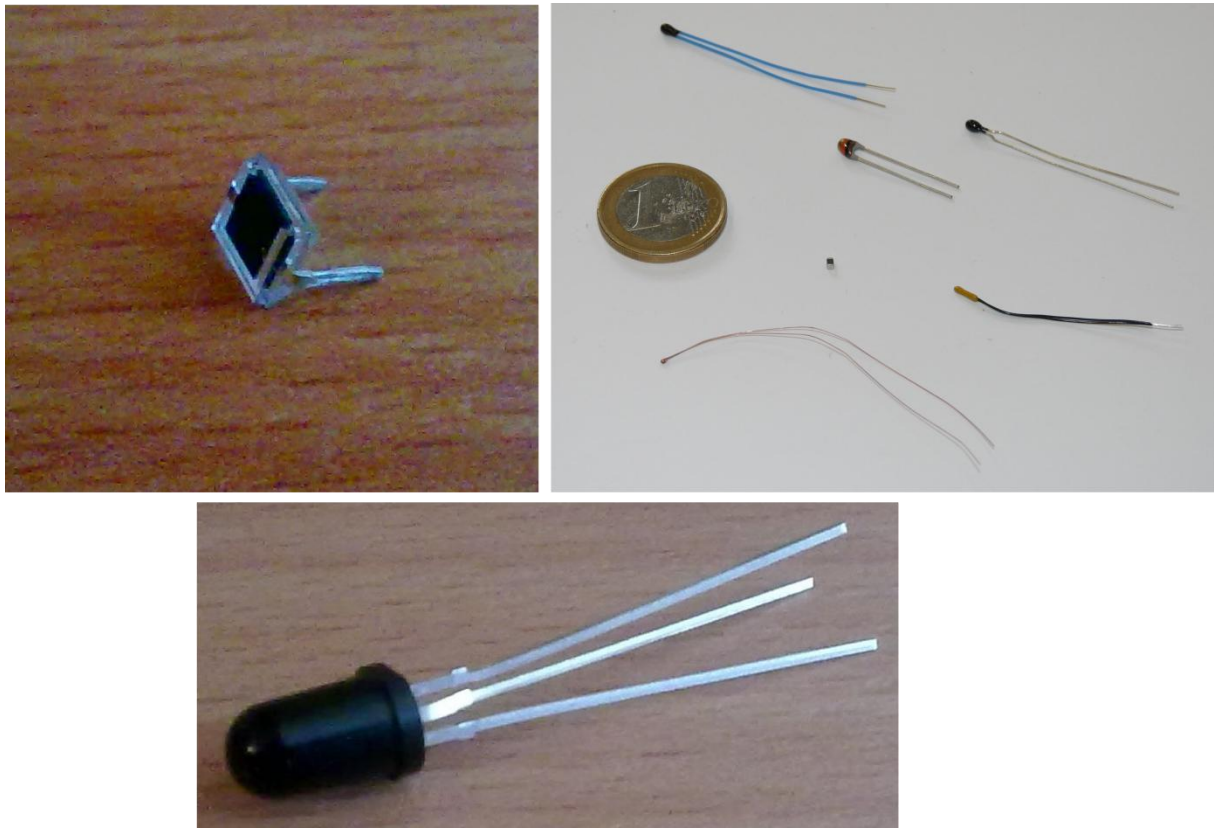
Kulcsszavak: méréstechnika, adatgyűjtés, univerzális, szenzorok, mikrovezérlő, low-powered, távadó, 4-20mA

2. Elméleti bevezető

2.1. Szenzorok az iparban

Manapság az iparban alkalmazott különböző gyártási folyamatok többsége automatizált. Egy automatizált rendszer kivitelezéséhez, megvalósításához és biztonságos működtetéséhez elengedhetetlen a rendszerre ható és a rendszer által generált különböző mechanikai, fizikai-kémiai, termodinamikai és optikai mennyiségek pontos mérése. Ezeket a feladatokat szenzorok segítségével végezhetjük el.

A szenzorok olyan érzékelők, amelyek a környezet fizikai, kémiai mennyiségeit, történéseit mérhető és feldolgozható jelekké, más szóval villamos jelekké alakítják át (feszültség/áramerősség/kapacitás/ellenállás). Megfelelő jelkondicionálás segítségével képesek vagyunk a mért adatok pontos (de csak közelítő!) feldolgozására, tárolására, továbbítására – akár nagyobb távolságokba is. Egy-egy ilyen érzékelő általában egyfajta mennyiség mérésére alkalmas. Egy mennyiséget viszont többféle szenzor is képes lehet mérni, ezért számtalan érzékelő közül válogathatunk. A méréshez legmegfelelőbb szenzor kiválasztását egyes külső körülmények nagyban befolyásolják. Ilyen szempontok lehetnek: analóg vagy digitális formában szeretnénk megkapni a szenzor által mért értéket, a szenzor maga végez-e jelkondicionálást, mennyire kell odafigyelni a fogyasztásra, milyen pontosságra van szükségünk, milyen gyors legyen a szenzor (beállási idő), mekkora kell legyen a mérés tartománya, milyen anyagból készüljön a szenzor, mekkora lehet a mérete, mennyire legyen strapabíró, stb. A szenzorokkal kapcsolatos három legfontosabb elvárás: a szenzor legyen olcsó, pontos és megbízható. Mindhárom feltétel azonban legtöbbször nem teljesíthető, emiatt kompromisszumokat kell kötnünk és az alkalmazásunkhoz leghatékonyabban felhasználható darabot kell kiválasztanunk. A 2.2.1. képen látható néhány gyakran alkalmazott szenzor.



2.2.1. kép: felső sor balról: fotodióda és termisztorok, alsó kép: fototranzisztor [forrás: 1]

2.2. Jelkondicionálás, jelfeldolgozás

A szenzorok által mért mennyiségek feldolgozását leghatékonyabban digitális formában, gyakran mikrovezérlő alkalmazásával végezhetjük el. A mikrovezérlő előnye, hogy egy tokban egyesíti a mikroprocesszort, a memóriát és a perifériákat. Ma már a legegyszerűbb mikrovezérlő perifériái között is megtalálható az A/D konverter, amely nélkülözhetetlen a szenzoros mérések megvalósításához. Az A/D konverterek feladata, hogy a bemenő analóg jelet (feszültség) digitális jelekké (számok) alakítsa át, azért hogy az eredménnyel a mikrovezérlő műveleteket végezhesen el. Mivel az A/D konverterek feszültség bemenetűek, ezért szükséges egy olyan áramkör, amely a szenzorok eltérő kimeneti mennyiségeit megfelelő nagyságú feszültséggé alakítja át. Fontos továbbá, hogy szűréssel védjük a bemenő jelet a külső zavarjelek torzító hatásaitól, valamint a kis jeleket megfelelően erősítsük fel, hogy azokat az A/D konverter pontosan mérni tudja. Védünk kell a mögöttes áramkört a károsodásoktól is, amit például túlvezérlés okozhat. Mindezt jelkondicionálásnak nevezzük. Ahhoz, hogy egy műszerhez többféle szenzort kapcsolhassunk úgy, hogy közben nem

változtathatjuk meg a hardver alapvető felépítését, egy rugalmasan – szoftver által – konfigurálható jelkondicionáló áramkörre van szükségünk. Ez az áramkör része dolgozatomban tárgyának, a későbbi fejezetekben ez bemutatásra kerül.

A megfelelő jelkondicionálás után biztosítanunk kell azt, hogy a digitalizálás az alkalmazás szempontjából a lehető legpontosabb legyen. Figyelembe kell vennünk, hogy milyen pontosságot szeretnénk elérni méréseink során, mennyire gyorsan változó jeleket kell érzékelni, továbbá hogy hány csatornára van szükségünk. Olyan mikrovezérlőt kell tehát választanunk, amelynek A/D konvertere megfelelően teljesít az adott körülmények között. Egyik legfontosabb paraméter a felbontás, amely meghatározza, hogy mi az a legkisebb változás a jelben, amit az A/D konverter még érzékelni tud. Kiemelkedően jó felbontásúnak számít a 24 bites A/D átalakító, amely már viszonylag olcsó vezérlőkben is elérhető. Sok esetben az átalakító magába foglalja az erősítő áramkört is, így azt külön nem szükséges tervezni a rendszerhez. Másik fontos szempont a mintavételezés gyakorisága. Shannon mintavételi törvénye alapján a folytonos idejű jel visszaállítható mintáiból, ha a mintavételezési frekvencia nagyobb, mint a jelben előforduló legmagasabb frekvenciájú komponens frekvenciájának kétszerese. Ennek megfelelően tudnunk kell, hogy a mérendő jelben közelítőleg milyen gyors változások lehetnek, és ennek megfelelő sűrűségű mintavételezést kell végeznünk.

A digitalizálás után a mikrovezérlő feldolgozza a bejövő jeleket, az adatokon műveleteket végez (pl. a megfelelő függvény segítségével kiszámítja a mért fizikai értéket – ez lehet például a hőmérséklet), majd az eredményt a kimenetén elküldi további feldolgozásra (pl. egy távadó elküldi a mért adatokat a központi feldolgozóegységnek, vezérlőegységnek). A mikrovezérlők kimenete lehet analóg (D/A átalakító: feszültség, áram), vagy digitális jel (PWM, UART, I²C, SPI, stb. kommunikációs protokollok alapján).

2.3. Az információ továbbítása, a távadók

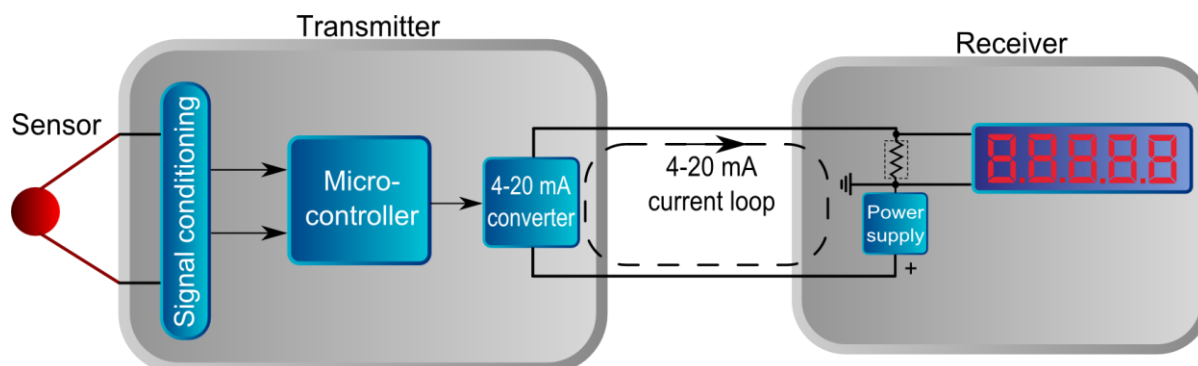
A vezérlőegységbe való jeltovábbításnak számos módja létezik, a körülmények szabják meg azt, hogy melyik megoldást fogjuk választani. A jelátvitel módjait két nagyobb csoportba sorolhatjuk: digitális és analóg. Az iparban mindkét módszer esetén többféle szabványos kommunikációs protokollt és jeltartományt hoztak létre. Digitális információ továbbítás esetén a jel kétállapotú. A kétállapotú jelek kevésbé zajérzékenyek, mint az analóg jelek, mivel a vevőnek csak két jól elkülöníthető jelállapotot kell megkülönböztetnie, ami

akkor is lehetséges – bizonyos határokon belül – ha a hasznos jel zavarjeleket vesz fel a környezetéből. Azonban a méréstechnikában és az iparban a hagyományos analóg módszerek is nagy jelentőséggel bírnak a mai napig. Analóg jelátvitel esetén gyakran használt a 0–5 V, -5–5 V, 0–10 V, 0–20 mA, 4–20 mA jeltartomány. Feszültségjeleket kisebb távolságokra (néhány méter) érdemes továbbítani, mivel az érzékeny a külső zajokra. Ezzel szemben az áramjelet kevésbé torzítják ezek a zavarok, így nagyobb távolságokba (több száz méter) is továbbítható.

Az áram-jeltartományok képezik alapját a terepre, a mérési pontokhoz kihelyezett kompakt áramköröknek, az ún. analóg kimenetű távadóknak [2,3] (léteznek digitális kimenetű távadók is, valamint belső működésben is megkülönböztetünk analóg és digitális távadókat). A manapság leggyakrabban alkalmazott távadók tartalmaznak mikrovezérlőt, így a jelfeldolgozás egy része digitális formában történik. A távadók feladata jellemzően valamilyen fizikai mennyiség mérése, átalakítása, majd továbbítása. Ez valós idejű méréseket tesz lehetővé például egy gyártósoron, ahol kíváncsiak lehetünk az egyes alkatrészek hőmérsékletére, tartálynyomásra, különböző mechanikai erőhatások nagyságára, gázkoncentrációra, stb. Ezek a mérési pontok a központi feldolgozó egységtől nagy távolságokra is lehetnek, ezért előnyös az áramjel alkalmazása az információ továbbítására. A leggyakrabban alkalmazott jeltartomány a 4–20 mA-es tartomány. Ennek nagy előnye – például a 0–20 mA-es tartománnyal szemben –, hogy rendellenes működés (pl. vezetékszakadás) esetén a hiba gyorsan észlelhető, mivel ekkor 0 mA fog a vezetékekben folyni. Ez a hiba a 0–20 mA-es tartomány esetén nehezebben detektálható.

Analóg kimenetű távadóknál gyakran alkalmazott az ún. loop-powered technológia. Ez azt jelenti, hogy a vevőegység egyben táplálást is biztosít a távadónak, valamint a tápvezeték és a jelvezeték egy és ugyanaz. Így az adó és a vevő között mindössze egyetlen vezetékpárt kell kihúzni. Ennek a módszernek az a hátránya, hogy a távadó áramköreinek és a szenzornak az összefogyasztása nem lehet nagyobb 4 mA-nél. Ha nagyobb lenne, nem lehetne megvalósítani a 4–20 mA-es jeltartományt, ezért ennél a technológiánál fontos a fogyasztás optimalizálása. A 2.3.1. ábrán egy egyszerű távadó rendszer működésének blokkdiagramja látható. (A dolgozat ábráin angol elnevezéseket használtam, így az egyes részegységek könnyebben azonosíthatók az angol nyelvű adatlapokban, cikkekben találhatók.) Ennek része egy mikrovezérlő alapú, 4-20 mA-es analóg kimenetű távadó egység. Az adó (Transmitter) és a vevő (Receiver) közötti vezetékpárból megfigyelhető a loop-powered működési elv. Ebben az esetben a vevőegység magába foglalja a tápegységet (Power Supply) is, de léteznek olyan rendszerek is, ahol külső tápegységet alkalmaznak. A vevőben található

még egy terhelő ellenállás, ennek értéke tipikusan 100-500 Ω (azonban a vevőegységben az áram feszültséggé alakítása közben a terhelő ellenállás nagyságán kívül figyelembe kell venni a vezetékek ellenállását is).



