

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék



Járművek közti kommunikáció látható fény segítségével

TDK dolgozat

Kovács Zoltán Márk

2019

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	5
1.1. VLC	5
1.1.1. Technológiai áttekintés	5
1.1.2. Adó oldal	6
1.1.3. Vevő oldal	7
1.2. V2V-VLC	7
2. 1:24 méretarányú modellautó	9
2.1. Eredeti állapot	9
2.2. Előzetes megfontolások	12
2.3. Kiindulási állapot	13
3. Áramkörtervezés	16
3.1. Alkatrész kiválasztási szempontok	16
3.2. Vevő kapcsolási rajza	18
3.3. Vevő szimulációs eredményei	20
3.4. Adó és vezérlő kapcsolási rajza	21
3.5. Tápellátás	24
3.6. Vevő kapcsolási rajz	26
3.7. Vevő nyomtatott áramköri terve	28
3.8. Adó és vezérlő nyomtatott áramköri terve	31
3.9. Diódatartók nyomtatott áramköri terve	33
3.10. Teljes rendszer blokkvázlata	34
4. Áramkörépítés	35
4.1. Alkatrészek beültetése, élesztés	35
4.2. Megépített vevő áramkör	36
4.3. Megépített adó és vezérlő áramkör	38
4.4. Elkészült mechanikai konstrukció	40
5. Vezérlőszoftver	41
5.1. Arduino NANO	41
5.2. Adóoldali szoftver	41
5.3. Vevőoldali szoftver	43
6. Mérések	44
6.1. Felhasznált műszerek	44
6.2. Adó és vezérlő áramkör	44
6.2.1. DC feszültségek és áramok	44
6.2.2. Időtartománybeli mérések	46

6.3. Vevő áramkör	48
6.3.1. DC feszültségek és áramok	48
6.3.2. Időtartománybeli mérések	48
7. Összefoglalás	57
7.1. Kommunikációs platform értékelése	57
7.2. Fejlesztési javaslatok	57
7.3. Távlati tervek	58
A. Függelék	63
A.1. Vevő tesztelésére szánt programkód	63
A.2. Adó programkód	64
A.3. Vevő programkód	65

Kivonat

A látható fényű kommunikáció (Visible Light Communication, továbbiakban VLC) a vezeték nélküli kommunikációs technológiák halmazába tehető. A VLC-t, mint az RF mellett alternatív 5G megoldást indokolja számos kiemelkedő tulajdonsága. Ezen kiemelkedő jellemzők közé tartozik többek között a jó energiahatékonyság, nagy rendelkezésre álló sávzélesség, költséghatékonyság, alacsony késleltetés. Az időkritikus alkalmazásoknál utóbbi rendkívül fontos szerepet kap. Jelenleg több autóiipari szereplő is aktívan részt vesz az autonóm járművekkel kapcsolatos fejlesztésekben.

TDK dolgozatom témája egy olyan látható fényű alapokra épülő kommunikációs platform létrehozása, amely felhasználásával két 1:24 méretarányú autómodell egyenes vonalban távolságtartást tud megvalósítani. Feladataim közé tartozott a mechanikai konstrukció kialakítása, a kommunikációs egység és vezérlőegységek megtervezése, felprogramozása valamint az elkészült áramkörök rögzítése a modellautókon belül, és a tápellátás kialakítása mindkét áramkör részére.

Abstract

The visible light communication (hereinafter referred to as VLC) belongs to the set called Wireless communication technologies. The VLC next to the RF can be an alternative solution because of its outstanding features. From these outstanding characteristics we can mention the high energy efficiency, high availability bandwidth, cost-efficiency, low-latency. The low-latency has a really important role with the time-critical applications. In these days there are more operators in the automotive industry whom actively participate in development projects related to autonomous vehicles. The topic of my TDK project is based on the creation of a visible light communication platform foundation. With the help of the communication platform two small cars can keep a certain amount of distance in a straight line. My tasks included the development of mechanical constructions, designing and fixing circuits within the cars and to design the power supply for both of the circuits.

1. fejezet

Bevezetés

TDK dolgozatom témája egy olyan látható fényen alapuló járművek közti kommunikációs platform (Vehicle to Vehicle, továbbiakban V2V) elkészítése, amely képes megvalósítani két kisméretű (1:24 arányú) modellautó közötti kommunikációt. A platform magába foglal egy VLC adót és egy VLC vevőt. Ezenkívül a kommunikáció lebonyolításához, autóvezérléshez szükséges hardver és szoftverelemek elkészítése, illetve a mechanikai konstrukció kialakítása is a feladataim közé tartozik.

1.1. VLC

A látható fényű kommunikáció (Visible Light Communication, továbbiakban VLC) a vezeték nélküli kommunikációs technológiák halmazába tehető. Vezeték nélküli kommunikáció sokféle módon hozható létre, és az elmúlt kb. 50 év alatt kialakultak a gyakorlatias irányelvek, amelyek alapján az egyes alkalmazásokhoz hozzárendelődtek a megfelelő technológiák. Egy új technológia iránt mindig volt érdeklődés ha bebizonyosodott, hogy az adott technológiának lenne létjogosultsága. A VLC által megcélzott alkalmazások például következők lehetnek:

- Nagy biztonságú adatátvitel zárt térben: Előnye a technológiának a rádiófrekvenciás kommunikációval szemben, hogy míg a (falak által) zárt tér a fényt nem engedi át így a kommunikációt a falon kívül nem tudják lehallgatni, az RF jeleket csillapítva ugyan de átengedi, ezáltal lehallgatható a beltéri kommunikáció. [1]
- Beltéri pozicionálás: Beltér esetén az RF technológiák pontossági, késleltetési, hatékonysági problémákkal küzdenek. VLC esetén viszont az egyirányú, helyfüggő adatátvitel megoldható. Egy előre telepített mobilos applikáció használatával pedig lehetővé válik a VLC csatornán keresztül kapott információk kijelzése. [2]
- Látható fényű kommunikáció víz alatt: Víz alatt nagyobb távolságokra jellemzően akusztikus hullámokat használnak információközlésre. Az ilyen eszközök hátránya a nagy fogyasztás (akár 50. . . 80 W), illetve a nagy tömeg. Olyan alkalmazásokban ahol ez a kettő tulajdonság nem előnyös, ott ajánlott a VLC, mert az előbbi jellemzők sokkal kedvezőbbek lehetnek.

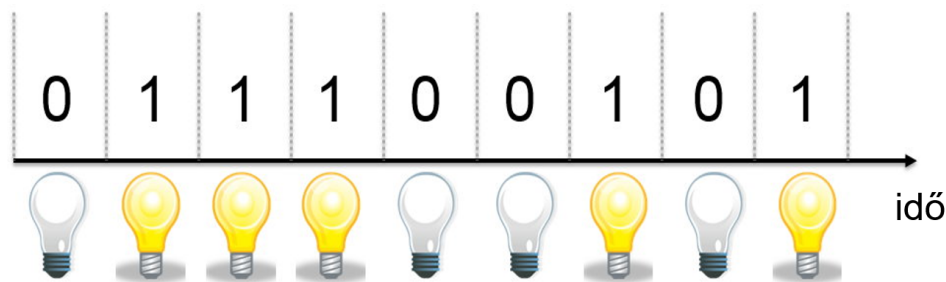
1.1.1. Technológiai áttekintés

A VLC kiindulási elve ahogy a neve is mutatja az, hogy látható fényt használ két egység közti kommunikációra. Ez rávilágít a technológia egy a távközlésben használt alapvető

jellemzőre, a frekvenciasávra. A látható fényt az optikában jellemzően hullámhosszban kezelik, így kifejezve 380...780 nm-es tartományról van szó a VLC esetén. Átszámítva frekvenciasávra ez 384...789 THz-nek felel meg (összevethető a felosztott RF spektrum körülbelül 300 GHz sávzélességével). Ennek a szembenálló széles sávnak használata előnyös, mivel az RF spektrum rendkívül telített és használata költséges. A technológia számára megfelelő minden átviteli közeg amelyben a fény megfelelően tud terjedni. Viszont ha például nagy csillapítás lép fel a fény útjában, az átviteli tulajdonságok romlani fognak adott távolság mellett. Maga az átvitel jellemzően kis távolságok áthidalására képes, viszont meglehetősen nagy átviteli sebesség érhető el vele. A technológiának előnyei közé tartozik az, hogy a beltéri világításba beintegrálható (alkalmas LED fényforrás esetén), és az ember komfortérzetét nem zavarja a kommunikáció megléte, mivel az emberi szem mintavételi frekvenciájánál nagyságrendekkel nagyobb frekvenciával moduláljuk a fényforrás intenzitását. Továbbá így a meglévő világítótestek nem csak a megvilágítást biztosíthatják házon belül, hanem az adatátvitel alapjául is szolgálhatnak. Az RF adók teljesítményét korlátozzák a különböző szabványosító előírások, mert ha egy élő szervezet túl nagy teljesítményű RF sugárzás ér, az káros hatású lehet. Ilyen probléma a VLC esetén nincs, hiszen a használt látható fénynek nincs káros hatása az élő szervezetekre.

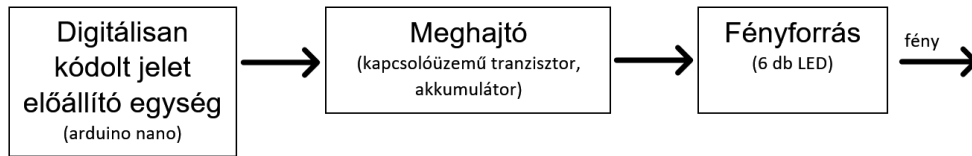
1.1.2. Adó oldal

VLC használata esetén egy adónak az a feladata, hogy egy elektromos jelet fényvé alakítsa. Legfőbb komponense egy elektromos-optikai átalakító, más szóval egy alkalmas fényforrás. Általában egy adó a feldolgozott jelet tekintve lehet analóg, vagy digitális. Az általam tervezett adó digitálisan kódolt (UART-Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) csomagok fogadására képes, azaz a fényforrás ki, illetve bekapcsolt állapota tartalmazza az információt. Ez gyakorlatilag megfelel az On-Off-Keying (OOK) modulációnak, melyet szemléletesen mutat be az 1.1 ábra.