2.3.1. ábra: Egy tipikus távadó rendszer felépítése

2.4. A piacon elérhető megoldások

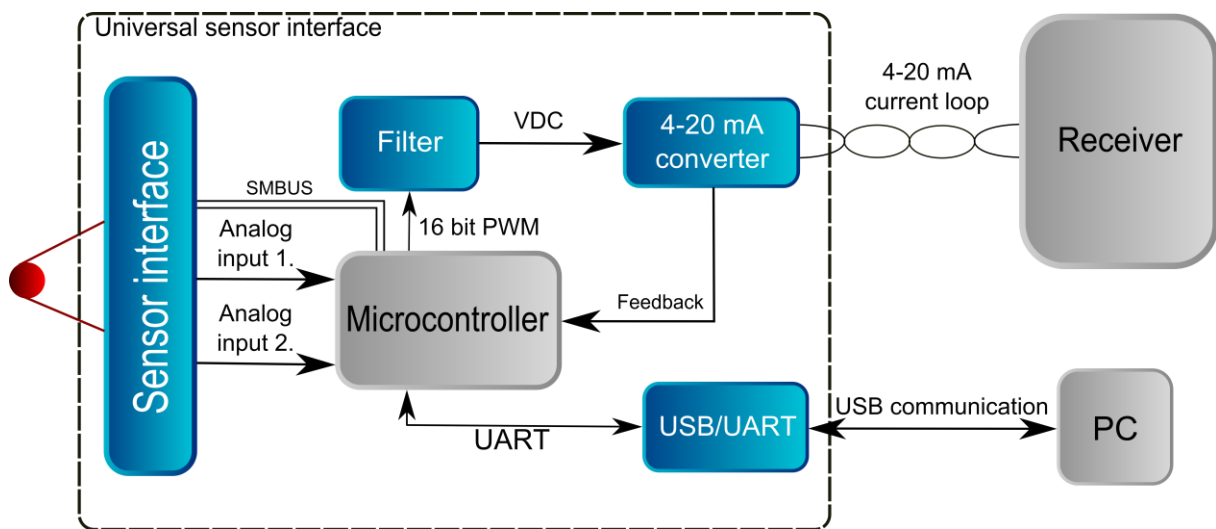
A gyártók nagy választékot kínálnak a különböző szenzormodulokból, rengeteg megoldás létezik már egy-egy mennyiség mérésére is. Az alkalmazott szenzor típusán túl figyelembe kell vennünk a szenzormodul kivitelét. Az egyszerű, csupasz áramkörü lapra forrasztott alkatrészekből álló változattól az ipari tokozással ellátott, akár víz- vagy porálló megoldásokig minden megtalálható, ezek természetesen az árskálán sem ugyanott helyezkednek el. A modulokon általában található valamilyen jelkondicionáló áramkör, így akár közvetlenül is csatlakoztathatók egy adatgyűjtő/feldolgozó egységhez. A szenzormodulok egy csoportját képezik a távadó modulok, amelyek elvégzik az áramjellé konvertálás feladatát, így a nagyobb távolságra lévő vevőegységhez közvetlenül illeszthetők.

A gyártók általában egy, esetleg kettő mennyiség mérését célozzák meg egy-egy típussal (pl. páratartalom + hőmérséklet, mágneses tér, nyomás, fény), amelyek adott feladat elvégzésére tökéletesen alkalmasak. Azonban igény lehet egy olyan szenzormodulra is, amelyhez számos érzékelő közvetlenül, a hardver átalakítása nélkül illeszthető. A kimeneti jeltartományt nézve pedig előnyös lehet, ha nem csak egyféleképpen tudja az információt továbbítani, hanem erre több lehetőséget is biztosít. Ez akár úgy is történhet, hogy közben kétirányú kommunikációt is lehetővé tesz adó és vevő közt, amivel a szenzormodul rugalmas konfigurálása is megvalósítható. Munkám során egy, az ezen kritériumoknak megfelelő műszert fejlesztettem ki. A következő fejezetekben ennek bemutatása következik.

3. Az univerzális szenzorinterfész felépítése

3.1. Az eszköz vázlatos felépítése

A következő fejezetekben ismertetésre kerül az univerzális szenzormodul felépítése és működése az egyes részáramkörök bemutatásával. Az eszköz blokkdiagramja a 3.1.1. ábrán látható.



3.1.1. ábra: Az univerzális szenzorinterfész felépítése

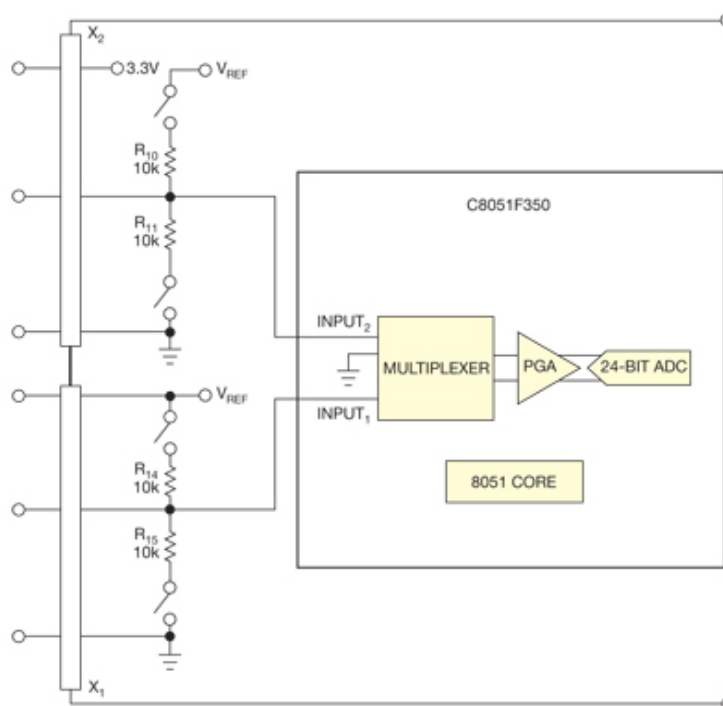
Annak biztosítása, hogy a műszerhez számos eltérő működésű érzékelő illeszthető legyen, a szenzorválasztó interfész (Sensor interface) feladata. Ez az áramkör teszi „univerzálissá” az eszközt. Analóg és digitális (I^2C) szenzorok is csatlakoztathatók. Ebből két vezeték indul a mikrovezérlő két analóg bemenetére, ami lehetővé teszi az olyan szenzorok illesztését is, amelyeknél differenciális feszültségmérés szükséges. A mikrovezérlő beépített szigma-delta A/D átalakítója segítségével digitalizálja az analóg feszültségjelet, majd műveleteket végez a bemenő adatokon. Ez abból áll, hogy az aktuálisan mért szenzor karakterisztikájából – amelyet a szenzor adatlapja ad meg – kiszámolja a tényleges fizikai/kémiai mennyiséget. A kimenetet 16 bites PWM jelként továbbítja egy másodfokú szűrőnek (Filter), amely egyenfeszültséggé alakítja azt. Ez a mennyiség lesz a 4–20 mA-es konverter bemenete. Ennek feladata, hogy a bemenő feszültség nagyságával arányban szabályozza az átfolyó áramot – ami loop-powered módban azonos a szenzormodul fogyasztásával – létrehozva ezzel a 4–20 mA-es kimeneti jeltartományt. A vevőegység (Receiver) az előző fejezetben ismertetett módon egy terhelő ellenállás segítségével

feszültséggé alakítja az áramjelet, majd feldolgozza az információt. A vevőegység tipikusan egy PLC (programozható logikai vezérlő) lehet. A kimenet egy feszültségosztón keresztül vissza lett csatolva mikrovezérlő egy harmadik analóg bemenetére, amellyel lehetőség van a kimenet szoftveres kalibrálására a PWM jel megfelelő beállításával. Ez egy opcionális funkció, de ha például a szobahőmérséklettől lényegesen eltérő hőmérsékletű helyen használjuk a szenzormodult, akkor érdemes alkalmazni, valamint időnként az alkatrészek öregedése is indokoltá teszi a használatát. A műszer továbbá rendelkezik egy mini USB interfésszel (USB/UART) is, amely számos további funkciót biztosít. Ennek használata során egy külső eszközhöz való csatlakozásra van lehetőség, amely tipikusan egy PC lehet. A mikrovezérlő és a PC az USB/UART interfészen keresztül kommunikál.

A további alfejezetekben az áramkör egyes részegységeinek és azok működésének bemutatása következik.

3.2 A szenzorválasztó interfész

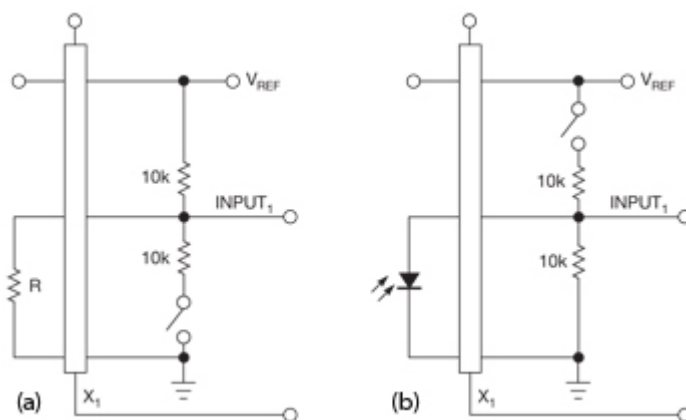
A szenzormodul egyik fő feladata, hogy a különböző működésű és kimenetű analóg szenzorokat anélkül illeszthessük hozzá, hogy az hardveres átalakításokat igényelne. Erre a 2.2. fejezetben részletezett okok miatt van szükség. A problémát az EDAQ24 nevű műszer bemeneti logikája megfelelően oldja meg [4], melyet a fejlesztéseimhez felhasználtam. Ennek felépítése a 3.2.1. ábrán látható.



3.2.1. ábra: A szenzorválasztó bemeneti interfész felépítése [forrás: 4]

Az analóg kimenettel rendelkező szenzorok közvetlen illesztéséhez két darab háromtűs csatlakozó áll rendelkezésre. Az X2 jelű hármastól 3,3V-os feszültség érhető el az aktív működésű érzékelők tápfeszültség ellátásához, a középső tű csatlakozik a mikrovezérlő egyik analóg bemenetére, a harmadik tű pedig a föld. Az X2 jelölésű hármast hasonló felépítésű azzal a különbséggel, hogy a felső tűre itt egy 2,5 V-os referenciafeszültség lett kivezetve, valamint a középső tű a mikrovezérlő egy másik analóg bemenetével van összekötve. Az interfész aktuálisan használt szenzorhoz való beállításához a négy darab kapcsoló (a valóságban tranzisztorok) megfelelő konfigurálására van szükség. Ezt a feladatot a mikrovezérlő szoftvere végzi el, tehát a felhasználónak ehhez sem jumpereket nem kell áthelyeznie, sem kapcsolókat átkapcsolnia. Ezek a műveletek kényelmesen, szoftveres felületről szabályozhatók. A kapcsolók fel- és lehúzó ellenállásokat (mindegyik 10 k Ω) képesek be- vagy kikapcsolni az áramkörbe, kialakítva ezzel a használt érzékelőnek a megfelelő interfészt. Mivel két analóg bemenetet használhatunk, differenciális mérésekre is lehetőség van (pl. differenciális nyomásmérés). A következőkben eltérő működésű érzékelőkhöz alkalmazott beállítások bemutatása következik.

A 3.2.2. (a) ábrán egy ohmikus érzékelőhöz lett beállítva az interfész. Megfigyelhető a feszültségosztó áramkör kialakítás, amely lehetővé teszi az ilyen működésű szenzorok megfelelő illesztését. Az ohmikus érzékelő lehet például egy termisztor, amely egy félvezető anyagból készült hőérzékelő. Hőmérsékletváltozás hatására megváltozik az ellenállása, amely a 3.2.2. (a) ábrán látható kialakításnak köszönhetően az ellenállás változással arányos feszültségváltozást eredményez, ami pedig mérhető bemenetet szolgáltat a mikrovezérlőnek. Ez a beállítás alkalmazható más ohmikus szenzorok esetén is, pl. fotoellenállásnál.



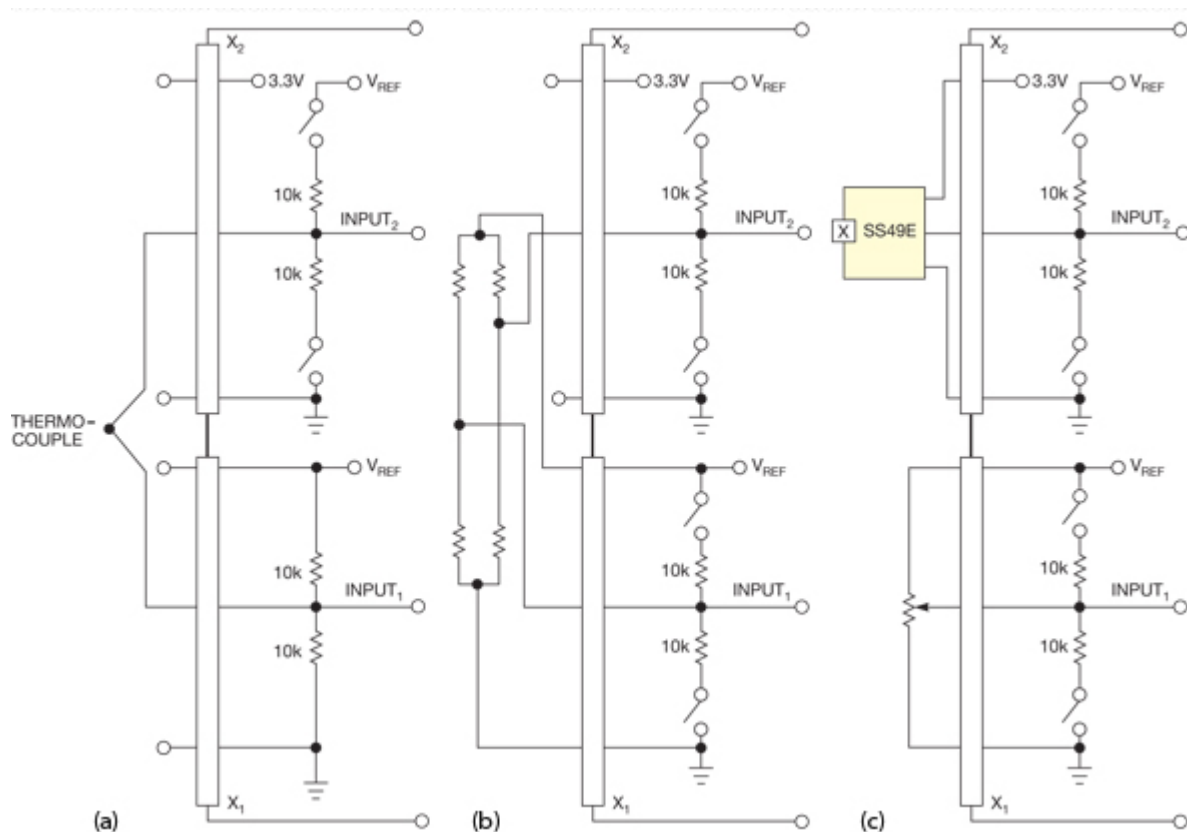
3.2.2. ábra: (a) ohmikus szenzor, (b) fotodióda interfészének beállítása [forrás: 4]

A 3.2.2. (b) ábrán egy másik beállítás látható, amelyet pl. fotodiódákhoz alkalmazhatunk. A fotodióda fény hatására fotoáramot termel, amelyet a kialakított áramkör a lehúzó ellenálláson eső feszültséggé konvertálja. Ez a potenciál különbség a mikrovezérlő egyik analóg bemenete és a közös földpont között fog kialakulni, amely szintén lehetővé teszi a feszültségmérést.

A 3.2.3. (c) ábrán látható beállításra is lehetőség van, amely potenciométeres mérésekhez alkalmas. Itt mindkét kapcsoló kikapcsolt állapotban van, tehát sem felhúzó, sem lehúzó ellenállás nincs az áramkörben. Ebben az esetben kihasználhatunk egy precíz feszültségforrást, a felső tűre kivezetett 2,5 V-os referenciát.

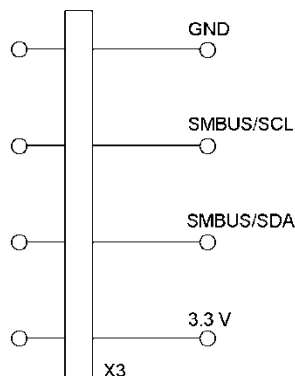
Ugyanezen az ábrán látható egy SS49E típusú Hall-szenzor, amely alkalmas a mágneses tér erősségének és polaritásának mérésére. Mivel ez egy aktív működésű szenzor, tápfeszültség szükséges a működtetéséhez, amely elérhető a felső hármastű egyikén 3,3 V feszültség formájában.

Az eddigi példákban a két csatlakozó sorból csak egy volt használva. Differenciális mérések esetén azonban mindkettőre szükség van. Ekkor a mikrovezérlő egyik analóg portja lesz a negatív, másik a pozitív bemenet (szoftverben kell azt meghatározni, hogy melyik-melyik lesz). Ezt a kialakítást használhatjuk pl. termoelem, vagy hídkapcsolások esetén. A termoelemnél a két szabad huzalvég (hidegpontok) csatlakozik a mikrovezérlő két analóg bemenetére. Az alsó csatlakozásnál előfeszítést alakíthatunk ki, ha mindkét ellenállást az áramkörbe kapcsoljuk. Ehhez a ponthoz képest mérhetjük a másik analóg bemeneten a hőmérséklet hatására bekövetkező feszültségkülönbséget. Ez látható a 3.2.3. (a) ábrán. Híd kialakítású szenzor esetén (pl. nyomásmérő) szintén mindkét bemenetet használni kell, valamint a 2,5 V-os referencia és a földpont bekötése is szükséges a megfelelő működéshez (3.2.3. (b) ábra).



3.2.3. ábra: (a) termoelem, (b) hídkapcsolás, (c) Hall szenzor és potenciométer
illesztése [forrás: 4]

A szenzorinterfészhez digitális működésű szenzorok csatlakoztatására is lehetőség van. Ezt egy további négyes csatlakozósor teszi lehetővé, amely a tápfeszültséget és az I²C kommunikációhoz szükséges SDA adat és SCL órajel vezetékeket biztosítja. A digitális kimenetű szenzorok előnye, hogy az információ digitális formában, közvetlenül beolvasható, ami normális esetben nem igényel előzetes jelkondicionálást. Előnyös továbbá, hogy a fizikai mennyiséget a szenzor általában belső elektronikája segítségével kiszámolja, így a mikrovezérlőnek kevesebb feladat jut. A digitális szenzorinterfész felépítése a 3.2.4. ábrán látható.



3.2.4. ábra: A digitális szenzorinterfész

3.3. A mikrovezérlő jellemzése, szerepe a rendszerben

A szenzorinterfész központi egységének, a mikrovezérlőnek a kiválasztásakor több szempontot kellett figyelembe vennem. Szenzoros méréseknél legfontosabb a pontosság, vagyis az, hogy a digitalizálás során minél kisebb legyen az adatvesztés. Fontos továbbá, hogy a mikrovezérlő megfelelő felbontással továbbítani is tudja az információt az áramkör egyéb egységeinek. Mivel az eszköznek loop-powered funkcióban is pontosnak és működőképesnek kell lennie, ezért a vezérlőnek alacsony fogyasztást kell biztosítania.

A fenti kritériumokat a Silicon Laboratories C8051F350 [5] (továbbiakban F350) típusú mikrovezérlő teljesíti, ezért erre esett a választásom. Ennek a 8 bites, 32 lábbal rendelkező típusnak a legjobb tulajdonsága a 24 bites szigma-delta A/D konverter, amely kiemelkedőnek számít (a Silabs az ún. „Analog-Intensive” csoportba sorolja). (Összehasonlításképpen: a C8051F410 és a C8051F120 A/D konvertere 12 bites, a C8051F060 típusé pedig 16 bites). A kimeneteket tekintve rendelkezik 8 bites D/A átalakítóval, akár 16 bites PWM generátorral, továbbá SMBUS, SPI és UART is elérhető. Megfelelő oszcillátor beállításokkal fogyasztása megfelelőnek mondható.

A mikrovezérlőnek három analóg bemenete lett felhasználva: kettő a szenzorinterfész felől érkező jeleket, egy pedig a kimenet visszacsatolását mintavételezi. A 24 bites digitalizálásnak köszönhetően nagy felbontású adatokon dolgozhat tovább. A szenzorinterfész megfelelő beállításáról is a vezérlő gondoskodik, az elérhető tizenhétből négy port lett felhasználva a tranzisztorok működtetésére, amelyek a fel- és lehúzó ellenállásokat kapcsolják be vagy ki az áramkörben. A digitális szenzoroknak két port lett kijelölve, amelyek az I²C kommunikációért felelnek. A számítások után az adatokat a 16 bites PWM kimeneten továbbítja a másodfokú szűrő felé, ehhez is szükség van egy portra. Az USB

interfészsel való kommunikációt az UART kezeli, amely két portot jelent. Az eszköz SPI kommunikációra is fel lett készítve későbbi fejlesztések céljából (erről a 6. fejezetben még szó lesz), amely további négy portot igényel. Van továbbá egy állapotjelző LED, amelyhez még egy portra szükség van. A fentiekből látszik, hogy az eszköz minden funkciójának kielégítése céljából a mikrovezérlő perifériáinak nagy részét használatba kell venni. Ebből a szempontból azonban mégsem kell kompromisszumokat kötni, a feladatot ez a típus tehát megfelelően képes ellátni.

3.4. A másodfokú szűrő

Ahogy az a 3.3.1. ábrán is látható, ahhoz, hogy a 4-20 mA-es konverter egység megkaphassa a mikrovezérlő által kiszámolt adatokat, a digitális információt folytonos jelekké kell alakítani. Ehhez sajnos nem alkalmas az F350 D/A konvertere az alacsony – 8 bites – felbontása miatt. Alternatív, de működő megoldás a 16 bites PWM generátor használata, amely sokkal jobb felbontást biztosít. A PWM (Pulse-width modulation) jel azonban kétállapotú – tehát nem folytonos –, ahol a kitöltési tényező hordozza az információt. A kitöltési tényező módosításával a kimenő jel közéértékét változtathatjuk. (Például ha egy 5 V-os PWM jel kitöltési tényezője 50%, akkor a kimenő feszültség átlaga 2,5 V lesz.) Ezt a 3.4.1 képlet alapján számolhatjuk ki.

$$U_k = U_b * W / T \quad (3.4.1)$$

Itt U_b a PWM működési feszültsége, T a periódusidő, W az egy periódus alatti magas logikai szint időtartama, U_k pedig a feszültség közéértéke. Ennek az értéknek egy stabil, ingadozásmentes fenntartására van szükség, ami megoldható egy passzív másodfokú RC aluláteresztő szűrővel. Ennek feladata, hogy a PWM jelben található szinuszos tagokat kiszűrje, és csak a DC feszültséget hagyja meg. A hatékonyan működő szűrő megtervezéséhez tudni kellett a PWM jel frekvenciáját, ezt a 3.4.2 képlet adja meg.

$$f_{PWM} = \frac{f_{léptetés}}{2^N} [Hz] \quad (3.4.2)$$

Itt $f_{léptetés}$ az a frekvencia, amellyel a PCA (Programmable Counter Array) működik (jelen esetben az oszcillátor frekvenciájával, ami 3,0625 MHz). A PCA egy olyan programozható számláló, melynek regiszterébe (pl. PCA0) a kiadni kívánt PWM jelhez

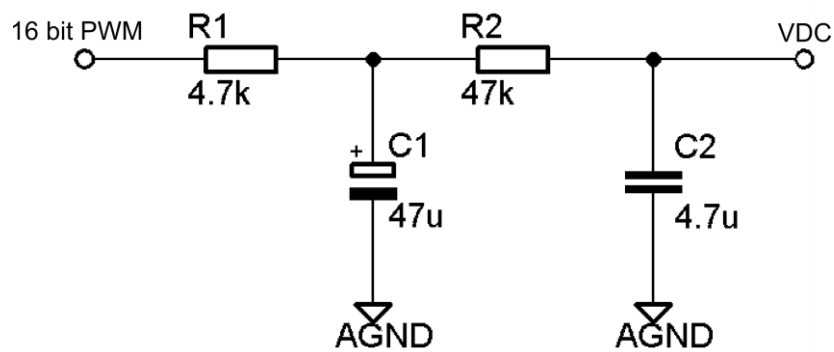
kapcsolódó értéket írhatjuk (ez 16 bites felbontás esetén 0–65535 lehet decimálisan). Az N a felbontást jelöli, amely most 16 bit. Így kiszámolható a kiadott PWM jel frekvenciája 46,73 Hz.

A szűrő vágási frekvenciájának meghatározásakor két szempontot kell figyelembe venni: a gyorsaságot és a pontosságot. Minél kisebb vágási frekvenciát (f_v) választunk a bemenő jelhez képest, annál több nagyfrekvenciás jelet szűrünk ki abból, így a kimenő jel kevésbé fog ingadozni. Azonban minél kisebb a vágási frekvencia, annál lassabban változó jelet kapunk a szűrő kimenetén. A készülő eszköznek nem kritériuma a gyors működés, ezért megállapítható, hogy $f_{PWM} \gg f_v$ lehetséges (vagy $f_{PWM} = K * f_v$, ahol $K \gg 1$), ezzel csökkentve a szűrő reakcióját, de növelve a kimenet pontosságát. Mivel a PWM jel már önmagában alacsony frekvenciájú, ezért a szűrő vágási frekvenciáját 1 Hz-ben határoztam meg.

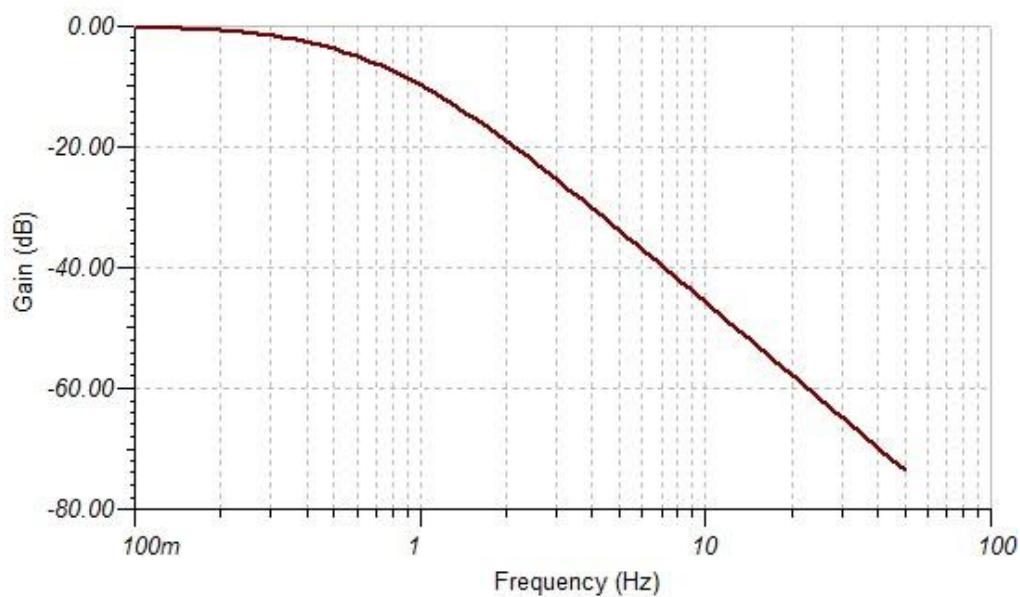
Elsőfokú RC szűrő alkalmazása esetén az eredményjel ingadozása megközelítőleg 3%, volt, amely nem elégséges a pontos működés szempontjából. Emiatt nagyobb vágási meredekségű másodfokú RC szűrőt alkalmaztam. A cél az volt, hogy a PWM frekvenciája (46,7 Hz) körüli tartományban a csillapítás akkora legyen, hogy az eredményjelben az ingadozásból fakadó hiba mértéke 1% alatti maradjon. A PWM frekvenciájához tartozó csillapítás a következőképpen számolható ki:

$$A(f_{PWM})[dB] \approx -20 * \log[(1 + 2\pi f_{PWM} R_1 C_1) * (1 + 2\pi f_{PWM} R_2 C_2)] \quad (3.4.3)$$

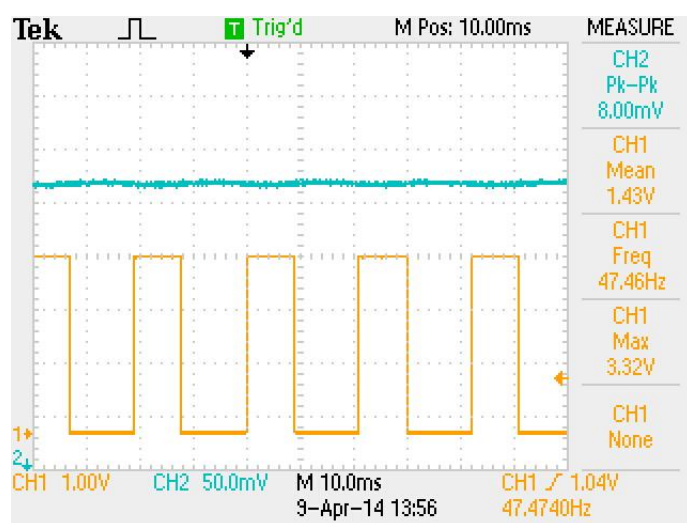
Az $R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 47 \text{ }\mu\text{F}$, $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$ megválasztásával $C_2 = 4,7 \text{ }\mu\text{F}$ eredmény született. A 3.4.3 képlet alapján kiszámítható, hogy a 46,7 Hz-es PWM frekvenciánál egy $C_1 = 4,7 \text{ }\mu\text{F}$ -os kondenzátorral 72,46 dB-es csillapítás érhető el. Ilyen csillapítás esetén a feszültség amplitúdója több mint 3000-ed részére csökken, így az ingadozása biztosan kisebb lesz 1%-nál. A 3.4.1. ábrán látható a másodfokú szűrő kapcsolása, a 3.4.2. ábra mutatja a szűrő Bode-diagramját, a 3.4.1. képen pedig a szűrő oszcilloszkópos vizsgálata látszik.