1.1. ábra. OOK moduláció szemléltetése [3]

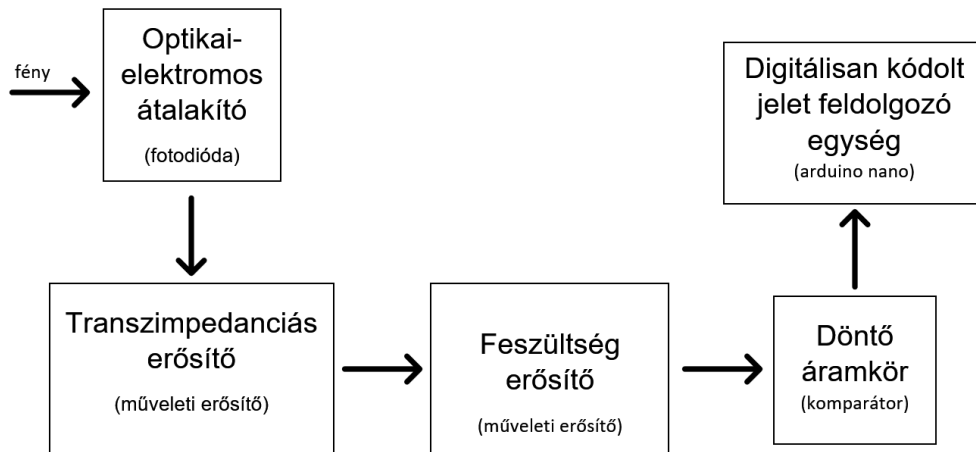
Fényforrásnak 6 db LED-et (Light Emitting Diode) használok, mivel a LED-et alkalmassá teszi a VLC-re a megfelelő sebességű ki és bekapcsolás lehetősége. A LED-ek meghajtására egy kapcsolóüzemű tranzisztor alapú áramkört alkalmazok, amelynek vezérlése a digitálisan kódolt jellel történik. Előnye ennek a felépítésnek, hogy a digitálisan kódolt vezérlőjelekkel szemben támasztott követelmények meglehetősen enyhék, azaz akár CMOS/TTL szintűek is lehetnek, amelyekkel a legtöbb könnyen hozzáférhető fejlesztőeszköz rendelkezik. Az adó blokkvázlatát szemlélteti az 1.2 ábra.



1.2. ábra. VLC adó blokkvázlata

1.1.3. Vevő oldal

Egy VLC vevőnek az a fő feladata, hogy az adó által kibocsátott információt hordozó fényjelet megfelelően feldolgozva előállítsa alakhűen az adóáramkör bemenetére kapcsolt digitálisan kódolt jelet. A vevő egyik fő komponense az optikai-elektromos átalakító, amely jelen esetben egy fotodióda. Ennek előnye a nagy kapcsolási sebesség (nagyságrendileg néhány ns), illetve a linearitás megléte, ugyanis utóbbi szükséges az alakhű jelátvitel biztosításához. Mivel a fotodióda jelerősítést nem végez, illetve áramkimenetű eszköz, ezért több fokozatban kell elvégezni a jelkondicionálást. A vevő blokkvázlatát szemlélteti az 1.3 ábra.



1.3. ábra. VLC vevő blokkvázlata

1.2. V2V-VLC

A járművek közti látható fényű kommunikáció a gyakorlatban egyelőre még nem alkalmazott, azonban már számos kutatás témájaként említhető. A manapság kapható autók nagy részének fényszóróit LED segítségével valósítják meg. Egy nagyobb teljesítményű VLC adó legköltségesebb eleme pedig a fényforrás, amely ha már alapvetően az autó része, akkor a VLC adó többi egysége rendkívül alacsony költségen integrálható bármely LED alapú fényszóróba. Vételi oldalon (az adóhoz viszonyítva) drágább a helyzet, de eltörpül néhány gyártó árlistáján fellelhető extrákhoz képest.

A járművek közti kommunikáció fejlesztése napjainkban kiemelkedő fontosságú, tekintve az autonóm járművek ötlete iránti hatalmas érdeklődést. Mindez részegységnek tekinthető az intelligens közlekedési rendszerek fejlesztésében (Intelligent Transport System-ITS). Az autonóm járművek esetén nagyon fontos a gyors reagálási képesség, mivel a közúti forgalomban a másodperc töredéke alatt drasztikusan megváltozhatnak a környezeti

viszonyok. A VLC pedig egy lehetséges módja annak, hogy megoldjunk bizonyos feladatokat az autonóm járművek közlekedésével kapcsolatban. Első körben érdemes olyan megközelítést alkalmazni ezen megoldások keresése közben, amely kapcsolatba hozható a VLC-vel. Ilyen például a közlekedési lámpák által nyújtott lehetőségek, illetve minden olyan forgalomban résztvevő objektum amely fényt bocsát ki. Közlekedési lámpák VLC-re való felhasználhatóságát alapjaiban megvizsgálták már, és arra az eredményre jutottak, hogy hatékony megoldás [4]. Későbbiekben terveim között szerepel egy gyakorlatias megvalósítás ezzel kapcsolatosan. Valós forgalmi körülmények között is teszteltek már VLC-n alapuló megoldásokat. Az egyik alkalmazás során a követett autó erőteljes fékezése esetén VLC segítségével küldték át a követő autónak az információt, amelyben egy csengő szólalt meg ennek hatására [5].

Egy autonóm járműnek VLC által küldött információ természetesen nem csak az aktuális helyzetnek a leírója lehet. Saját megfigyelések alapján arra a következtetésre jutottam, hogy például piros lámpánál álló autó számára olyan információt is küldhet a lámpa, amely arra vonatkozik, hogy mennyi idő múlva vált zöldre a lámpa. Ezt feldolgozva pedig tovább küldheti az autó a mögötte álló autónak. Véges számú egymás mögött álló autót feltételezve hamar eljut olyan szintig az információ, amikor például a szóban forgó autó a kapott idő alapján meg tudja határozni, hogy mikor állítsa le a motort és mikor hagyja alapjáraton. Ez egy takarékos célt szolgáló megközelítés. Más szemszögből nézve ha egy feltorlódott autósor minden autója önvezető, akkor az elindulás nem ad minden elinduló autó után olyan hatalmas holtidőt azzal szemben amikor emberek irányítják az autót. Akár olyan jellegű információt is adhat a közlekedési lámpa, amely az adott útszakasz egy távolabbi pontjáról tájékoztatja a vezetőt, aki ez alapján időben értesül az eseményekről ahhoz, hogy kerülőutat találjon. Kifejezetten járművek közötti kommunikáció esete a távolságtartás, illetve az adott távolság továbbküldése. Autópályán haladva egy autonóm járműnek nem feltétlenül csak az a fontos információ, hogy az előtte, vagy mögötte haladó autó milyen távolságban van. Balesetmegelőzési szempontból néhány autóval előre, és hátra is érdemes "látni". Ez kiváltképp akkor igaz, ha nagyobb sebességgel haladunk.

2. fejezet

1:24 méretarányú modellautó

TDK dolgozatomhoz az Optikai és Mikrohullámú Távközlés Laboratórium rendelkezésemre bocsátott 2 db 1:24-es méretarányal rendelkező távirányítós modellautót. Ezen modellautók felépítése megfelelő ahhoz, hogy számos átalakítás után alapjául szolgáljanak a célul kitűzött V2V-VLC platformnak. A platform létrehozásának ugyan nem feltétele az esztétika, azonban az átalakítások közben figyelembe vettem, hogy a modellautók karosszériája a lehető legkevesebb változáson menjen keresztül, ezzel megtartva eredeti megjelenésüket.

2.1. Eredeti állapot

A modellautó eredeti állapotát mutatja be több szemszögből a 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 ábra.