3.4.1. ábra: A másodfokú szűrő



3.4.2. ábra: A szűrő Bode-diagramja (amplitúdó erősítés)



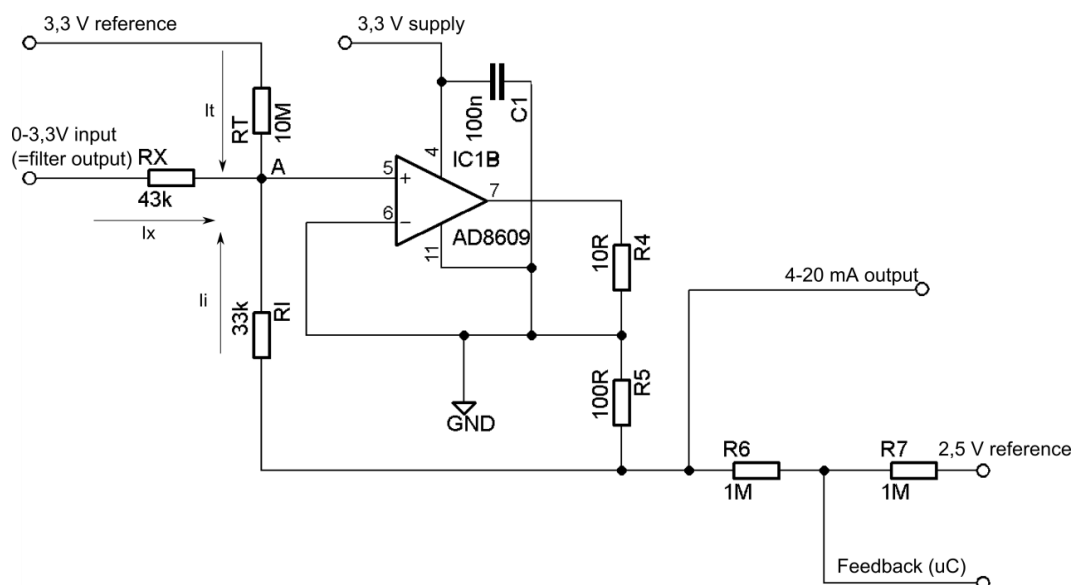
3.4.1. kép: A szűrő oszcilloszkópos vizsgálata

Az oszcilloszkópos képen az egyes csatornán sárga szín jelöli a PWM jelet, ami közelítőleg 47 Hz. Ennek az amplitúdója 3,3 V. A kettes csatornán kék színnel jelenik meg a PWM jelből szűrővel képzett feszültségjel, amelynek nagysága arányos a PWM kitöltési tényezőjével. 50 mV-os osztásnál látszik, hogy a feszültségjel csak kis mértékben ingadozik (peak-to-peak: 8 mV). Ez kisebb, mint 1%-os ingadozást jelent, ami bizonyítja a szűrő hatékonyságát.

3.5. A 4-20 mA-es konverter

A konverter feladata, hogy biztosítsa a szűrő felől érkező egyenfeszültséggel arányos áramjelet. Loop-powered módban ez az áram megegyezik az eszköz összes részáramkörének fogyasztásával (beleértve a 4-20 mA-es konvertert is). A költséghatékonyságot szem előtt tartva nem egy azonnal beépíthető integrált áramkört választottam.

A problémát egy műveleti erősítő és néhány passzív alkatrész segítségével sikerült megoldani. Az alkalmazott műveleti erősítőnek több elvárásnak is meg kellett felelnie. A legfontosabb szempont az alacsony fogyasztás volt. Az extrém alacsony fogyasztású típusokat a „µPower” jelzővel illetik. Fontos volt továbbá, hogy aszimmetrikus táplálással működjön 0 és 3,3 V között (single supply), valamint ki- és bemenő feszültsége táptól-tápig terjedjen (rail-to-rail input/output). Ez azért fontos, mert a szűrő kimenete ilyen tartományú. Ezeket a feltételeket az AD8609 típus [6] teljesíti (Analog Devices), ami egy „quad” (négy csatornás) műveleti erősítő (ebből még további kettő csatorna lett felhasználva a kapcsolás egyéb részein). Ennek fogyasztása csatornánként tipikusan 40 µA. A konverter kapcsolása a 3.5.1. ábrán látható.



3.5.1. ábra: A 4-20 mA-es konverter kapcsolása

Az műveleti erősítő nem invertáló bemenetén egy virtuális („A”-val jelölt) földpontot alakítunk ki, így az invertáló bemenethez képest itt 0 V feszültséget kapunk. Ezt a feszültségosztóban lévő megfelelő ellenállás értékekkel érhetjük el (R_T , R_X és R_I). A számítás a következő összefüggések segítségével történik:

A csomóponti törvény alapján:

$$I_T + I_x - I_I = 0 \quad (3.5.1)$$

Ennek megfelelően az Ohm-törvény alapján:

$$\frac{V_{ref}}{R_T} + \frac{X}{R_X} - \frac{I \cdot 100 \Omega}{R_I} = 0 \quad (3.5.2)$$

A V_{ref} itt 3,3 V-os referencia, az X az átalakítandó feszültség, az I pedig a 100 Ω -os ellenálláson átfolyó áram, ami egyben az eszköz kimenete is lesz (ez a végeredmény). Ha a kimeneti tartományt 0-25 mA-ben határozzuk meg (azért nem 4-20 mA-ben, mert így rugalmasabban kalibrálható lesz a rendszer), akkor a következő megállapítások írhatók fel:

$$\text{ha } X = 0 \text{ V} (= X_{alsó}) \rightarrow I = 0 \text{ mA} (= I_{alsó}) \quad (3.5.3)$$

$$\text{ha } X = 3,3 \text{ V} (= X_{felső}) \rightarrow I = 25 \text{ mA} (= I_{felső}) \quad (3.5.4)$$

Továbbá megválasztjuk az R_T ellenállás értékét 10 M Ω -nak. Ennek megfelelően felírható a következő egyenletrendszer:

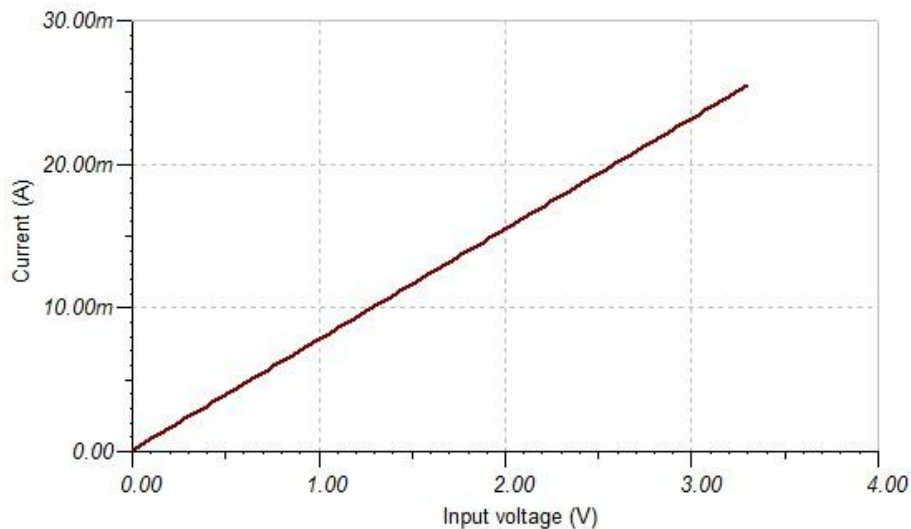
$$\begin{cases} \frac{V_{ref}}{R_T} + \frac{X_{alsó}}{R_X} - \frac{I_{alsó} \cdot 100 \Omega}{R_I} = 0 \\ \frac{V_{ref}}{R_T} + \frac{X_{felső}}{R_X} - \frac{I_{felső} \cdot 100 \Omega}{R_I} = 0 \end{cases} \quad (3.5.5)$$

Az egyenletrendszert megoldva a következő ellenállás értékek lettek kiválasztva (a szabványos elérhető értékekre kerekítve):

$$R_T = 10 \text{ M}\Omega, R_X = 43 \text{ k}\Omega, R_I = 33 \text{ k}\Omega$$

A 4-20 mA-es konverter szimulációjának eredménye a 3.5.2. ábrán látható. Vízszintes tengelyen a bemenő feszültség, függőleges tengelyen pedig a kimenő áram szerepel. Ez egy ideális esetet mutat be. A műveleti erősítő ugyan rail-to-rail tulajdonságú, azonban a táphoz

közelítve a linearitása valamennyire mégis romlani fog. Emiatt fontos, hogy nem 4-20 mA-ben lett meghatározva a kimeneti jeltartomány, hanem 0-25 mA-ben. Ez az eszköz összefogyasztása miatti problémákat is kiküszöböli. Ha az 4 mA alatt van, akkor a 4-20 mA-es tartományban a kimenet már lineáris lesz.



3.5.2. ábra: A 4-20 mA-es konverter szimulációjának eredménye

Az áramkimenet hatására a 100 Ω -os ellenálláson eső feszültség egy feszültségosztón keresztül visszacsatolásra került a mikrovezérlő egy különálló analóg bemenetére. Ennek szerepe az, hogy az eszköz szoftveresen kalibrálni tudja a PWM-et a 4-20 mA-es átalakító tulajdonságaihoz (ez opcionális). A feszültségosztó 1 M Ω -os ellenállásai megakadályozzák, hogy ezen az ágon jelentős áram folyjon, továbbá a feszültségosztó pozitív feszültségbemenetet biztosít a mikrovezérlő A/D átalakítójának.

3.6. Az USB interfész

A szenzormodul rendelkezik egy mini USB interfésszel (USB/UART), amely a korábbiakban bemutatottakon kívül számos új funkcióval ruházza fel a műszert. Segítségével megoldható a külső eszközzel való kommunikáció. Ez egyrészt lehetőséget nyújt egy szabványos interfésszel működő gyors és egyszerű adatgyűjtésre, valamint a szenzormodul kívülről történő konfigurálását is biztosítja. Ez lehetővé teszi például azt is, hogy a műszert kizárólag egy PC-n futó alkalmazás segítségével működtessük, a begyűjtött adatokat tároljuk, feldolgozzuk, elemezzük.

Az USB kapcsolat további előnye, hogy tápvezeték is tartalmaz, amelyet felhasználhatunk a szenzorinterfész táplálására is. Ez szintén számos előnyt nyújt. Egyrészt a

műszer egyes részáramköreinek táplálása megoldható az USB portról. Ez azzal is jár, hogy a működtetéshez nem feltétlenül szükséges az áramhurok fenntartása. Ebben az esetben persze nem használhatjuk ki a 4-20 mA-es funkciót, de a soros kommunikációval gond nélkül küldhetünk adatokat pl. egy PC-re az USB porton keresztül. Másik nagy előny, hogy ezzel a módszerrel kiterjeszthető a szenzormodulhoz illeszthető érzékelők száma, mivel nagyobb (jóval több, mint 4 mA) fogyasztással rendelkező típusokkal is mérhetünk. A fogyasztásról, valamint annak optimalizálásáról a következő (3.7.) fejezetben lesz bővebben szó.

3.7. A fogyasztás optimalizálása

A szenzorinterfész 4-20 mA-es funkciója, valamint a loop-powered működésből adódóan kiemelt jelentőségű volt a minél kisebb fogyasztás elérése. A korábbi fejezetekben már szerepeltek ezzel kapcsolatos említések. Olyan alkatrészeket, integrált áramköröket kellett választanom, amelyek biztosítják a megfelelő mérési pontosságot, mégis alacsony fogyasztásúak. A legnagyobb energiaigénye a mikrovezérlőnek van, emiatt a szoftvernek is megfelelőnek kell lennie. Ebben az esetben a gyors működés alul marad az energiahatékonysággal szemben, ezért a vezérlő alacsony frekvenciájú (3 MHz) órajellel működik. Arra is figyelni kell továbbá, hogy milyen perifériákat működtetünk. A műveleti erősítők is lehetnek energiaigényesek, viszont sikerült egy hatékonyan működő típust találni (a 3.5. fejezetben részletezve). Az összes aktív/passzív alkatrész figyelembe véve, megfelelő szoftverrel ~3,8 mA-es fogyasztás volt elérhető (a szenzor nélkül). Ez csak abban az esetben kielégítő, ha a csatlakoztatott érzékelő <0,2 mA fogyasztású. Ez a korlát nagyban leszűkíti az illeszthető szenzorok számát, emiatt további fejlesztésekre volt szükség.