2.1. ábra. Modellautó oldalnézet



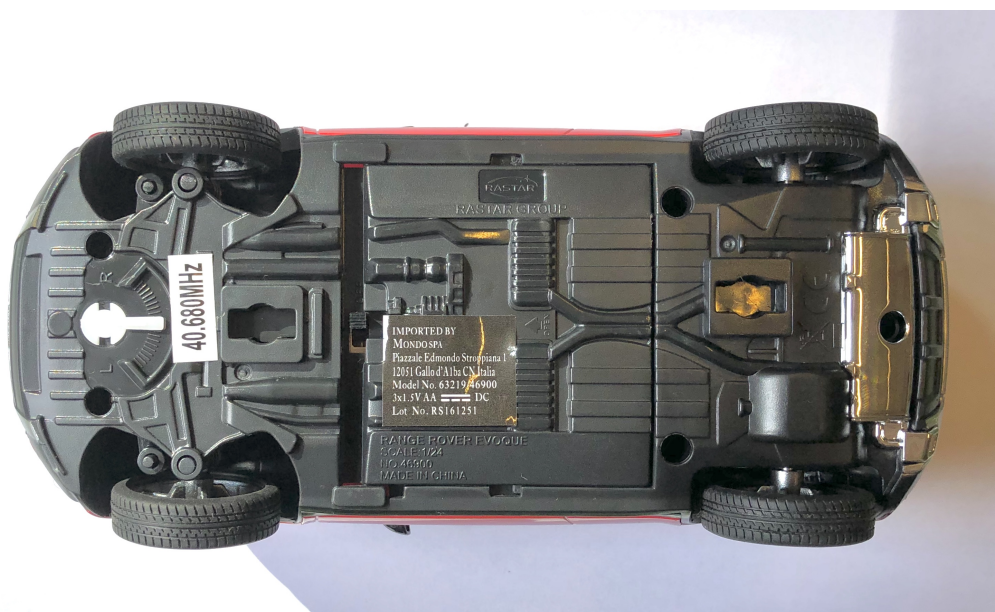
2.2. ábra. Modellautó felülnézet



2.3. ábra. Modellautó előnézet

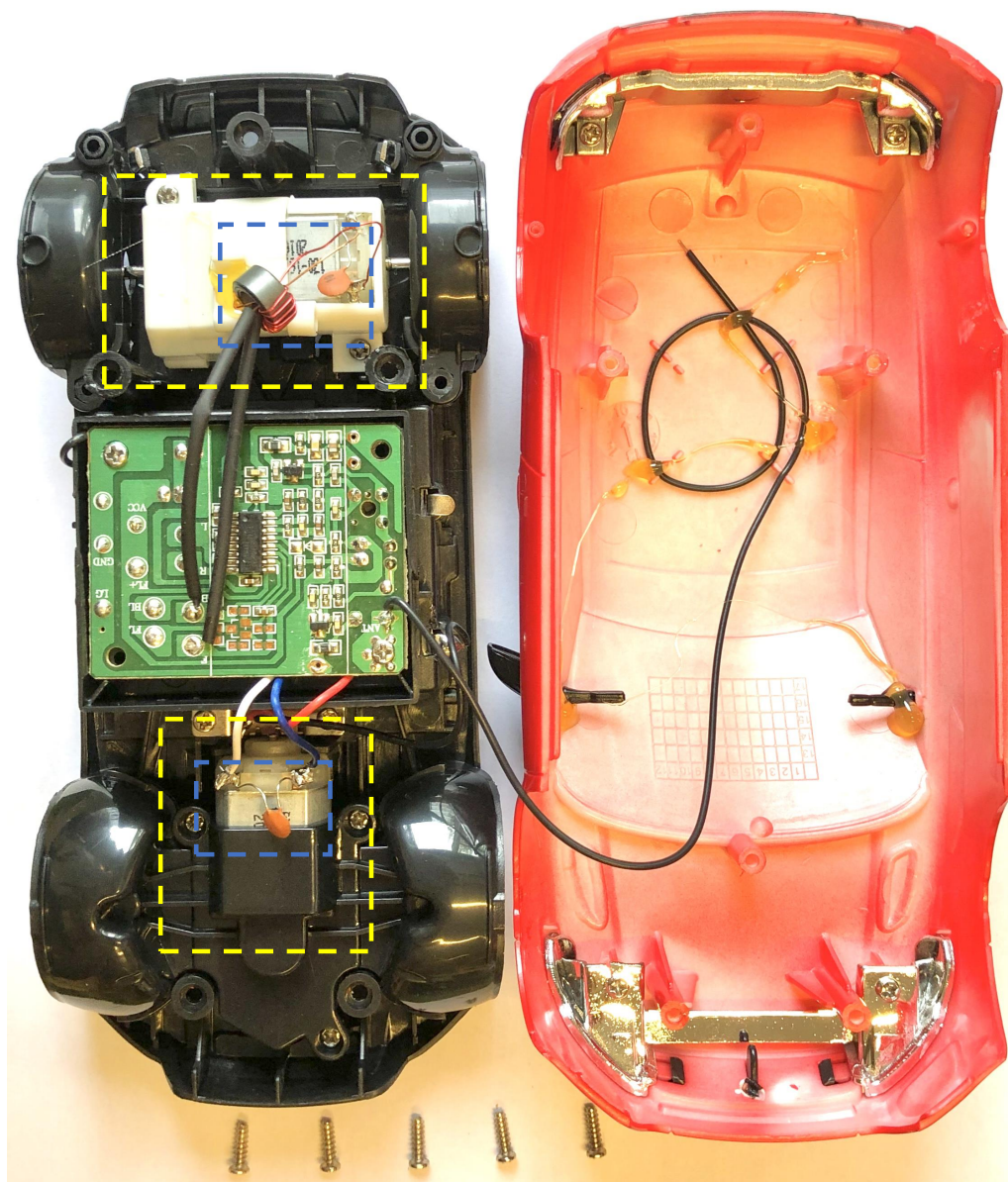


2.4. ábra. Modellautó hátulnézet



2.5. ábra. Modellautó alulnézet

Első felbontást követő állapotot jeleníti meg a 2.6 ábra. Eredeti állapotában a modellautó mindössze 1 db NYÁK-ot tartalmazott, amelyen fellelhető volt minden hardveregység, továbbá az antenna.



2.6. ábra. Modellautó első felbontás

2.2. Előzetes megfontolások

A modellautókban rendelkezésre álló térfogat meglehetősen korlátozott. A karosszéria alatti belső kialakítás okán 4 db NYÁK segítségével valósítom meg az autó vezérléséhez, illetve a kommunikációhoz szükséges funkciókat. 2 db NYÁK tartására szolgál összesen 3 db távtartó, ebből 2 db tartja az adó- és vezérlő egységet, illetve 1 db tartja a vevőegységet. A másik 2 db NYÁK mindössze mechanikai tartó célokat szolgál. A modellautó karosszériájának szűkös méreteinél fogva a DC motorok, és tápellátás kábeleit melegragasztó segítségével szorosan rögzítem a modellautó alvázának egyes pontjaihoz. Ennek köszönhetően egyszerűbb felhelyezni a karosszériát, továbbá átláthatóbb a kábelezés.

A 2.6 ábrán sárgával bekeretezett elemek (2 db DC motor) nem kerülnek kiszerelésre a modellautókból, a késsel bekeretezett elemek (DC motorokra kapcsolt párhuzamos kondenzátorok, illetve a hajtásért felelős DC motorra kapcsolt közösmódusú fojtótekercs) pedig módosított elrendezésben kerülnek beszerelésre. Ennek egyik fő oka a helytakarékoság. A karosszériamódosítás teljes mértékben nem kerülhető el, ugyanis az egyik (későbbiekben adási képességgel felszerelt) modellautó rendelkezni fog távolságmérő szenzorral. Annak tápellátását illetve kommunikációját meg kell valósítani a modellautón belül rögzített egyik hardveregységgel.

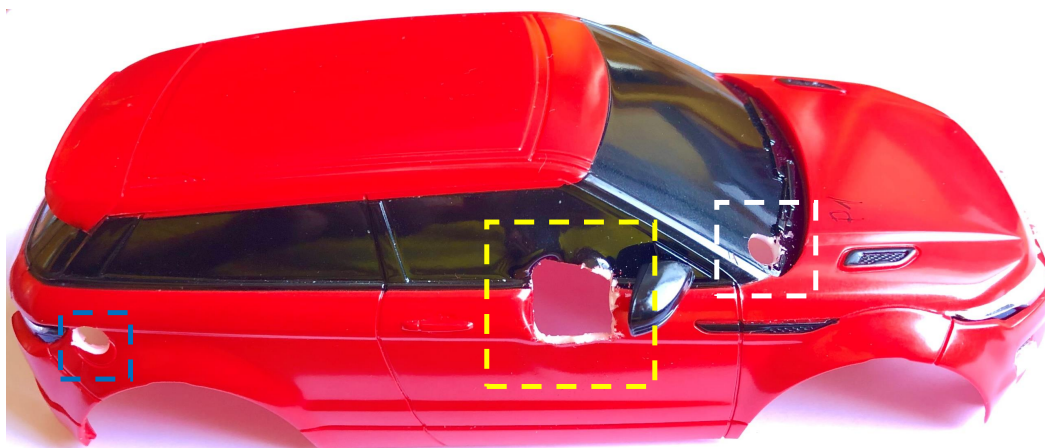
A másik (későbbiekben vételi képességgel ellátott) modellautó pedig egy fotodiódával lesz ellátva, így annak kapcsolatát szintén meg kell valósítani a belső hardveregységgel. Ez a 2. karosszériamódosítás.

A 3. típusú karosszéria módosítás a belső hardveregységgel hozható összefüggésbe. Annak programozása miniUSB csatlakozófelületű kábelen keresztül történik, így a modellautók oldalán egy-egy megfelelő méretű ablak lesz kialakítva, amin keresztül csatlakoztatni tudjuk a belső hardveregységhez a számítógépünket.

Végül az utolsó karosszériamódosítás a modellautók fényforrásainak beépíthetőségét szolgálja. A modellautók fényszóróinál 2 db, illetve a hűtőrács helyén fűrt 4 db, egyenként 3mm átmérővel rendelkező furat teszi lehetővé, hogy megfelelően rögzíthetők legyenek a fényforrások. Ezen modellautók felhasznált anyag tekintetében nem tekinthetők könnyen szerelhetőnek, s ez a tulajdonság a furatok elkészítése közben vált világossá számomra. A furatok elkészülte után melegítéssel eljárásal kedvezőbb irányba állítottam a fényforrásokat, ez pedig azok fókuszsátsága okán vált szükségessé.

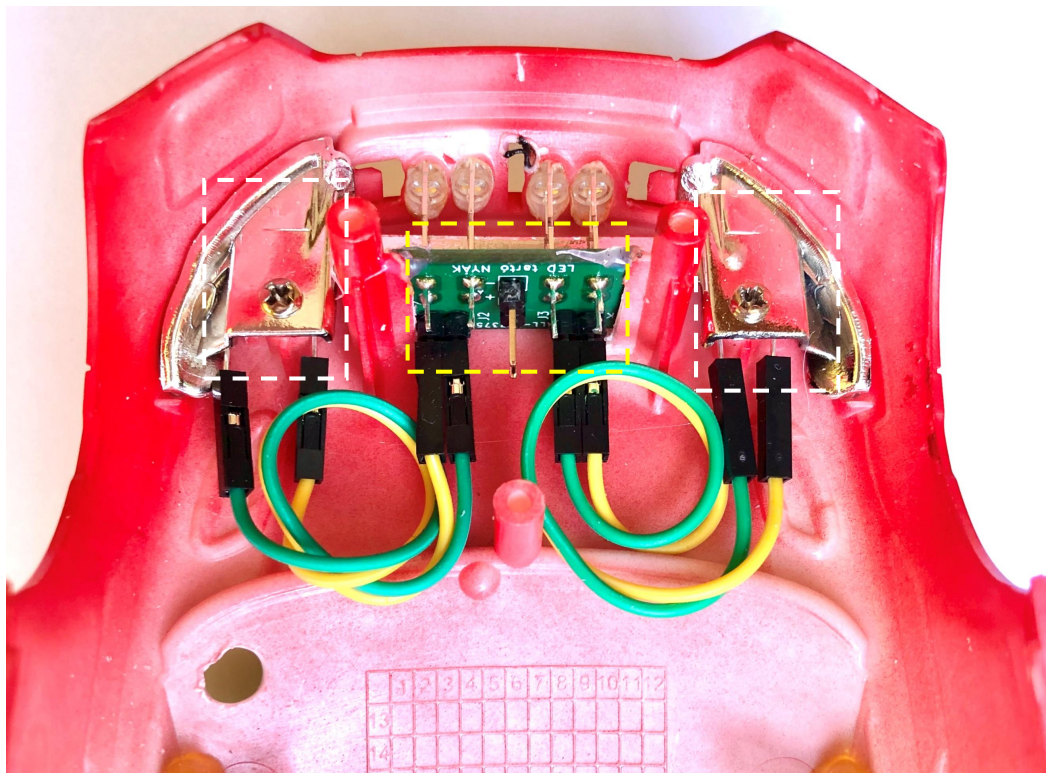
2.3. Kiindulási állapot

A 2.7 ábrán látható az egyes módosítások eredménye. Sárgával bekeretezve a miniUSB-nek kialakított ablak, késsel a fotodióda vezetékének, fehérrel a lézeres távolságmérő vezetékének szolgáló furat.