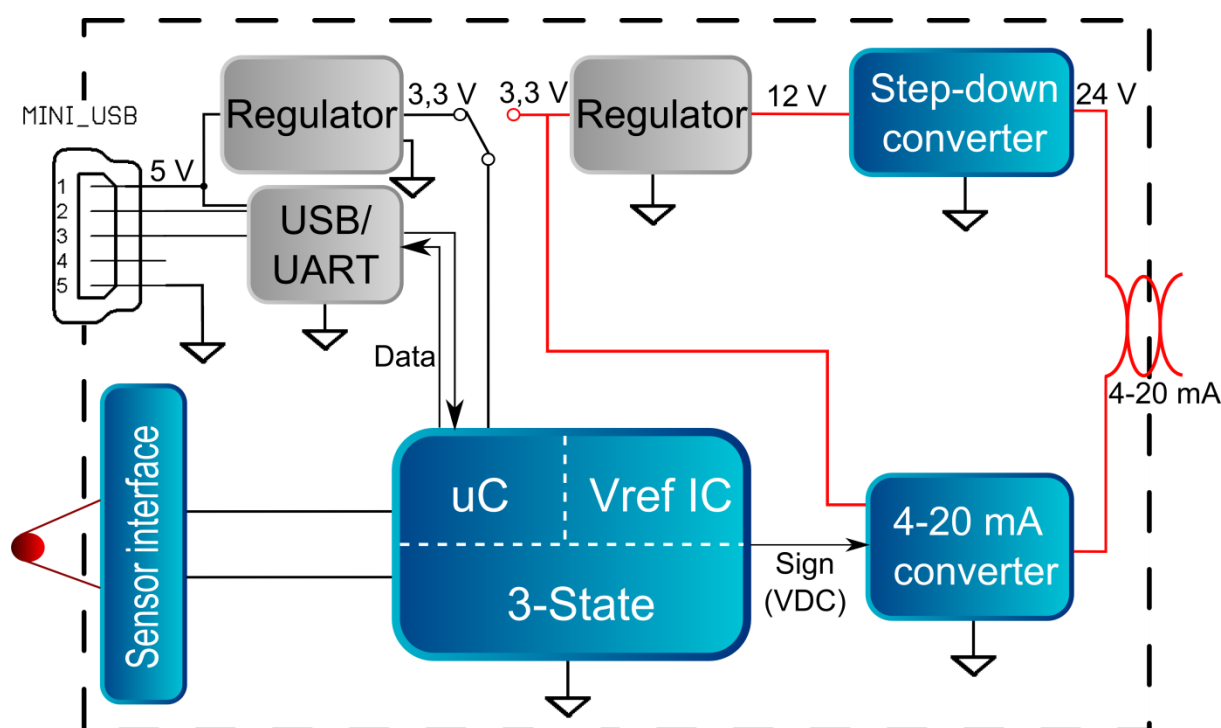
Az egyik megoldás egy step-down (vagy „buck”) konverter [7] alkalmazása volt. A hagyományos feszültség szabályozó (voltage regulator) áramköröknek megvan az a hátrányuk, hogy az energia jelentős részét eldisszipálják. A step-down konverterek ezzel szemben akár >90% hatékonysággal is rendelkezhetnek. Működésük lényege, hogy egy nagyobb feszültségesítés (voltage step-down; pl. 24 V → 3,3 V) hatására megnő a kimenetén kivehető áram (current step-up). Ez a jelenség a buck konverter hatékonyságával magyarázható az $I = P/U$ képlet alapján. Az I áram a kimeneten az U feszültség esésének következtében ~90%, vagy e fölötti hatékonyság mellett jóval nagyobb lesz, mint a bemeneten. A szenzorinterfész esetében a végeredmény az, hogy nagyobb fogyasztású érzékelők is illeszthetők a műszerhez. A TPS54062-es típust (Texas Instruments)

alkalmaztam [8]. Ennek egy tipikus felhasználása pedig a melléklet 1. ábráján látható. A kimeneti feszültséget a 3.7.1. képlet [forrás: 8] alapján kapjuk.

$$V_{OUT} = \frac{R_{HS} * 0,8V}{R_{LS}} + 0,8V \quad (3.7.1.)$$

Itt R_{HS} és R_{LS} a melléklet 1. ábráján a kapcsolásban látható ellenállások, amelyek segítségével beállítható a kimeneti feszültség. Ezek az értékek a szenzormodul esetén: $R_{HS} = 143 \text{ k}\Omega$, $R_{LS} = 10 \text{ k}\Omega$. A bemenő feszültség 24 V, amely szabványos tápkimenet pl. PLC-k esetén, így a szenzormodul közvetlenül illeszthető a logikai vezérlőkhöz. (Ez a step-down konverter egyébként 60 V-os bemenetet is elvisel.) A megadott ellenállásoknak megfelelően a kimenő feszültség $\sim 12 \text{ V}$, ami optimálisnak bizonyult az alkalmazás szempontjából. A 12 V-os feszültséget egy stabilizátor IC 3,3 V-ra konvertálja. A step-down konverter a műszer korábbi $\sim 3,8 \text{ mA}$ -es fogyasztását $\sim 3,2 \text{ mA}$ -re redukálta.

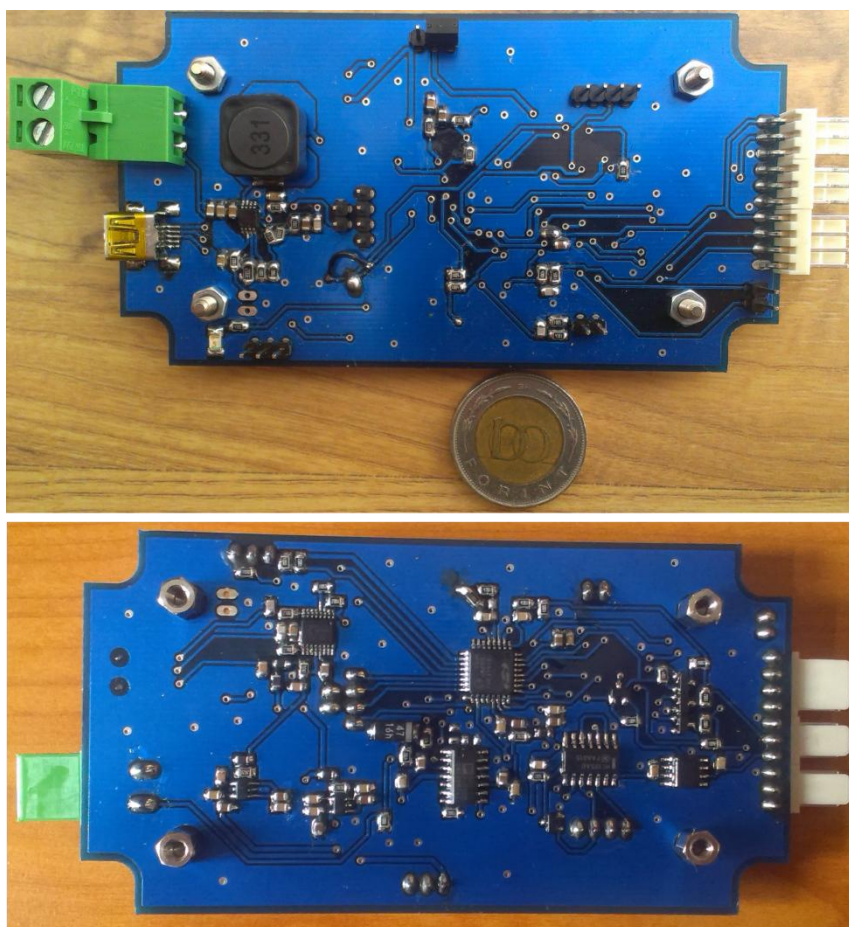
A buck konverter beiktatása csökkentette a fogyasztást, azonban így is vannak olyan szenzorok, amelyek túl nagy áramfelvétellel rendelkeznek. Emiatt ki kellett használni az USB port által nyújtott lehetőségeket. A műszer lehetővé teszi az USB-ről való táplálást is, ami megoldja az illeszthető szenzorok problémáját. A 3.7.1. ábrán láthatók a szenzorinterfész táplálási funkciói.



3.7.1. ábra: A szenzorinterfész táplálása

Az ábrán megfigyelhető, hogy az áramhurokhoz tartozó körről (pirossal jelölt vonal) egy kapcsoló segítségével leválaszthatóak azok az áramköri elemek, amelyek a legnagyobb fogyasztásúak: a mikrovezérlő, egy referencia áramkör, egy 3-state áramkör (ez további fejlesztésekre szolgál, amelyeket a 6. fejezetben részletezek), valamint a szenzorinterfész a csatlakoztatott szenzorral együtt. Ezek közül a szenzor fogyasztása volt a legkiemelkedőbb probléma, ami ezzel a kialakítással megoldódott, mivel annak áramfelvétele már nem a 4-20 mA-es áramhurokot terheli. Fontos, hogy így a műszer az áramhurok felől érkező táplálás nélkül is üzemel, USB kommunikációval használható (ekkor a 4-20 mA-es funkció nem működik), továbbá egyszerre akár mindkét adattovábbítási lehetőség is alkalmazható. Megmarad azonban a kizárólag két vezetékpárról, vagyis a loop-powered módban való működtetés lehetősége is.

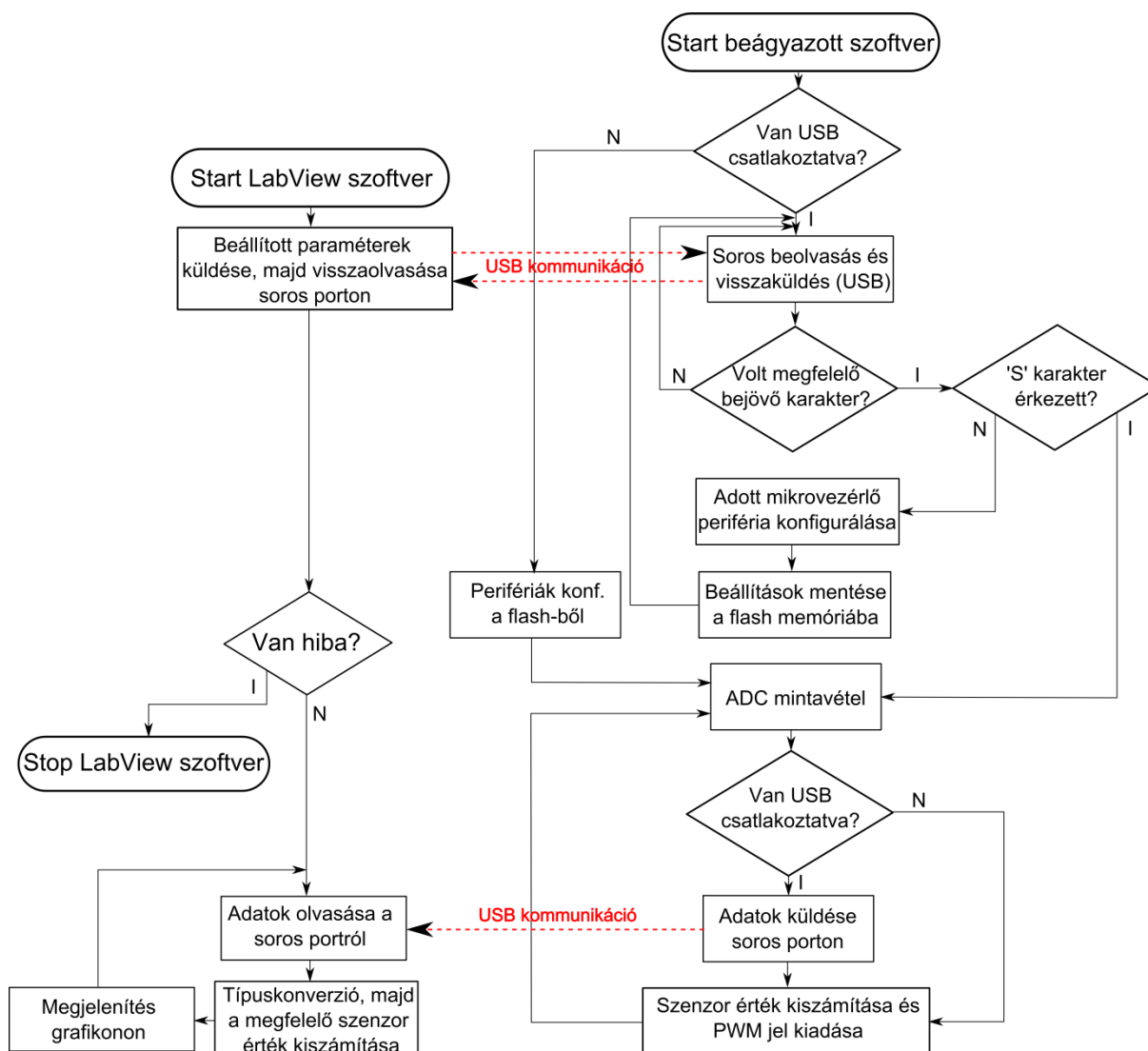
A szenzorinterfész kapcsolási rajzát, valamint a nyomtatott áramköri terveket az Eagle nevű áramkörtervező szoftverrel készítettem el. A kapcsolási rajz a melléklet 2. és 3. ábráján, a nyomtatott áramkör terve pedig a melléklet 1. képen látható. A kész szenzorinterfész a 3.7.1. képen szerepel.



3.7.1. kép: A kész műszer (felső kép: felső oldal, alsó kép: alsó oldal)

4. A szoftver

A szenzorinterfész mikrovezérlő alapú, ezért egy beágyazott szoftver fejlesztésére volt szükség. Ezt a Silicon Laboratories IDE fejlesztőkörnyezetben végeztem el, amelyben lehetőség van C programozási nyelvet használni (néhány kódrészlet assembly nyelven is íródott). A beágyazott program egy LabVIEW [9] programozási környezetben implementált PC-s alkalmazással kommunikál az USB soros porton keresztül. Ezzel az alkalmazással a felhasználó egy interaktív grafikus felületen konfigurálhatja a mikrovezérlőt a kívánt működésre. A mérés kezdete után a szenzorinterfész folyamatosan küldi a mért adatokat a PC-nek. A LabVIEW program ezután átalakítja a kapott információt a beállított szenzornak megfelelő függvény segítségével, majd grafikonon jeleníti meg a mért értékeket. Mindez valós időben történik. A rendszer folyamatábrája a 4.1. ábrán látható.