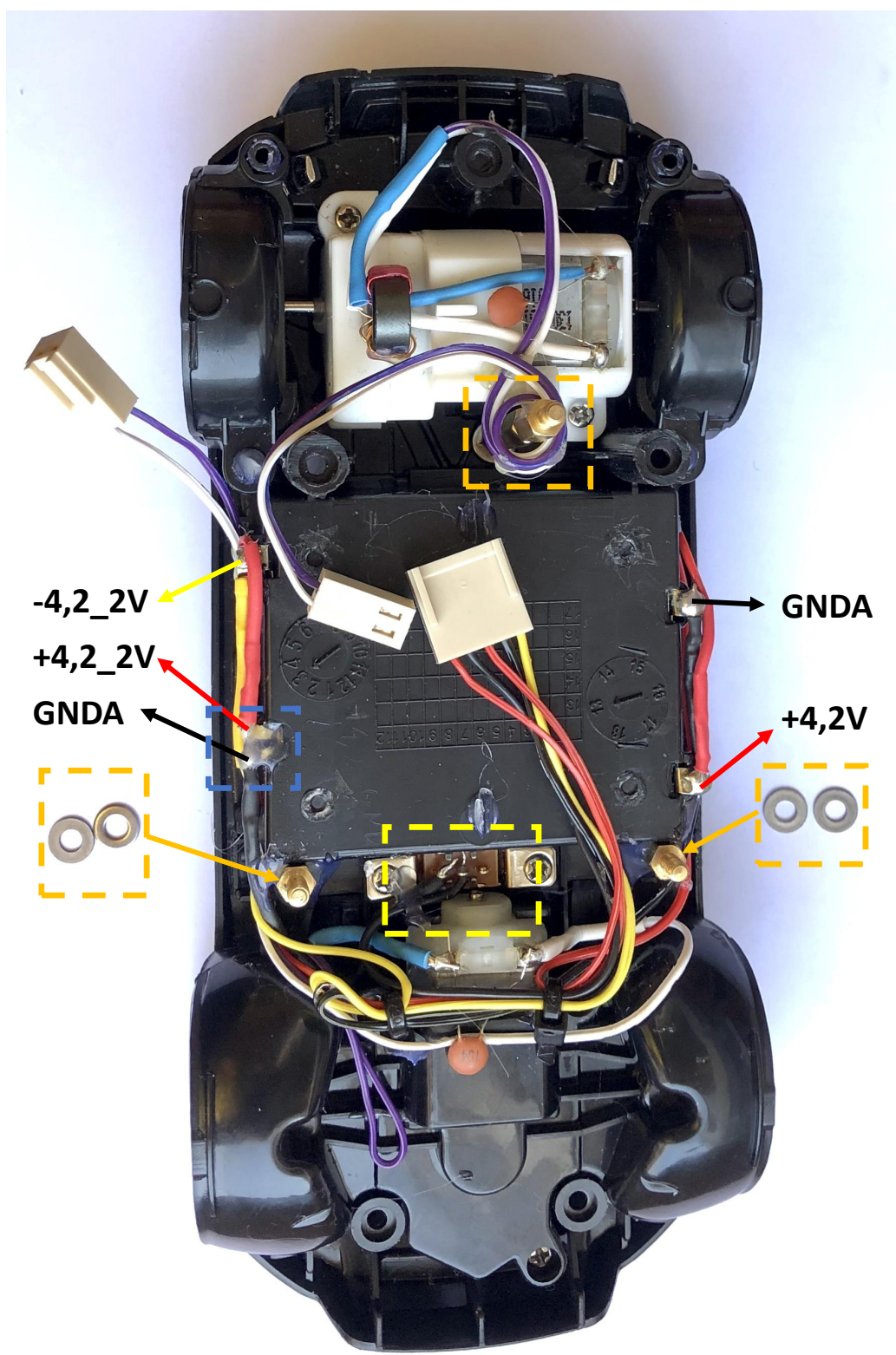
2.7. ábra. Modellautó kiinduló karosszéria

A 2.8 ábrán sárga keretézéssel jelölöm a 4 db LED-et tartó NYÁK-ot, amely később kerül bemutatásra, illetve fehér keretbe foglalom a 2 db oldalsó LED karosszérián belüli elhelyezését. Ilyen módon valósítom meg a 6 db LED párhuzamos kapcsolását.



2.8. ábra. Modellautó LED fényforrás

A 2.9 ábrán narancs színnel bekeretezett területeken látható a 3 db távtartó, illetve a különböző színű nyilakkal jelzem a modellautóban található akkumulátorok egyes pólusait. Ezen pólusokhoz azonosítókat rendelek, amelyeket későbbiekben felhasználok a 3.6 ábrán. Sárgával keretezve látható egy ON-OFF állású kapcsoló, amelynek áramköri elhelyezését magyarázza a 3.6 ábra. A 2 db alátét azon távtartókhoz szükséges, amelyekhez narancs nyíl húzódik, ezáltal majd az adó és vezérlő NYÁK erre a 2 db távtartóra támaszkodhat. A kézzel keretezett területen fizikailag két részre választottam az akkumulátorok számára fenntartott kontaktrugókat tartó fémlapot, így realizáltam a 3 db akkumulátor segítségével a 2 db belső egység számára az egymástól független tápfeszültséget. A szétválasztás után mechanikailag nem maradt stabil a két lap, ezért melegragasztóval kitöltöttem a köztük lévő térfogat egy részét, ezzel biztosítva a szigetelést, és mechanikai stabilitást. Előzetes megfontolások alapján a melegragasztó használata nem okozhat gondot, mivel az akkumulátorokból felvett áram effektív értéke nem lesz akkora, hogy a ragasztó felpuhuljon.



2.9. ábra. Modellautó kiinduló alváz

3. fejezet

Áramkörtervezés

Az áramkörök tervezése során a szimulációkhoz a DesignSoft TINA (verzió: 9.3.200.277 SF-TI) programot használtam. A TINA programkörnyezete lehetővé teszi az áramkörök frekvenciatartománybeli, időtartománybeli viselkedésének vizsgálatát. A gyártók által ingyenesen hozzáférhető spice alapú makrók használatával konkrét (interneten keresztül rendelhető) alkatrészekkel építhető fel a kapcsolás, ezzel is növelve a tervezés hatékonyságát. Ezen program (nem teljes verziója) regisztráció után ingyenesen letölthető a Texas Instruments honlapjáról [6]. A szimulációk eredményeit azonban óvatosan kell kezelni. Tapasztalatom szerint 2 szimulációs eredmény akkor is eltérhet egymástól, ha közben semmilyen paraméterét nem változtatom meg a kapcsolásnak. A vevő szimulációs eredményeinél még visszatérek erre. A későbbiekben szeretnék más áramkörszimulátor-programot is megismerni, így elősegítve, hogy az adott áramkör működéséről elméletben a lehető legpontosabb képet kapjam.

3.1. Alkatrész kiválasztási szempontok

A használni kívánt moduláció (OOK) alapján mind az adó, mind a vevő kellően gyors kell legyen, hogy a kommunikáció során használt alaphfrekvencia (38,4 kHz) után még néhány felharmonikust is átengedjen a jelátalakítás során. A vevő esetében a kritikus alkatrészek a műveleti erősítő, és komparátor. A műveleti erősítőt többek között transzimpedanciás erősítőként (TIA-Transimpedance Amplifier) fogom alkalmazni, ilyen feladatra gyártó (Texas Instruments) által ajánlott például az OPA380, OPA381, OPA280, LMH6629, LMV793. A választásom utóbbi kettőre esett, a gyors működés miatt.

Az LMV793 fontosabb tulajdonságai:

- Szimmetrikus tápellátás (Dual Supply): 1,8...5,5 V
- Kimeneti feszültség maximális változási sebessége (Slew Rate): $32 \frac{V}{\mu s}$
- Egységnyi erősítéshez tartozó határfrekvencia (Gain-Bandwidth Product): 88 MHz

A TIA fokozat bemeneti áramai nagyon fontos paraméterek (Input Bias Current, Input Offset Current), mivel a fotodióda által megindított áram nagyságrendjénél jóval kisebbnek kell lennie. Ezen oknál fogva a két műveleti erősítő közül az LMV793 alkalmas TIA fokozatnak, mert ennek bemeneti áramai pA...fA nagyságrendbe esnek, LMH6629 esetén pedig μA nagyságrendről van szó. A gyakorlatban ez a feltételezés beigazolódni látszott, az LMH6629 TIA fokozatként nem működött. Ezzel szemben 3. és 4. erősítő fokozatként (gyors működése miatt) kiválónak mondható.

Az LMH6629 fontosabb tulajdonságai:

- Szimmetrikus tápellátás (Dual Supply): 2,7...5,5 V
- Kimeneti feszültség maximális változási sebessége (Slew Rate): $1600 \frac{V}{\mu s}$
- Egységnyi erősítéshez tartozó határfrekvencia (Gain-Bandwidth Product): 4 GHz

A komparátor kiválasztásánál fontos szempont a rövid felfutási illetve lefutási idő (Rise Time, Fall Time) továbbá a megfelelően alacsony jelterjedési késleltetés (Propagation Delay Time). Célszerű a vevő tápellátása miatt olyan komparátort választani, amely üzemeltethető hasonló tápfeszültségről, mint a műveleti erősítő. További feltétel, hogy a komparátor kimeneti jelszintjének illesztve kell lennie az Arduino NANO logikai szintjeihez. Ezen feltételek alapján megfelelő választás például a TLV3201.

A TLV3201 fontosabb tulajdonságai:

- Terjedési késleltetés: 40 ns
- Felfutási idő: 4,8 ns
- Lefutási idő: 5,2 ns
- Tápfeszültség (Single Supply): 2,7...5,5 V

Az adó esetén a kapcsolóüzemű tranzisztor, illetve a LED kiválasztása a fő feladat. A későbbiekben logikai szintű jelekkel kívánom üzemeltetni (Arduino NANO), ezért célszerű olyan tranzisztort választani, amely nem terheli nagy árammal az őt vezérlő egységet. Egy MOSFET tipikusan alkalmas ilyen feladatra. A térvezérlésű tranzisztorokra jellemző tulajdonság a statikusan nulla gate áram, mindössze a tranzisztor nyitása közben feltöltődő gate kapacitás igényel némi áramot (charge pumping). Az Arduino NANO által szolgáltatott logikai szintű vezérlőjelekből következik, hogy a tranzisztor küszöbfeszültségének (Threshold Voltage) kellően alacsonynak kell lennie. Mint kapcsoló, 6 db LED áramát kell vezetnie, így a drain árama amit vezetni képes tartósan (Continuous Drain Current) legalább 0,2 A nagyságú kell legyen, illetve a vezetési ellenállásnak (On-Resistance) nagyon alacsonynak kell lennie a melegedési problémák elkerülése érdekében. A kapcsolási sebesség szintén lényeges szempont, hiszen ha nem elég gyorsan nyit ki, illetve zár le a tranzisztor, akkor a fényforrásokon folyó áram nagysága és ebből következően a fény intenzitásának változása egyre kevésbé fogja követni a vezérlőjel négyszögjelre emlékeztető alakját. A Zetex Semiconductors gyárt olyan MOSFET-et ami ilyen célra megfelelő. A ZXMN2F34FH azonosítójú N csatornás MOSFET kielégít minden említett feltételt. A ZXMN2F34FH fontosabb tulajdonságai:

- Vezetési ellenállás (Drain-Source On-Resistance): 40...60 m Ω
- Állandó drain áram (Continuous Drain Current): 3...4 A
- Gate-Source küszöbfeszültség (Gate-Source Threshold Voltage): 0,5...1,5 V
- Kapcsolási idők: 2...10 ns

Azt fontos megjegyezni, hogy a fenti paraméterek katalógusadatok, melyeket általában ábrákon található görbeseregről lehet leolvasni. Ennek oka, hogy egyes paraméterek függenek más paraméterektől. Tehát a fentebbi értékek az én konkrét esetemben relevánsak. A felhasznált 6 db LED kiválasztása során fontos szempont a fókuszáltság, illetve a nagy fényerő. Ennek megfelelően választottam ki a FYL-3014UWC1A típusú LED-et. A fókuszáltság azért fontos, mert egyenes vonalban történő kommunikációt szeretnék megvalósítani. Ennélfogva a hatótávolság szempontjából a kisugárzott fény intenzitása jobb, ha minél kisebb térszögben koncentrálódik. A FYL-3014UWC1A fontosabb tulajdonságai:

- Sugárzott szög (Viewing Angle): 30°
- Nyitóirányú feszültség (Forward Voltage): 3,2 V
- Színhőmérséklet (Color Temperature): 9500 K
- Folyamatos nyitóirányú áram (Continuous Forward Current): 25 mA

A LED adatlapján feltüntetik azt a maximális áramot amely 10%-os kitöltési tényezővel 10 kHz-es frekvencián még nem okozza a LED tönkremenetelét. Az én esetemben ez az áram 100 mA. Ez alapján az adó esetén nem okoz problémát a folyamatos nyitóirányú áramnál (korlátozottan) nagyobb áram használata. A motorvezérléshez az Arduino NANO PWM (Pulse Width Modulation) kimeneteit szeretném felhasználni, azonban az Arduino NANO kimenetei nem terhelhetők nagyobb árammal mint 40 mA. Az általam használt DC motor pedig akár 400...500 mA áramot is képes felvenni üzemszerűen, ezért szükséges valamilyen motorvezérlőt alkalmazni. A korábbi tanulmányaim során megismert H-híd alapú motorvezérlésre esett a választásom. A modellautókban található DC motorok áramfelvételei, rendelkezésre álló akkumulátor feszültségek, illetve Arduino NANO vezérlő jeleinek paraméterei határozzák meg a feltételeket, amelyek alapján a Texas Instruments által gyártott DRV8833C típusú IC-t választottam. A DRV8833C fontosabb tulajdonságai:

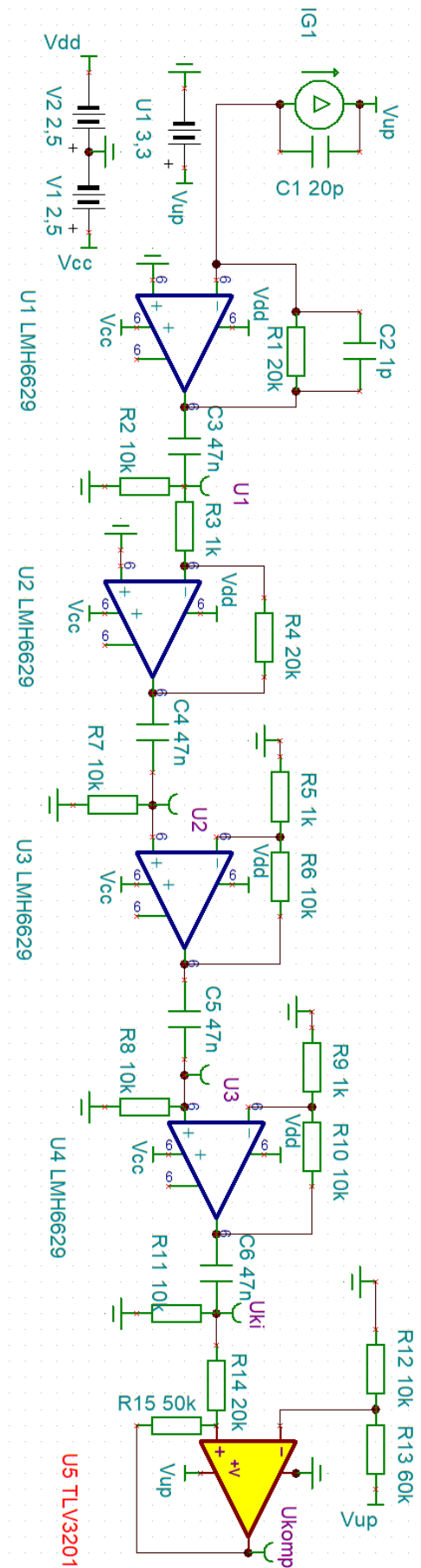
- Kimeneti áram kapacitás (Output Current Capability): $0,7 A_{rms}$
- Tápfeszültség tartomány (Power Supply Voltage Range): 2,7...10,8 V
- Alkalmazható PWM jelfrekvencia (Applied PWM Signal Frequency): 0...200 kHz

A DRV8833C adatlapja alapján kellően gyors működésű, két DC motor (vagy egy léptető motor) vezérlésére képes egyidejűleg. Az Arduino NANO logikai feszültségszintjeivel illetve 490 Hz-es, vagy 960 Hz-es PWM jelével is vezérelhető.

3.2. Vevő kapcsolási rajza

A TINA programban tervezett vevőáramkör kapcsolási rajza látható a 3.1 ábrán.

Az aktív elemek szimulációihoz a Texas Instruments weblapjáról letölthető spice alapú modelleket használtam fel. Fotodiódának nem találtam megfelelő modellt, így azt egy áramgenerátorral helyettesítettem, és figyelembe vettem a fotodióda párhuzamos kapacitását a C_1 kondenzátorral. Az áramkör felépítését tekintve áll egy transzimpedanciás erősítőfokozatból (LMH6629), majd egy invertáló erősítő fokozatból (LMH6629), illetve további 2 neminvertáló erősítő fokozatból (LMH6629). A szimulációra való előkészületek alatt sajnos nem találtam LMV793 típusú műveleti erősítőről készült modellt. Ennek okán helyeztem az első két fokozat helyére LMH6629-et. Mivel ennek bemeneti áramai nagyságrendekkel nagyobbak mint az LMV793-as műveleti erősítő esetében, így a szimulációs számítások során az áramgenerátor áramát olyan méretűre választottam meg, amely méret nagyobb értékű a bemeneti áramoknál.

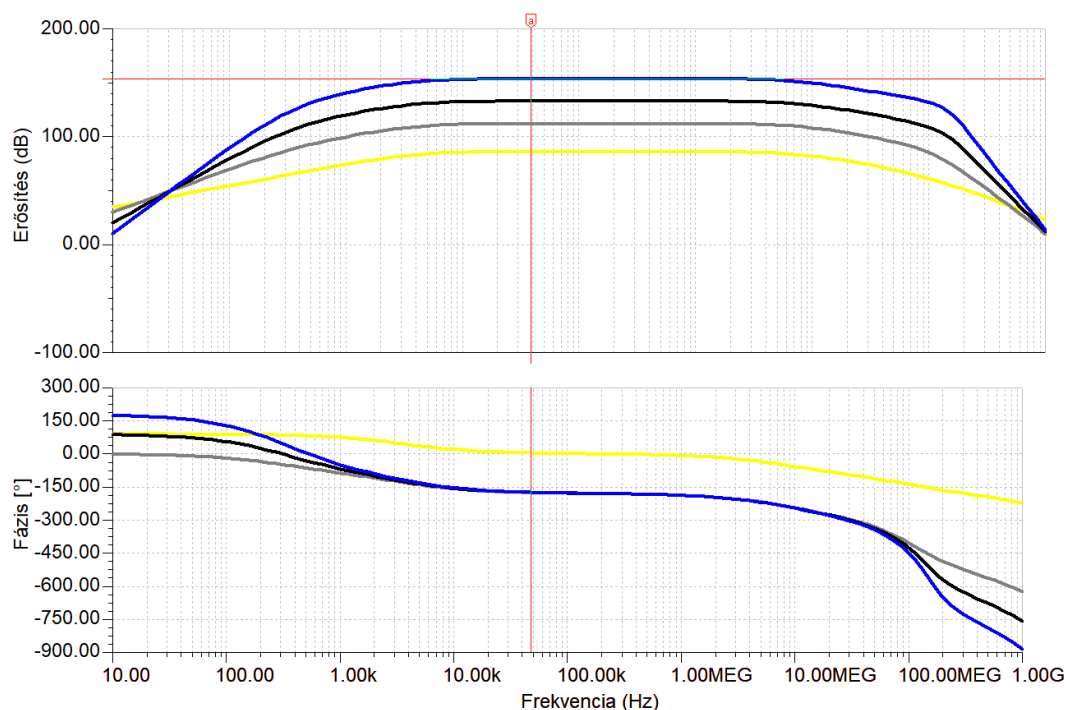


3.1. ábra. VLC vevő kapcsolási rajza TINA programban

Végül a szintillesztést (0V-ra illetve 3,3V-ra) egy komparátor valósítja meg (TLV3201). A komparátorral kialakított kapcsolás Schmitt-triggerként ismeretes, így létrehozva egy hiszterézist, amellyel a zaj ellen védekezem. Az egyes fokozatok között egy-egy felüláteresztő szűrő helyezkedik el, amely a fotodióda áramának egyenösszetevőjét, illetve a kisfrekvenciás zavarjeleket hivatott elnyomni. A komparátor hiszterézisének szintjei potenciométerrel állíthatóak, így a mérések alatt utólagos módosításokat lehet végezni, ha a helyzet úgy kívánja.

3.3. Vevő szimulációs eredményei

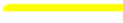







Végeztem frekvenciatartománybeli és időtartománybeli szimulációt. Frekvenciatartománybeli szimulációs eredményt mutatja a 3.2 ábra, illetve tartozik hozzá egy kiegészítő a 3.3 ábra, amely megmutatja a mérőpontok és színek közti összerendelést, és megadja a használni kívánt frekvencia környékén a 8 görbe értékét. A 3.2 ábrán látható "a" kurzor szerepe csupán jelzésértékű. A program eszerint azonosítja, hogy melyik frekvencián szeretnénk lekérdezni a görbékhez tartozó értékeket.



3.2. ábra. VLC vevő Bode diagram

Jól látható a 3.2 ábrán, hogy az egyes fokozatok között elhelyezett felüláteresztő szűrők valóban okoznak egy kisfrekvenciás letörést az amplitúdómenetben, viszont hozzávetőleg 10 kHz-es frekvenciától egészen kb. 10 MHz-ig konstansnak tekinthető az erősítés. Szimulációs eredménynek ez elfogadható, tekintve, hogy a későbbiekben 38,4 kbps (UART) adatátviteli sebességet fogok alkalmazni. A vevő kapcsolási rajzáról leolvasható ellenállásértékekből számolható erősítések értékeit az üzemi frekvencián a vártnak megfelelően visszaadja a 3.3 ábra. A C_2 kompenzáló kapacitás pedig megfelelően elsimítja a felső határfrekvenciánál található kiemelést (C_2 nélkül 27,5 MHz körül egy kb. 15 dB-es kiemelés figyelhető meg az amplitúdómenetekben).