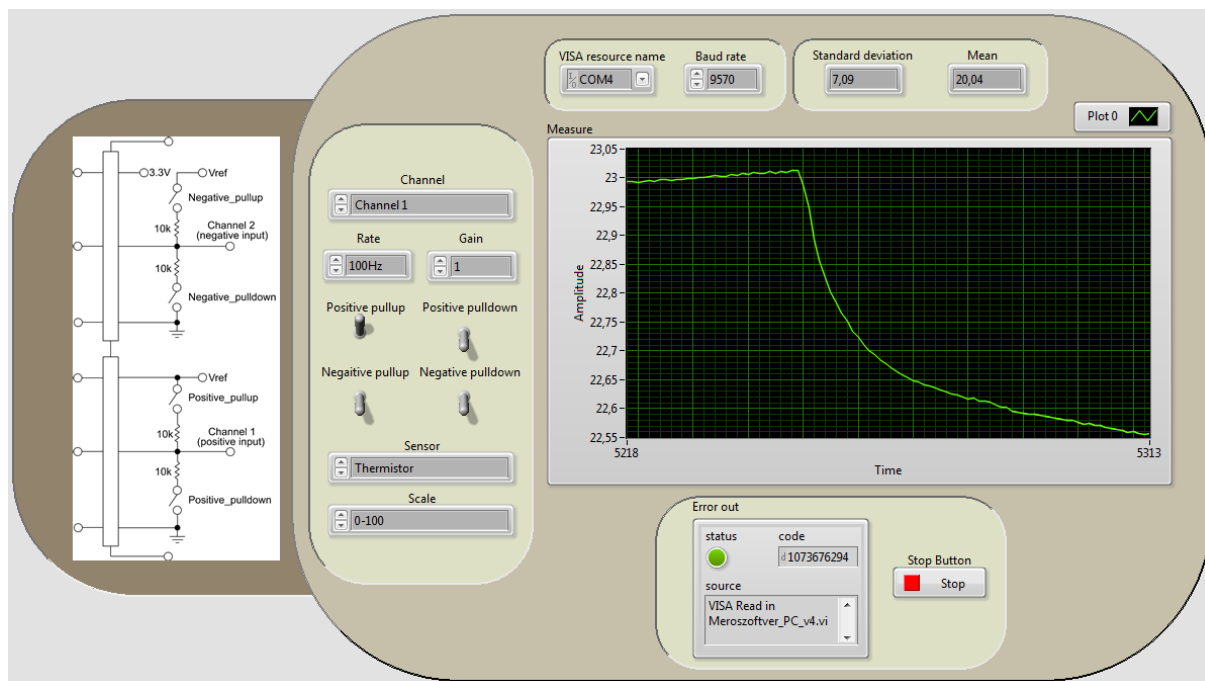


4.1. ábra: A mérőrendszer folyamatábrája

Fontos megjegyezni, hogy a szenzorinterfész USB csatlakoztatás nélkül is használható, vagyis nem szükséges minden alkalommal felkonfigurálnunk. Az utolsó USB-ről, az PC-s alkalmazással történő konfigurációt a szenzormodul tárolja a flash memóriájában, ami a tápfeszültség megszűnése utáni újbóli indításnál elérhető. Ez abban az esetben lehet hasznos, ha a későbbiekben csak a 4-20 mA-es funkciót szeretnénk használni. Így nem kell minden bekapcsolásnál újra beállítani az műszert. Elég akkor, ha pl. új szenzort szeretnénk hozzá illeszteni, vagy az A/D konverter beállításain szeretnénk módosítani, stb.

4.1. Szoftver funkciók

Az LabVIEW alkalmazás számos beállítási lehetőséget biztosít. A grafikus felület a 4.1.1. képen látható. Erről egy nagyobb változat található a melléklet 2. képen.



4.1.1. kép: A LabVIEW alkalmazás kezelőfelülete

A felhasználónak először be kell állítania azt a COM portot, amelyikre a szenzorinterfész csatlakoztatva van (Visa resource name). Ezután meg kell adnia az adatátvitel sebességét (baud rate), amely az aktuális szoftverben 9600 bit/sec értékre lett meghatározva. Ezt követően be kell állítani a mikrovezérlő perifériáit konfiguráló adatokat. Ehhez segítséget nyújt a bal oldalon látható kapcsolás részlet, amely az analóg szenzorokhoz való konfigurálásnál lehet hasznos. Meg kell adnunk, hogy a két analóg bemenő csatornából (Channel) melyiket használjuk (differenciális mérések esetén mindkét csatorna használatára is

lehetőség van). Következő lépésben megadhatjuk, hogy az A/D konverter milyen frekvenciával mintavételezzon (Rate), valamint hogy a jelet szeretnénk-e erősíteni (Gain). Az ez alatt lévő négy kapcsolóval beállíthatjuk a szenzorválasztó interfészt (fel- és lehúzó ellenállások). Ehhez szintén segítséget nyújt a bal oldali kapcsolás. Ezt követően ki kell választani egy listából (Sensor), hogy milyen szenzort csatlakoztattunk a szenzormodulhoz. Jelenleg hatféle szenzor áll rendelkezésre (plusz még egy opció van egyszerű feszültségmérésre is), de a listát természetesen lehet még bővíteni. (A felhasznált érzékelőkről és az alkalmazott típusokról a következő (4.2.) fejezetben írok.) Végül beállíthatjuk, hogy milyen skálán szeretnénk látni a mért értékeket (Scale). A fenti beállítások a mikrovezérlő flash memóriájában tárolódnak (a korábban tárolt konfigurációt felülírva), és természetesen akkor is érvényesek, ha a 4-20 mA-es funkciót alkalmazzuk. Tehát a program egy egységes konfigurációs felületet biztosít.

Az LabVIEW alkalmazás elindítása előtt be kell kapcsolnunk a szenzorinterfészt. Ahogy az a 4.1. folyamatábrán is szerepel, a mikrovezérlő ciklikus, az USB-ről történő beolvasással várja az LabVIEW program indulását. Amikor ez megtörténik, az alkalmazás elküldi a szenzorinterfésznek a felhasználó által megadott beállításokat. Miután a mikrovezérlő beolvassa ezeket az információkat, rögtön visszaküldi azokat a PC-nek, a LabVIEW program pedig leellenőrzi, hogy a küldés sikeres volt-e. Ha igen, akkor várja a szenzorinterfész felől érkező mérési adatokat. Ha nem ugyanazok az adatok jönnek vissza, amelyeket elküldött, akkor a program hibaüzenettel leáll. Ez a grafikon alatti mezőben jelenik meg (error out). A kapott adatokat az LabVIEW alkalmazás feldolgozza, a megfelelő szenzorhoz tartozó számolással megadja a pillanatnyi fizikai/kémiai értéket, majd megjeleníti azt a grafikonon. A grafikon felett a jobb oldalon leolvasható a mért átlag és a szórás is. A mérés addig tart, amíg a felhasználó nem nyomja meg a Stop gombot.

4.2. Az alkalmazott szenzorok

A jelenlegi rendszerhez hat különféle szenzort illesztettem. Ebben a fejezetben szó lesz ezek működéséről – a teljesség igénye nélkül – valamint a kiválasztott típusokról. Próbáltam a leggyakrabban használt típusokat kiválasztani, ezért hőmérséklet, fény, nyomás és mágneses tér mérésére alkalmas érzékelőkkel dolgoztam.

A hőmérsékletet többféle módon mérhetjük. A megfelelő érzékelő kiválasztásánál figyelembe kell venni, hogy mekkora az a várható skála, amin mérni szeretnénk, valamint hogy milyen gyors legyen a szenzor (vagyis milyen gyorsan reagáljon a külső változásokra).

Az egyik leggyakrabban alkalmazott érzékelő a termisztor, amely félvezető anyagból készül, hőmérsékletváltozás hatására ellenállása megváltozik. NTC és PTC típusú létezik (az NTC ellenállása a hőmérséklettel fordított arányban, a PTC-nek egyenes arányban változik). A termisztorok jóval érzékenyebbek, mint a fém ellenállás-hőmérők, ezért azokat számos alkalmazásban felhasználják. Én egy NTC típusú gyöngy termisztort [10] választottam (a 4.2.1. képen látható). Ez egy olcsón beszerezhető, stabilan, pontosan és viszonylag széles tartományban működő ($-40...+125\text{ }^{\circ}\text{C}$) érzékelő. Válaszideje néhány szekundum.

A hőmérsékletet termoelemmel is mérhetjük, ami két különböző anyagból készült, egy ponton összehegesztett fémhuzal. A két fém anyagi eltérései és a hideg- és melegpont közötti hőmérsékletkülönbség miatt a két hidegpont között feszültségkülönbség keletkezik. Ez az eltérés arányos a környezeti hőmérséklettel. A termoelemek nagy hőmérsékleti tartományban képesek mérni (akár $-200...+1800\text{ }^{\circ}\text{C}$), tehát strapabíróak. A felhasznált fémektől, ártól, olvadási ponttól, stb. függően több típusuk is elérhető. Például a K típusú termoelem általános célokra kiválóan alkalmazható. Ez egy nikkelből és krómból készült érzékelő. Érzékenysége $41\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, és a $-200...+1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os tartományban képes mérni. Én is egy ilyen típust alkalmaztam (a 4.2.1. képen látható).

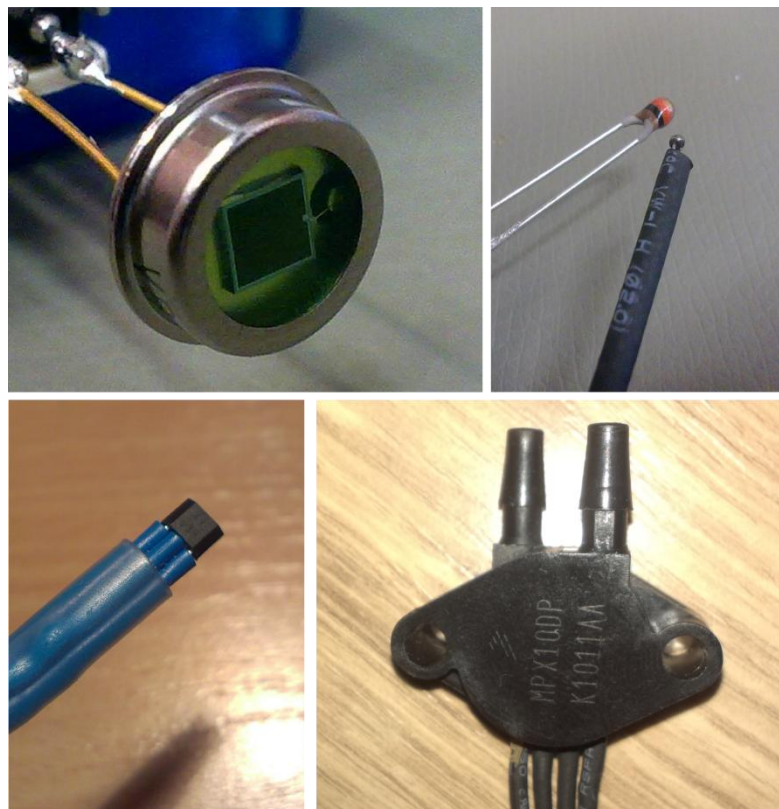
A fény érzékelésére egy BPW-21R típusú fotodiódát használtam [11], ami a fotoellenállással szemben precíz fénymérésre alkalmas (a 4.2.1. képen látható). Kétféleképpen működtethetők: nyitó és záró irányban. Záró irányú működtetés esetén a fotodiódán a fény hatására áram folyik (a szenzorválasztó interfésznél emiatt van szükség a lehúzó ellenállásra, amelyen a fotoárammal arányos potenciálkülönbséget mérjük).

A mágneses teret Hall-szenzorral mértem [12]. Ez az érzékelő a Lorentz-erőt használja ki, a mágneses tér erősségén kívül képes érzékelni annak pólusát is (szemben a magnetorezisztorral). A Hall-szenzor működése a Hall-effektuson alapul, amely egy galvanomágneses jelenség. Mivel a Lorentz-erő a félvezető töltéseit keresztirányban elmozdítja, ezért a hasáb vezető áram-bemenetre merőleges síkjain polarizáció keletkezik. Ez a potenciálkülönbség a Hall-feszültség, amelyet mérhetünk. A kiválasztott típus az SS49E [13] (a 4.2.1. képen látható), amely lényegében egy integrált áramkör, tápfeszültség szükséges a működtetéséhez (illesztése a 3.2.3. (c) ábrán szerepel). A mágneses tér hatására megváltozik a kimenő feszültsége, amelyet a mikrovezérlő analóg bemenetén közvetlenül mérni lehet.

Végezetül egy differenciális nyomásmérőt is illesztettem, amely két különböző nyomás közti eltérést mér. Az egyik mérési pontot szabadon hagyva (pl. légköri nyomáson) megmérhető az ehhez képest a másik mérési ponton fellépő nyomáskülönbség. Ennek működési elve egy híd-kapcsolás, amelyet a szenzorba integrálnak, így a kimenet feszültség

lesz. A szenzormodulhoz való illesztésnél mindkét analóg bemenetet használnunk kell (3.2.3. (b) ábra), valamint a LabVIEW alkalmazást is ennek megfelelően kell beállítani (Channel). Az alkalmazott típus az MPX10DP [14] (a 4.2.1. képen látható).