A komparátor működésének helyességére az időtartománybeli szimulációt alkalmaztam. A TINA lehetőséget nyújt virtuális oszcilloszkóp használatára, amellyel interaktívan

Erősítés :	
	U1 A:(38,4k; 85,97)
	U2 A:(38,4k; 111,97)
	U3 A:(38,4k; 132,79)
	Uki A:(38,4k; 153,6)
Fázis :	
	U1 A:(38,4k; 5,26)
	U2 A:(38,4k; -174,26)
	U3 A:(38,4k; -173,75)
	Uki A:(38,4k; -173,25)

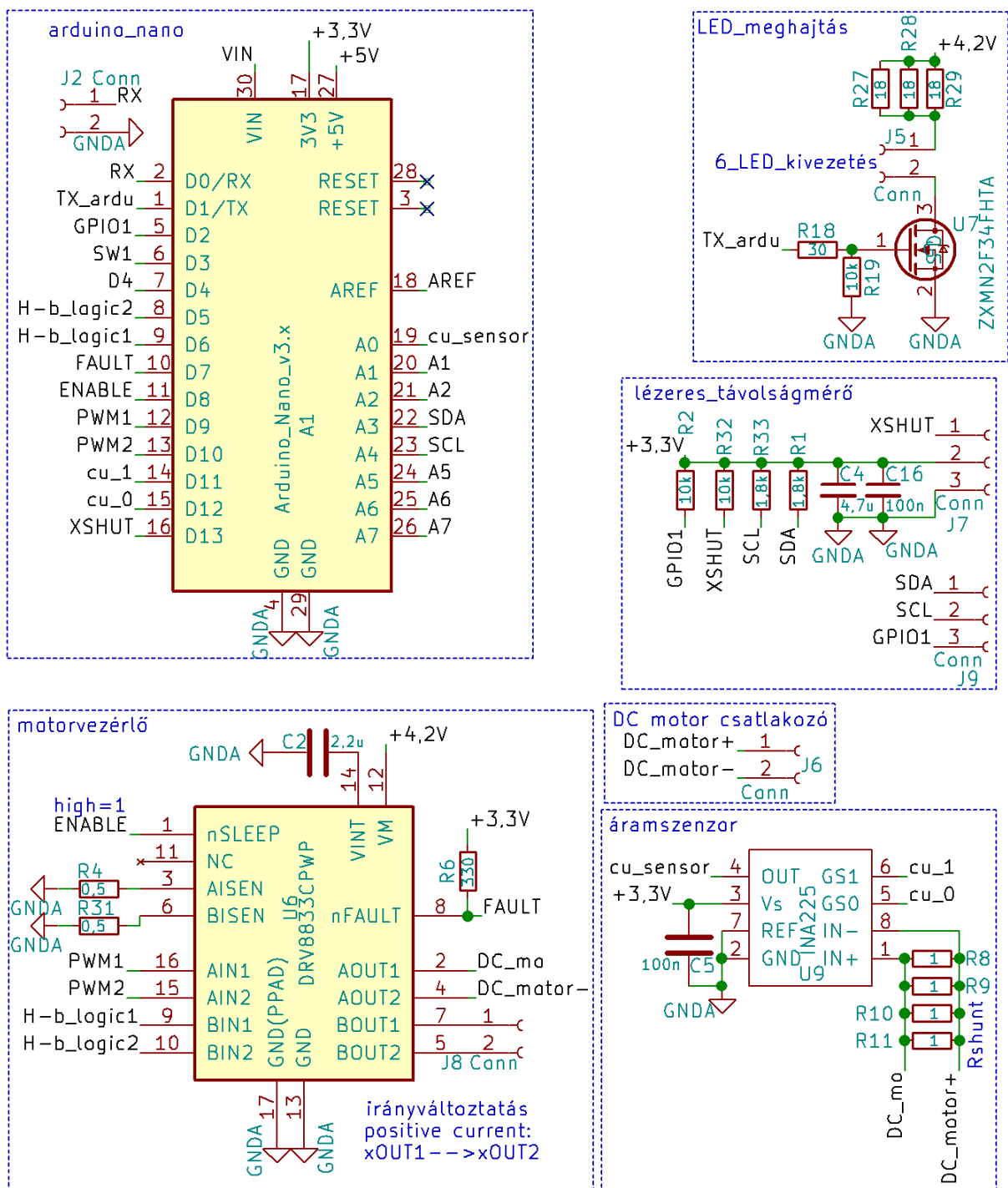
3.3. ábra. VLC vevő Bode diagram kiegészítés

lehet ellenőrizni egy áramköri paraméter hatását a szimulált időfüggvényeken. Ezenkívül tranziens szimulációt is végeztem. Külön kiemelném, hogy a tranziens szimuláció eredményén a műveleti erősítők kimeneti feszültségei szembevetően túlmehetnek a rájuk csatlakoztatott tápfeszültségek által képzett határokon. Ennek észrevétele után már komoly fenntartásokkal kezeltem minden TINA által számolt szimulációs eredményt.

3.4. Adó és vezérlő kapcsolási rajza

Az adó és vezérlő áramkör működéséről szimulációt nem végeztem. Ezen áramkör kapcsolási rajzát KiCad áramkörtervező program (verzió: 5.1.2) segítségével terveztem meg, amely a 3.4 ábrán látható.

Az adó működése a következő: TXardu vezérlőjel az R_{18} áramkorlátozó ellenálláson keresztül vezérli a MOSFET gate elektródáját, ezáltal a tranzisztor nyitott, vagy lezárt állapotban lehet. Ez az OOK moduláció megvalósítása kapcsolóüzemű tranzisztorral. A tranzisztor nyitott állapotában közel ideális kapcsolónak tekinthető, azaz vezetési ellenállása elhanyagolható, illetve adatlap alapján 1...2 A-nél kisebb áram esetén a drain-source feszültség elhanyagolhatóan kicsiny. Az általam használt 6 db LED 180 mA-t vesz fel 3,13 V feszültség mellett. Mivel az akkumulátor feszültség kb 3,6...4,2 V-os lesz, így az áramkorlátozó R_{27} , R_{28} , R_{29} ellenállásokon a maradék feszültségnek kell esni 180 mA mellett. Legrosszabb (worst case) esetben ez 1,07 V. Ohm törvényét alkalmazva ehhez 5,94 Ω értékű ellenállás szükséges. Az áramkorlátozást párhuzamosan kapcsolt teljesítmény ellenállásokkal valósítom meg, ezáltal eloszlatva a disszipálandó teljesítményt. Erre a célra 3 db 18 Ω -os ellenállás megfelel. Az R_{19} ellenállás abban segít, hogy a tranzisztor zárt állapotba kerülése után elvezesse a gate kapacitásban felgyülemlt töltéseket. Ezzel valamelyest gyorsítani lehet a kikapcsolási sebességen. A motorvezérlő működtetése úgy történik, hogy a tápfeszültség bekapcsolása után az nSLEEP bemenetén logikai magas szinttel engedélyezzük a működést, majd az AIN1, AIN2 vezérlő bemenetekre megfelelő jelet adunk. Ez többféle módon történhet. Pulzus szélesség modulált jellel fogom működtetni, ebben az esetben pedig az egyik vezérlő bemenetre PWM jelet kell kapcsolni, a másikkra pedig logikai alacsony szintet. A DC motor haladási irányát pedig az dönti el, hogy melyik vezérlő bemenetre adunk PWM jelet, illetve logikai alacsony szintet. A DC motor sebessége pedig növelhető a PWM kitöltési tényezőjével. A motorvezérlő xISEN pineket egy ellenálláson keresztül földre kell kötni. Az ellenállás értékének meghatározása a DC motoron átengedett maximális árammal van összefüggésben. A motorvezérlő előállít belsőleg 200mV-os referenciafeszültséget, amelyet komparálni fog a feszült-



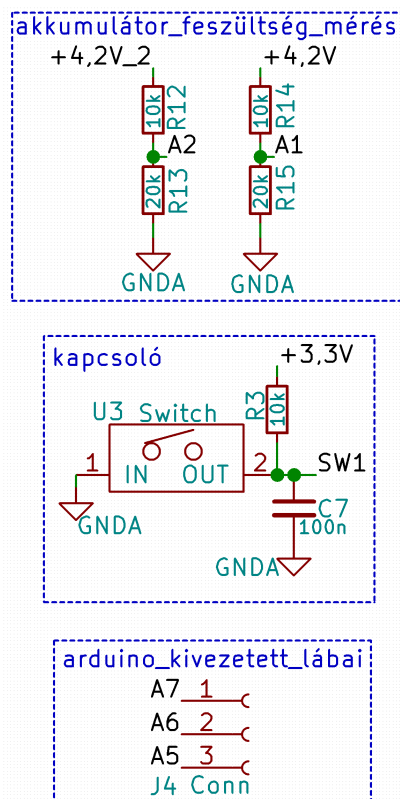
3.4. ábra. VLC adó és vezérlő kapcsolási rajza

séggel, amely létrejön az xISEN ellenálláson folyó áram hatására. Az xISEN ellenálláson folyó áram pedig egy az egyben a DC motor árama. Amennyiben túllépné a DC motor árama által keltett feszültség az imént említett referenciefeszültséget, a H-híd kikapcsol 20 μ s ideig. A DC motor áramfelvétele alapján egy 0,5 Ω -os ellenállás segítségével a motorvezérlő által beállított áramkorlát 400 mA. A motorvezérlő nFAULT kimenete hiba meglétét jelzi. Amennyiben hiba lép fel, a H-híd kikapcsol. Ezen motorvezérlő 2 DC motor vezérlésére elegendő, ennek megfelelően a "B" csatorna a kanyarodásért felelős DC motort vezérli. A modellautó egyik gyártási tulajdonsága az, hogy 3 állapotú kanyarodási mechanizmussal rendelkezik. Egyenesen képes haladni, illetve az irányváltoztatásért

felelős DC motor egyik illetve másik irányba indítása esetén behúz jobbra vagy balra. Az áramszenzor működésének lényege az R_8 , R_9 , R_{10} , R_{11} ellenállások által képzett Rshunt ellenállás értékében keresendő. Rshunt ellenállás pakk a DC motorral sorosan van kapcsolva, így annak árama átfolyik rajta. Ennek következtében az ellenállás pakkon feszültség esik. Ezen feszültség felerősítve kerül a szenzor kimenetére, amelyet feldolgozhatunk. A felerősítés mértéke attól függ, hogy GS0 illetve GS1 vezérlő bemenetre milyen logikai szintet kapcsolunk. 2 digitális bemenet összesen 4 lehetőséget kínál, ezeknek megfelelően 25, 50, 100 vagy 200 lehet az erősítés. Az Rshunt ellenállás, és az erősítés megválasztása függ a mérni kívánt áram értékének tartományától, illetve attól a feszültség tartománytól, amelyet a kimeneten fel tudunk dolgozni. 0,25 Ω -os ellenállás esetén 400 mA-es áramkorlással számolva az áramszenzor belső erősítőjére maximum 0,1 V feszültség érkezik, 25-ös erősítéssel ebből maximum 2,5 V jelenhet meg az áramszenzor kimenetén. Az Arduino NANO ezt az analóg feszültségértéket még egészen biztosan fel tudja dolgozni. Melegedési problémák elkerülése érdekében Rshunt ellenállás 0,25 Ω -os értéke ekvivalens 4 db 1 Ω -os ellenállás párhuzamos kapcsolásával.