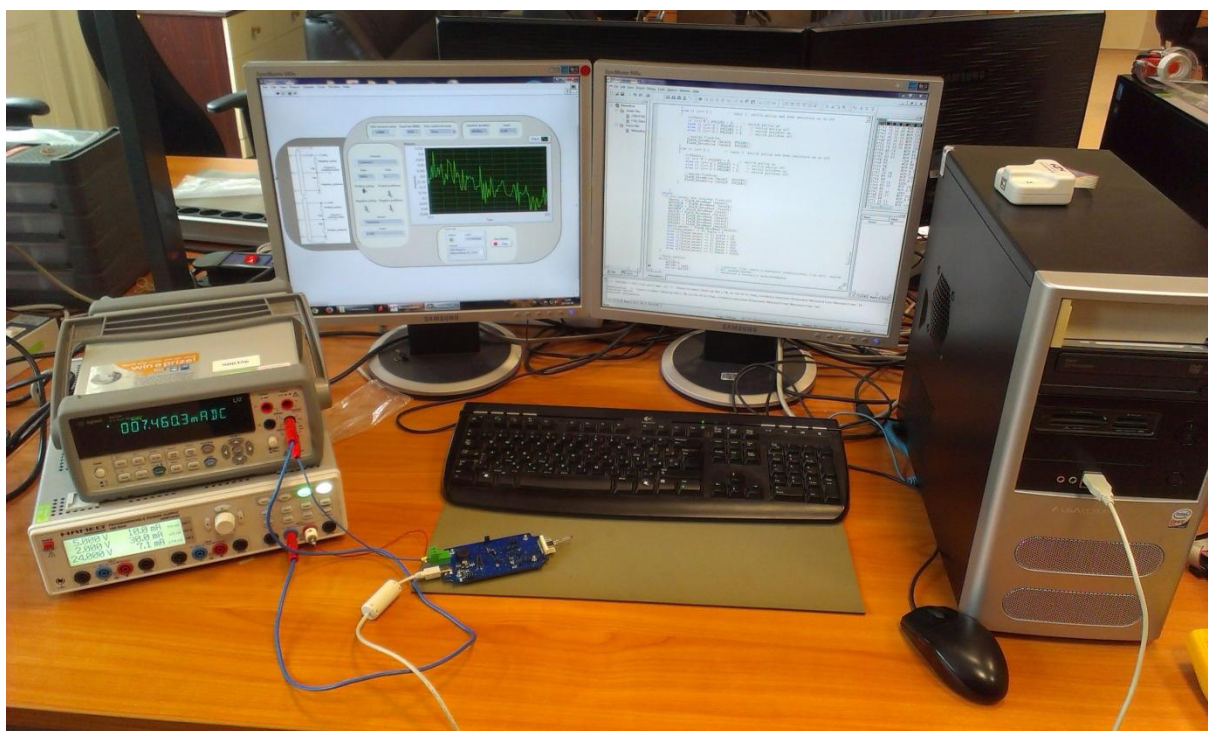
Mint ahogy az már a korábbi fejezetekben is szerepelt, a szenzorinterfész lehetővé teszi digitális, I²C protokollal kommunikáló érzékelők illesztését is. Ehhez egy további négyes tűske bemenet áll rendelkezésre (ez szerepel a 3.2.4. ábrán). Ennek tesztelésére az LM75 [15] típusú digitális hőmérőt használtam, amely egy integrált áramkör formájában elérhető. Két vezetékkel igényel a tápláláshoz, kettőt pedig a kommunikációhoz (SDA, SCL). Felbontása 0,5 °C, előnye viszont az, hogy közvetlenül °C egységben, digitális formában kapjuk az eredményt, így előzetes jelkondicionálásra és további feldolgozásra a mikrovezérlő részéről nincs szükség. Az LM75-höz hasonlóan más I²C-vel kommunikáló érzékelők is illeszthetők a szenzormodulhoz.



4.2.1. kép: Az alkalmazott szenzorok: felső sor [forrás: 1] balról: fotodióda, termisztor, termoelem; alsó sor balról: Hall-szenzor, nyomásmérő

5. A rendszer tesztelése

Az összeállított mérőrendszer az 5.1. képen látható működés közben. Itt a szenzorinterfész mindkét funkciója használatban van. A táplálás jelen esetben PC-ről, az USB porton keresztül történik, az áramhurok pedig egy tápegységről működik, amely 24 V-ot biztosít. A 24 V-os tápfeszültség előnyös lehet ipari felhasználás esetén, pl. PLC-hez való illesztésnél. A 4-20 mA-es kimenet mérését egy nagy pontosságú multiméter biztosítja. A bal oldali monitoron látható a korábbi fejezetben bemutatott LabVIEW alkalmazás kezelőfelülete, amelyen jelenleg egy termisztoros mérés eredményeit láthatjuk. A mérés valós időben történik, vagyis mindkét funkció esetén azonnal megjelennek a szenzor által érzékelt változások. A termisztorral ez esetben a szobahőmérsékletet mértem. A multiméteren (bal oldalon a felső műszer) 7,46 mA volt az eredmény, ami 0-100 °C-os skálán – amelyet a kezelőfelületen kellett beállítani (Scale) – $\sim 21,6$ °C-ot jelent. Az értéket összehasonlítottam több, a laborban található hőmérő eszköz eredményével is, ami egyezett a szenzorinterfész által mért adatokkal.

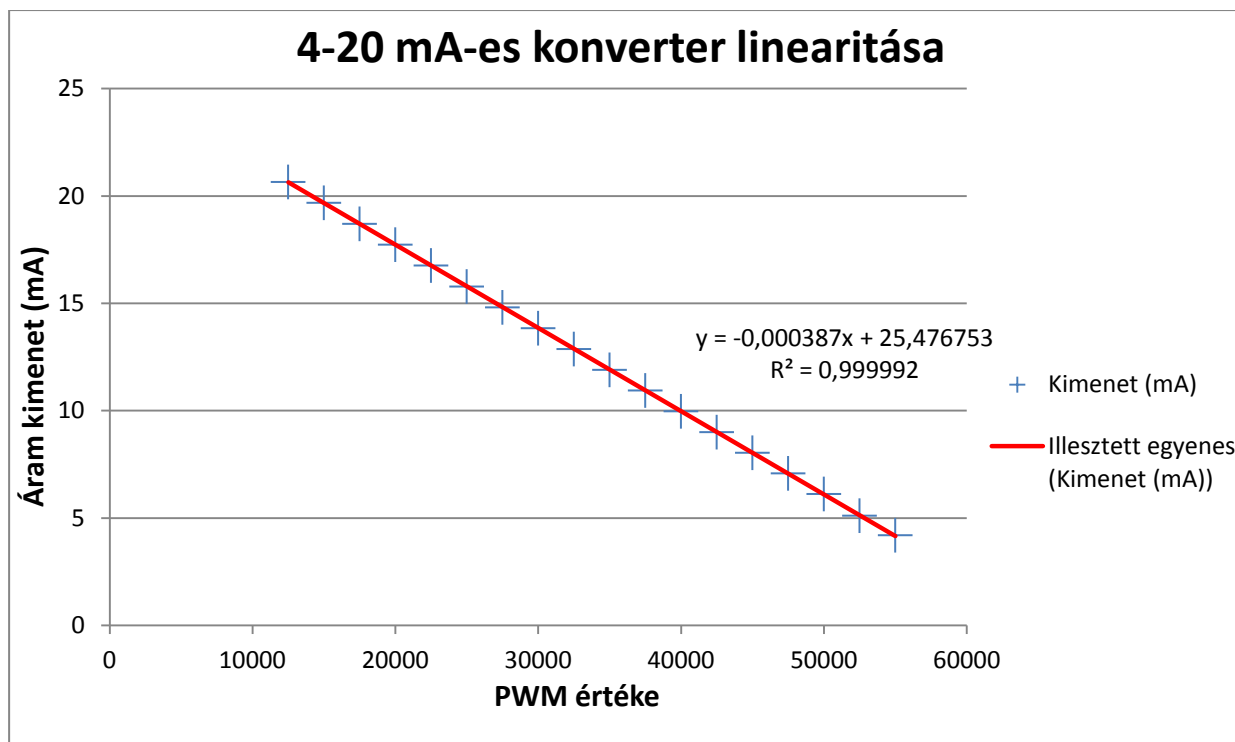


5.1. kép: Az összeállított rendszer

A tesztek során a szenzorok megfelelő működésén kívül meg kellett vizsgálni a szenzorinterfész fogyasztását, valamint a 4-20 mA-es kimenet linearitását is. A fogyasztás lényegében megegyezik azzal a legkisebb áram kimenettel, amelyet a 4-20 mA-es konverter még képes kiadni. Ezt úgy a legegyszerűbb vizsgálni, ha a konverter bemenetére a lehető

legkisebb feszültséget, 0 V-ot kapcsolunk, amelyet legkönnyebben 0% kitöltési tényezőjű PWM jel kiadásával lehet megtenni (ennek működése a 3. fejezetben volt részletezve). A fogyasztást kétféleképpen vizsgáltam meg: tisztán loop-powered módban ~3,2 mA, USB táplálás mellett pedig ~1mA volt (ekkor az áram hurokról csak a 4-20 mA-es konverter egységet tápláljuk). USB táplálás mellett lényegében bármilyen szenzort illeszthetünk, annak fogyasztása az áram kimenetre nem lesz hatással. Erre bizonyíték pl. a Hall-szenzor illesztése, amely már önmagában is 4,2 mA fogyasztással bír, a konverter mégis képes a 4 mA-es kimenet létrehozására.

A 4-20 mA-es konverter linearitását szintén a mikrovezérlő PWM kimenetével vizsgáltam meg. Ehhez egy szoftverre volt szükség, amely 0–65500-ig 2500 egységenként növeli a megfelelő regiszter (PCA0) értékét, ezzel egyenletesen változtatva a PWM kitöltési tényezőjét. Az eredmények az 5.1. ábrán láthatók.



5.1. ábra: A 4-20 mA-es konverter linearitása

A grafikonon kék kereszttel vannak jelölve a mért kimeneti értékek, a piros vonal pedig az ezekre illesztett lineáris trendvonalat jelöli. Jól látszik, hogy a 4-20 mA-es tartományban (a grafikonon csak ezt a kritikus tartományt jelenítettem meg) ezek szinte teljesen egybeesnek, tehát a kimenet lineáris. A melléklet 1. táblázatán szerepelnek a részletes eredmények, amelyek azt mutatják, hogy a tartomány egész területén 1% alatti a lineárisához viszonyított hiba.

6. További fejlesztési lehetőségek

A szenzorinterfész jelenleg hatféle érzékelő illesztését teszi lehetővé. Ez a szám természetesen növelhető, számos egyéb szenzor csatolására is lehetőség van, ez egyedül a beágyazott szoftver, valamint a LabVIEW alkalmazás továbbfejlesztését igényli.

A műszer továbbá fel lett készítve későbbi hardveres bővítésekre is. A nyomtatott áramkört úgy alakítottam ki, hogy arra egy opcionális második panel is illeszthető legyen. Ez további funkciókkal bővítené a jelenlegi rendszert. Tervbe van véve ennek a panelnek az elkészítése, amely rendelkezni fog egy OLED kijelzővel, egy bluetooth modullal, valamint egy akkumulátorral is. Az OLED kijelző a mért értékek direkt leolvasását biztosítaná, tehát nem lenne szükség semmilyen külső eszközre a mérési eredmények leolvasásához. A bluetooth modul vezeték nélküli kommunikációt valósít meg, amely lehetővé teszi a szenzormodul mobil applikációval történő kommunikációját is. Az akkumulátor az OLED kijelző mellett tovább növelné a mobilitást – amelyet az USB portról egyszerűen feltölthetünk –, így egy külső eszközöktől teljesen független, precíz mérőműszer áll majd a rendelkezésünkre úgy, hogy a korábbi funkciók továbbra is elérhetőek maradnak.

7. Eredmények összefoglalása

Az iparban egyre nagyobb jelentőséggel bírnak azok a kompakt, kis fogyasztású műszerek, amelyek lehetővé teszik a folyamatok precíz, valós idejű monitorozását. Költséghatékony megoldás lehet, ha ezek az eszközök több funkcióval is rendelkeznek, több érzékelőt is tudnak kezelni, tehát univerzálisak.

Munkám során a célkitűzésnek megfelelően egy mikrovezérlő alapú, univerzális ipari szenzorinterfészt fejlesztettem ki, amely rendelkezik ezekkel a tulajdonságokkal. A műszer viszonylag olcsó alkatrészekből lett megépítve, mégis pontos méréseket tesz lehetővé. Számos, az iparban is gyakran alkalmazott szenzor illesztését és tesztelését végeztem el. A szenzormodul a mérési adatok továbbítása szempontjából is univerzálisnak mondható, mivel a 4-20 mA-es távadó mellett külső eszközzel, USB porton keresztül is kommunikálhat. A 4-20 mA-es jeltartomány szabványos kimenetet biztosít több, az iparban széles körben használatos külső eszközzel (pl. PLC-vel). A szenzormodul nagyobb fogyasztású szenzorok illesztésének problémáját is megoldja egy kapcsolóüzemű áramkör alkalmazásával. Az egység mind a hardver, mind a szoftver szempontjából fogyasztás-optimalizált, továbbá több táplálási lehetőséget is biztosít.

A szenzorinterfészhez készítettem egy mérőszoftvert is, amely kihasználja az USB kommunikáció által nyújtott lehetőségeket. A felhasználó egy LabVIEW PC-s alkalmazás segítségével egyszerűen konfigurálhatja a működést. Mindezt grafikus felületen teheti, amely biztosítja a mérési eredmények valós idejű látványos megjelenítését is. A műszer továbbá képes önállóan – csupán 4-20 mA-es távadóként – is működni (a PC-s alkalmazást nélkülözve), mivel flash memóriájában tárolja az utolsó konfigurációt.

Dolgozatomban bemutattam a szenzorinterfész egyes részegységeinek felépítését, működését, valamint a hozzá kifejlesztett beágyazott szoftver és LabVIEW alkalmazás funkcióit, használatát. Bemutattam továbbá az illesztett szenzorok működését, az összeállított mérőrendszer alkalmazását, majd elemeztem a szenzormodul teszteredményeit. Végül továbbfejlesztési lehetőségeket adtam meg.

Összefoglalva elmondható, hogy egy precíz, általános szenzoros mérésekre alkalmas műszert sikerült kifejlesztenem, amely nemcsak az ipari mérés technikában, de oktatási célokra is felhasználható.

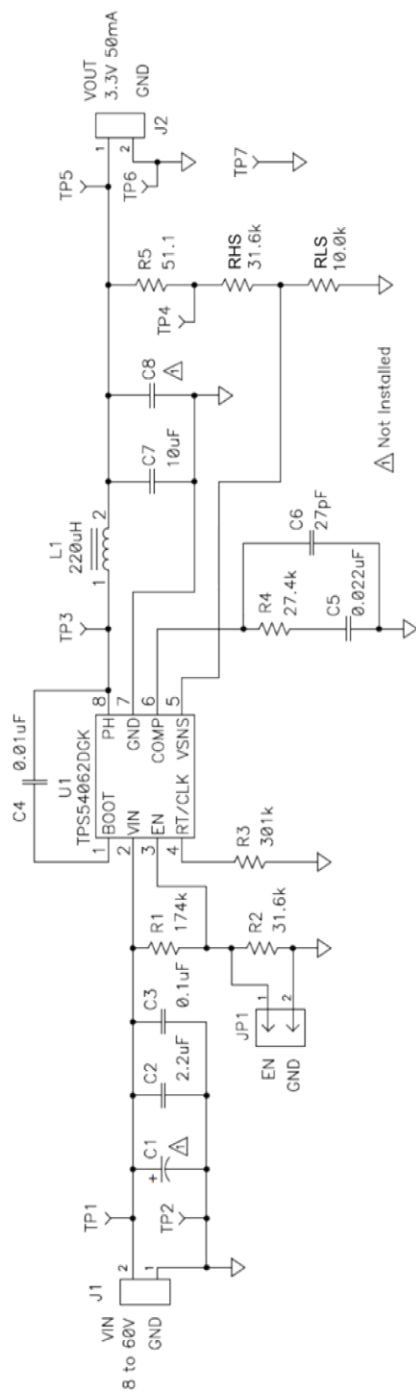
8. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Gingl Zoltánnak a munkám során nyújtott sok tanácsáért és segítségéért. Köszönettel tartozom továbbá a Zajlabor dolgozóinak a támogatásért, a hasznos tanácsokért, valamint a megfelelő munkakörnyezet biztosításáért.

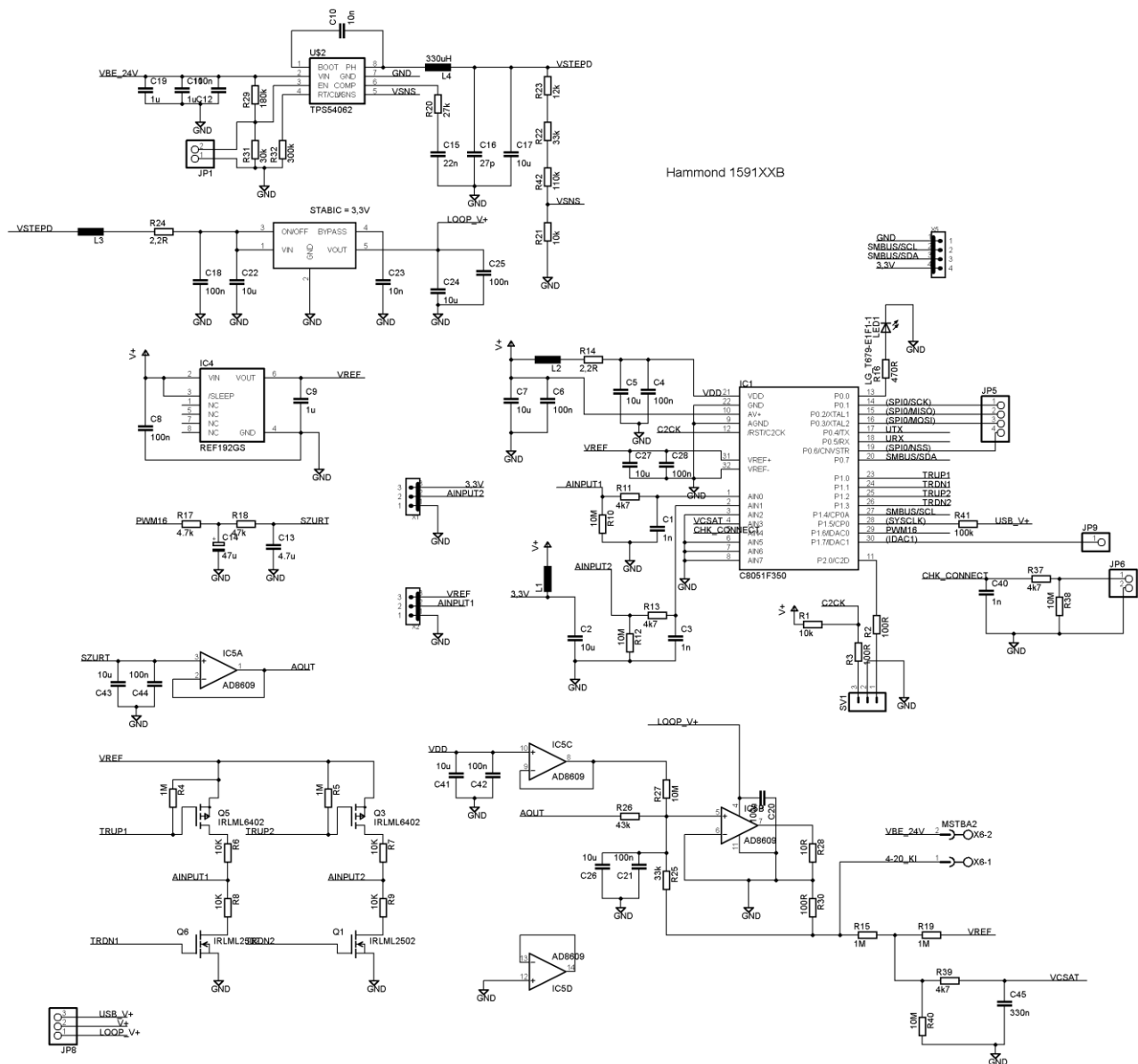
9. Irodalomjegyzék

- [1] Boros Péter Bálint: Univerzális 4-20mA szenzormodul fejlesztése (szakdolgozat, 2012)
- [2] 4-20 mA transmitters, <http://www.scientific-devices.com.au/pdfs/WeTransfer-NZvJB6Cw/ACDC/4-20mA%20Transmitters.pdf>
- [3] Fundamentals, system design and setup for the 4 to 20 mA current loop, <http://www.ni.com/white-paper/6940/en/pdf>
- [4] Gingl Zoltán: EDAQ24, <http://www.inf.u-szeged.hu/~gingl/edaq24/>
- [5] Silicon Labs: C8051F350 datasheet, <http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/C8051F35x.pdf>
- [6] AD8609 típusú műveleti erősítő adatlapja, http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8603_8607_8609.pdf
- [7] Step-down konverterek működése, http://www.usna.edu/EE/ee320/Supplements/dcdc1_operation.pdf
- [8] A TPS54062 típusú step-down konverter adatlapja, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps54062.pdf>
- [9] LabVIEW User Manual, <http://www.ni.com/pdf/manuals/320999e.pdf>
- [10] Termisztor adatlapja, <http://www.noise.inf.u-szeged.hu/Online/Sensors/Thermistors/ThermistorDatasheet.pdf>
- [11] Fotodióda adatlapja, <http://www.vishay.com/docs/81519/bpw21r.pdf>
- [12] Veszprémi Egyetem Fizikai és Mechatronikai Intézet: Mágneses indukció mérése, http://fizikaweb.uni-pannon.hu/fizika_content/Oktatas/Elektronika_labor_VM-BM/Magnesses_ter_merese.pdf
- [13] SS49E típusú Hall-szenzor adatlapja, http://dscl.lcsr.jhu.edu/main/images/3/31/SS49e_Hall_Sensor_Datasheet.pdf
- [14] Az MPX10DP típusú differenciális nyomásmérő adatlapja, http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX10.pdf
- [15] Az LM75 típusú hőmérő IC adatlapja, <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/LM75.pdf>

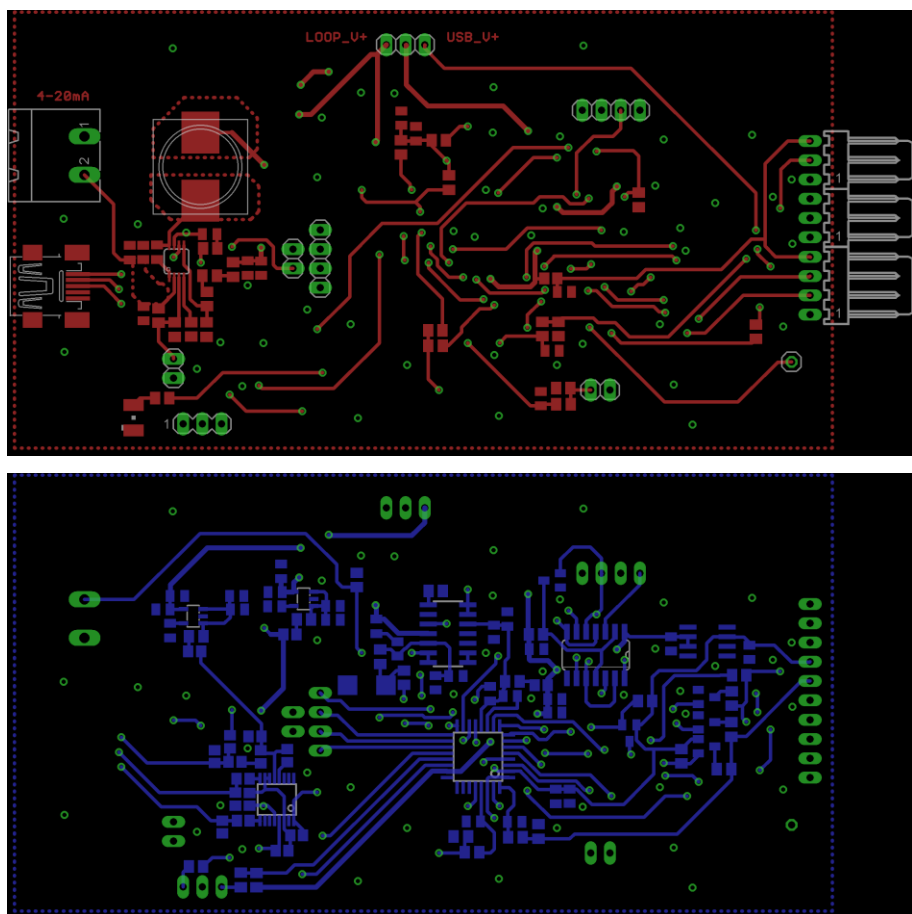
10. Melléklet



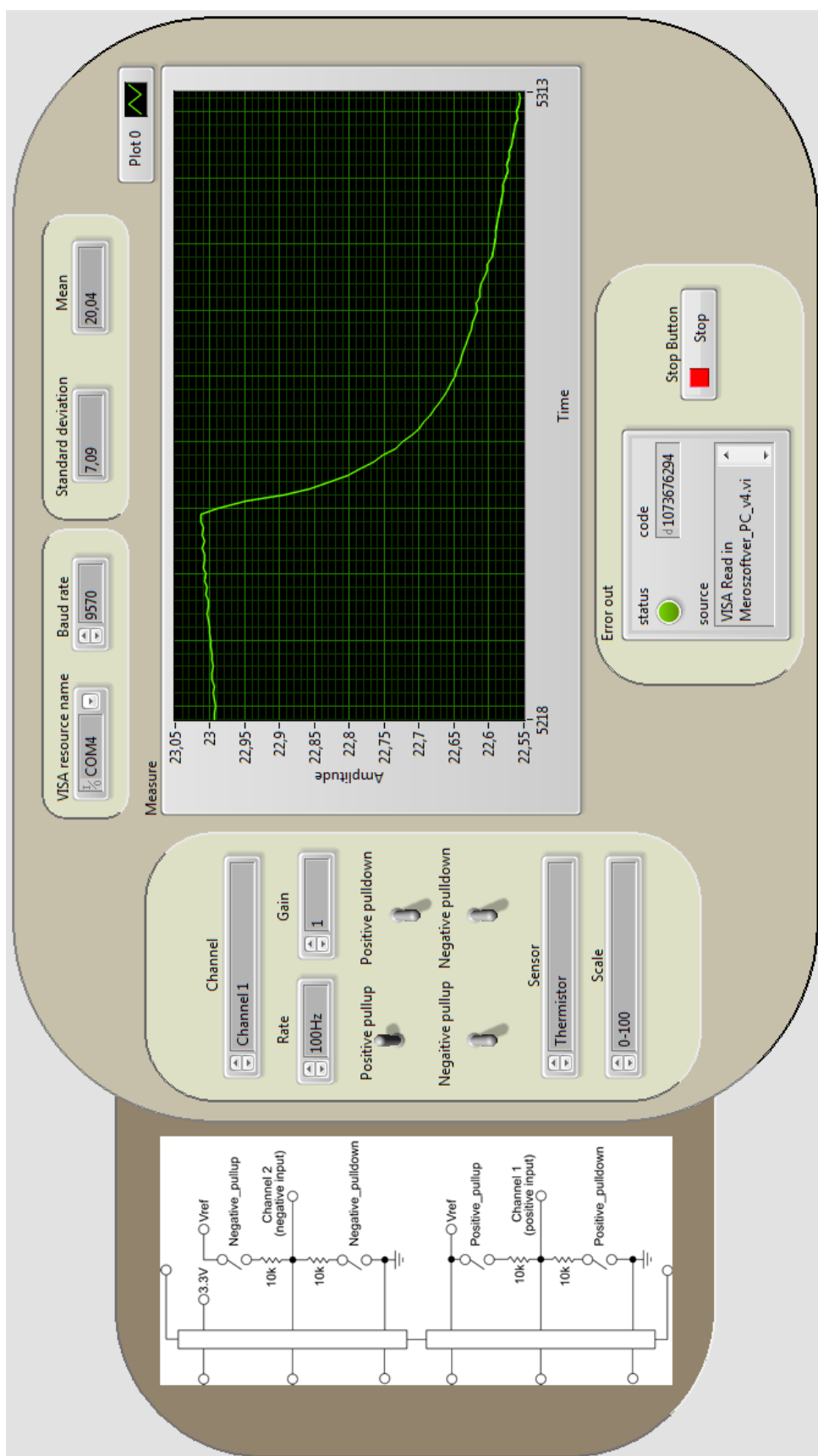
1. ábra: A step-down konverterhez tartozó kapcsolás [forrás: 8]



3. ábra: A szenzorinterfész kapcsolási rajza (2. részlet)



1. kép: A szenzorinterfész panelterve (piros: felső oldal, kék: alsó oldal)



2. kép: A LabVIEW alkalmazás grafikus felhasználói felülete

PWM érték	Kimenet (mA)	Lineáris (mA)	Hiba (%)
12500	20,65	20,63925	-0,05204
15000	19,68	19,67175	-0,04191
17500	18,7	18,70425	0,022743
20000	17,73	17,73675	0,038088
22500	16,76	16,76925	0,055209
25000	15,78	15,80175	0,137852
27500	14,81	14,83425	0,163761
30000	13,84	13,86675	0,193302
32500	12,87	12,89925	0,227296
35000	11,9	11,93175	0,266832
37500	10,94	10,96425	0,221691
40000	9,97	9,996753	0,268335
42500	9	9,029253	0,325033
45000	8,04	8,061753	0,27056
47500	7,08	7,094253	0,201314
50000	6,12	6,126753	0,110343
52500	5,11	5,159253	0,963855
55000	4,2	4,191753	-0,19636
57500	3,23	3,224253	-0,17793

1. táblázat: A 4-20 mA-es konverter linearitása