Az általam használt távolságmérő a VL53L0X-GY-53-as típus, amelyet az Optikai és Mikrohullámú Távközlés Laboratórium biztosított számomra. A lézeres távolságmérő csomagjait I²C protokollon keresztül az adó és vezérlő áramkör fogja fogadni és küldeni, illetve látja el tápfeszültséggel is. Ennél fogva kivezettem az I²C-hez szükséges kommunikációs pineket (SDA, SCL), tápfeszültséget, illetve a távolságmérő többi IO portjaihoz csatlakoztatni kívánt pineket (GPIO1, XSHUT).

Az adó és vezérlő áramkörbe tervezett további funkciók kapcsolási rajzát jeleníti meg a 3.5 ábra. Polaritásvédő diódák, amelyek a rosszul csatlakoztatott tápfeszültségek esetén nem engednek a nyitófeszültségen felüli ellentétes polaritást az áramkör további egységeire.



3.5. ábra. VLC adó és vezérlő kapcsolási rajza kiegészítés

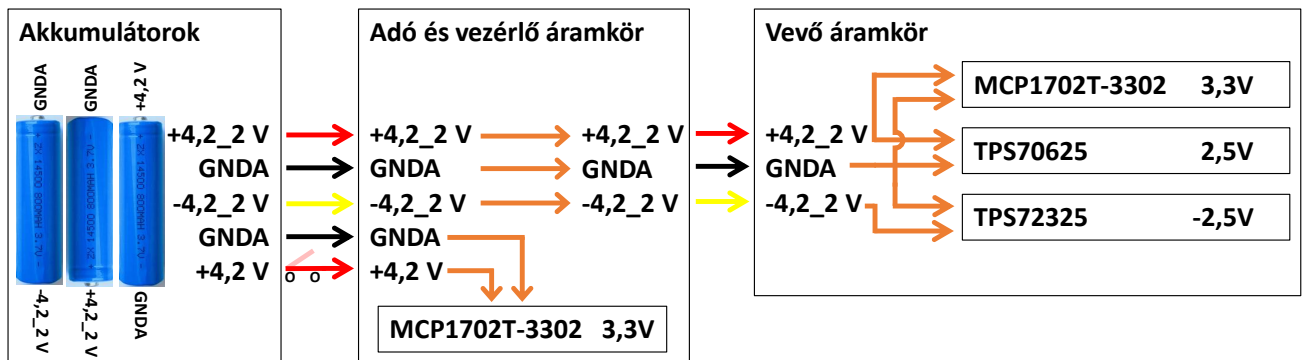
Akkumulátor feszültségek visszaolvashatók az Arduino NANO segítségével egy feszültség osztón keresztül. A feszültségosztás azért szükséges mert az Arduino NANO +3,3 V-os tápfeszültséget kap, ennél fogva maximum valamivel kevesebb mint +3,3 V feszültség az, amelyet az egyik analóg bemenetére adva az analóg digitális átalakító maximális digitális értékre kvantál túlcsoordulás nélkül.

Kialakításra kerül egy pergésmentesített kapcsoló is, amellyel programtesztelés, programfejlesztés során végezhetünk beavatkozásokat.

Az Arduino NANO nem használt analóg bemenetei is kivezetésre kerültek, így ha utólagosan módosításra kerül a sor, akkor könnyen kivitelezhető lesz.

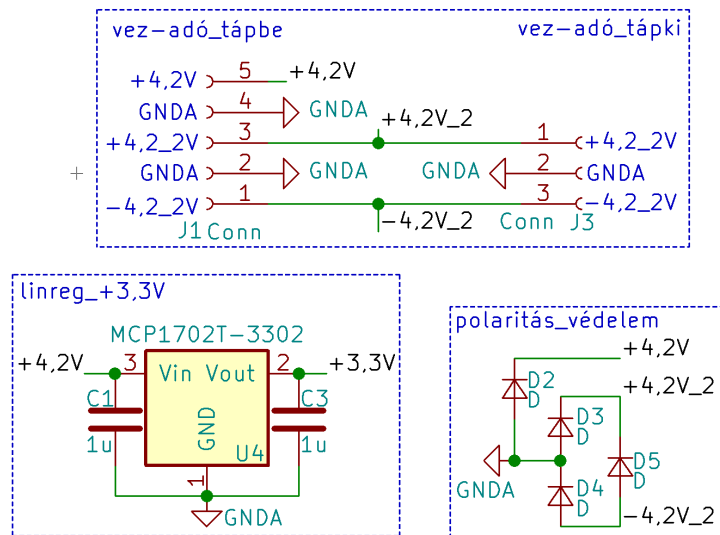
3.5. Tápellátás

A tápellátást 3 db ZX4500 típusú Lítiumion-akkumulátor segítségével oldottam meg. Az egyik akkumulátor az adó illetve vezérlő áramkört látja el, a másik 2 pedig a vevő számára biztosít szimmetrikus akkumulátorfeszültséget. A tápfeszültséget a műveleti erősítő, komparátor, illetve Arduino NANO számára külön lineáris regulátor állítja elő, melyek kapcsolását a gyártói adatlapon szereplő ajánlás szerint végeztem el. A tápellátás blokkvázlatát mutatja be a 3.6 ábra.



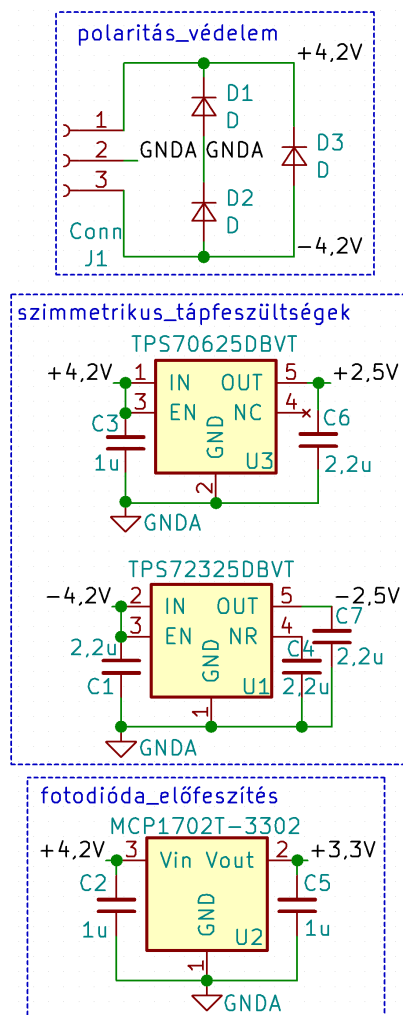
3.6. ábra. Tápellátás blokkvázlat

Az adó és vezérlő áramkörben található tápellátást megvalósító lineáris regulátor, illetve polaritásvédő diódák kapcsolási rajzát mutatja be a 3.7 ábra. A 3.8 ábra a vevő áramkörben található tápellátást és előfeszítést megvalósító lineáris regulátorok, illetve polaritásvédő diódák kapcsolási rajzát mutatja be. A lineáris regulátorok által előállított



3.7. ábra. VLC adó és vezérlő tápellátás kapcsolási rajz

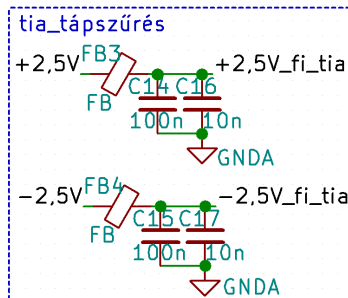
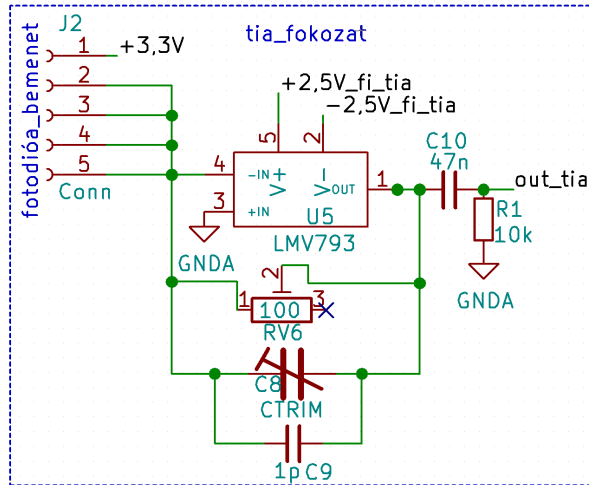
feszültségek további tápszűrőkön jutnak el a műveleti erősítőkhöz, illetve a komparátorhoz, fotodiódához.



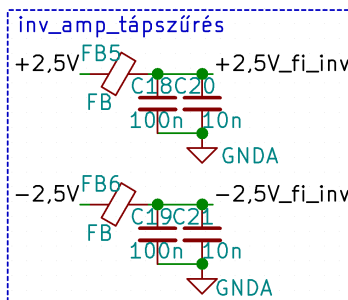
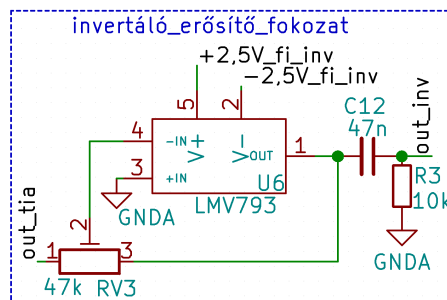
3.8. ábra. VLC vevő tápellátás kapcsolási rajz

3.6. Vevő kapcsolási rajz

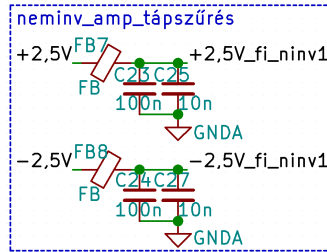
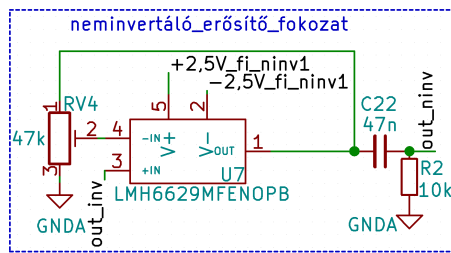
KiCad áramkörtervező programmal tervezett vevő kapcsolási rajzának többi egységét mutatja be a 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 ábra. Ezeken az ábrákon kerül bemutatásra továbbá az egyes fokozatok tápszűrése is.



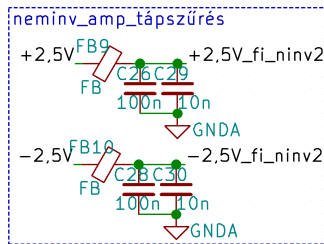
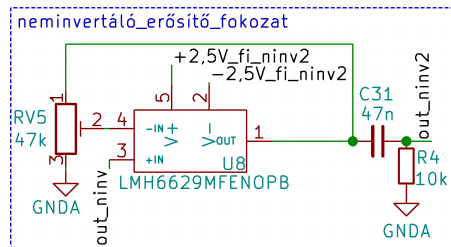
3.9. ábra. TIA kapcsolási rajz



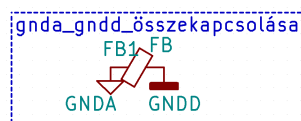
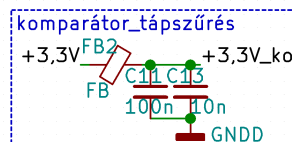
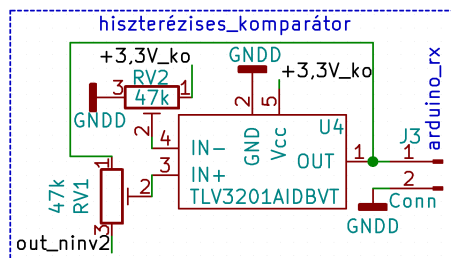
3.10. ábra. Invertáló fokozat kapcsolási rajz



3.11. ábra. Neminvertáló fokozat kapcsolási rajz



3.12. ábra. Neminvertáló fokozat kapcsolási rajz



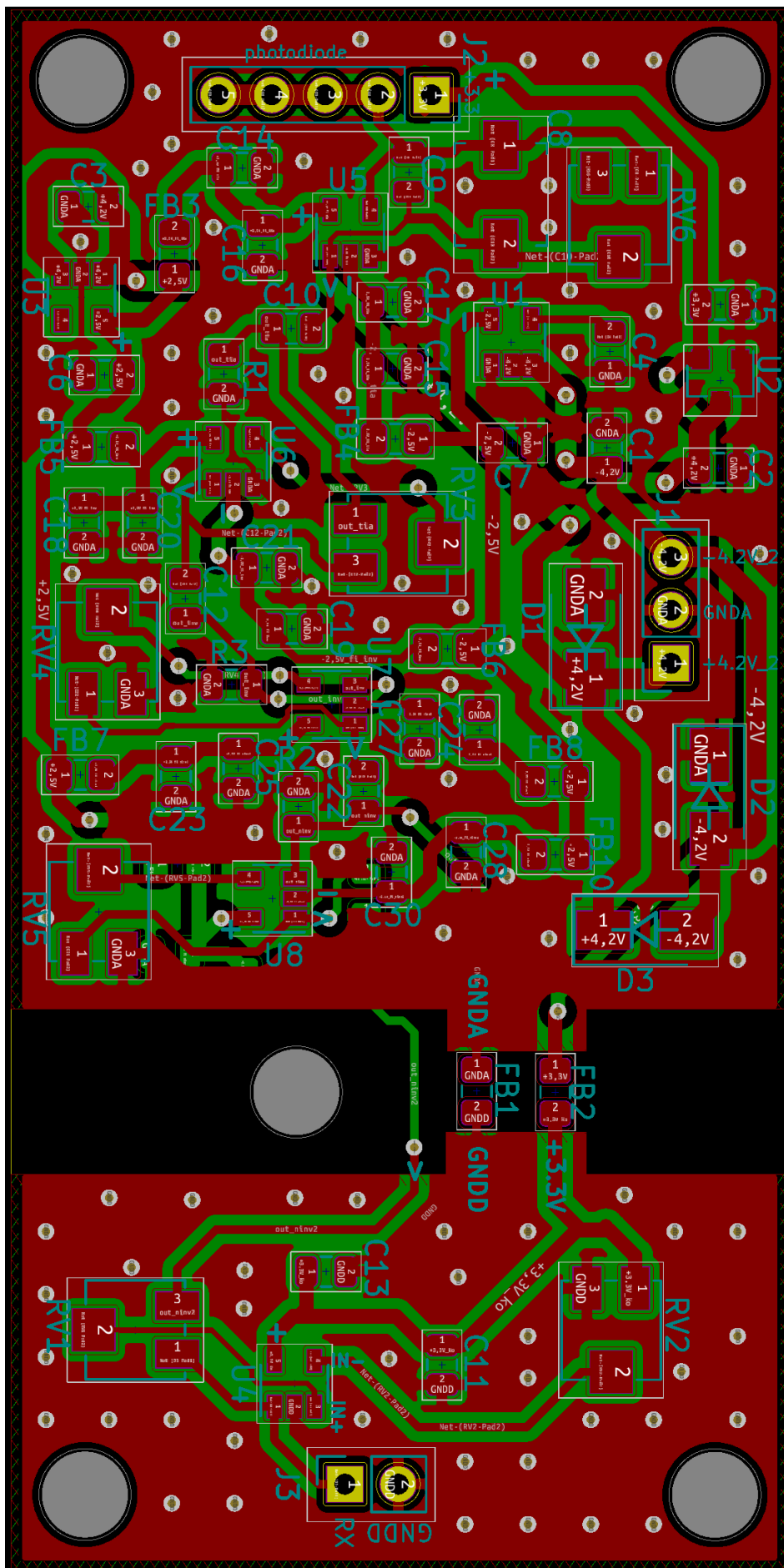
3.13. ábra. Komparátor kapcsolási rajza

3.7. Vevő nyomtatott áramköri terve

A 3.14 ábrán láthatóan a VLC vevőáramkört két részre különítettem el. Ennek oka a digitális, analóg alkatrészek földfelületének szeparálása. A cél az, hogy a digitális területen lévő komparátor által kiadott nagyfrekvenciás zavarjelek a lehető legkisebb mértékben kerülhessenek rá az analóg alkatrészek lábaira. Felső (analóg) rész tartalma:

- fotodióda áramának kialakított bemenet, illetve a fotodióda előfeszítéséhez szükséges +3,3 V-os kimenet
- 4 db erősítő fokozat (transzimpedanciás, invertáló, neminvertáló, neminvertáló), és a hozzájuk tartozó felüláteresztő szűrők
- adóegységen keresztül érkező akkumulátorfeszültségek (korábban ezeket +4,2_2V, -4,2_2V azonosítóval jelöltem) számára kialakított bemenet
- polaritásvédelmet ellátó diódák
- lineáris regulátorok, melyek előállítják a +3,3 V, +2,5 V, -2,5 V feszültségeket.
- ferritgyöngyökből és kondenzátorokból álló tápszűrők

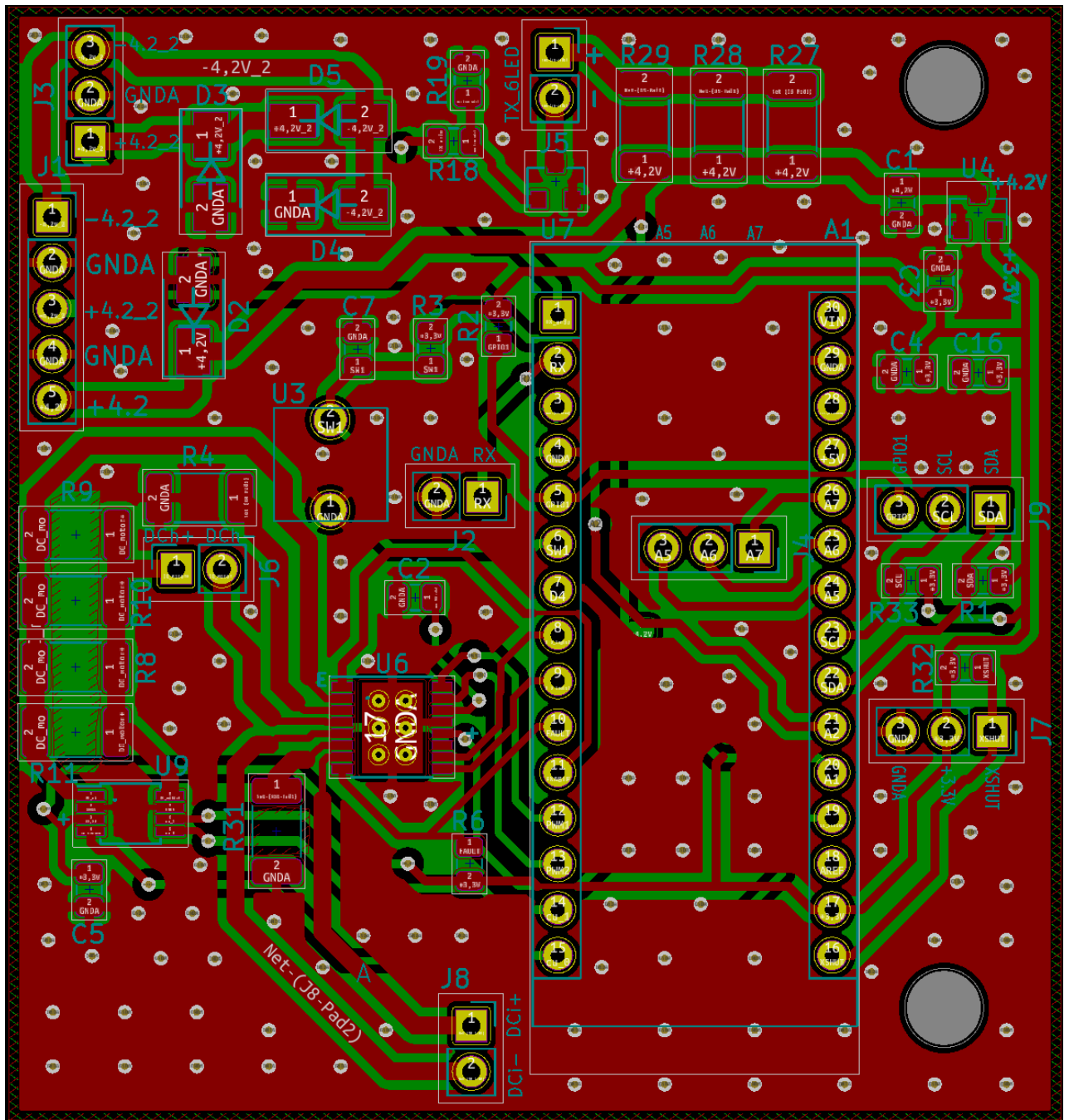
Az alsó (digitális) rész tartalma pedig a szintillesztő komparátor, és a vevő áramkör RX kimenete, amelyen keresztül érkező jelet közvetlenül az Arduino NANO dolgoz fel.



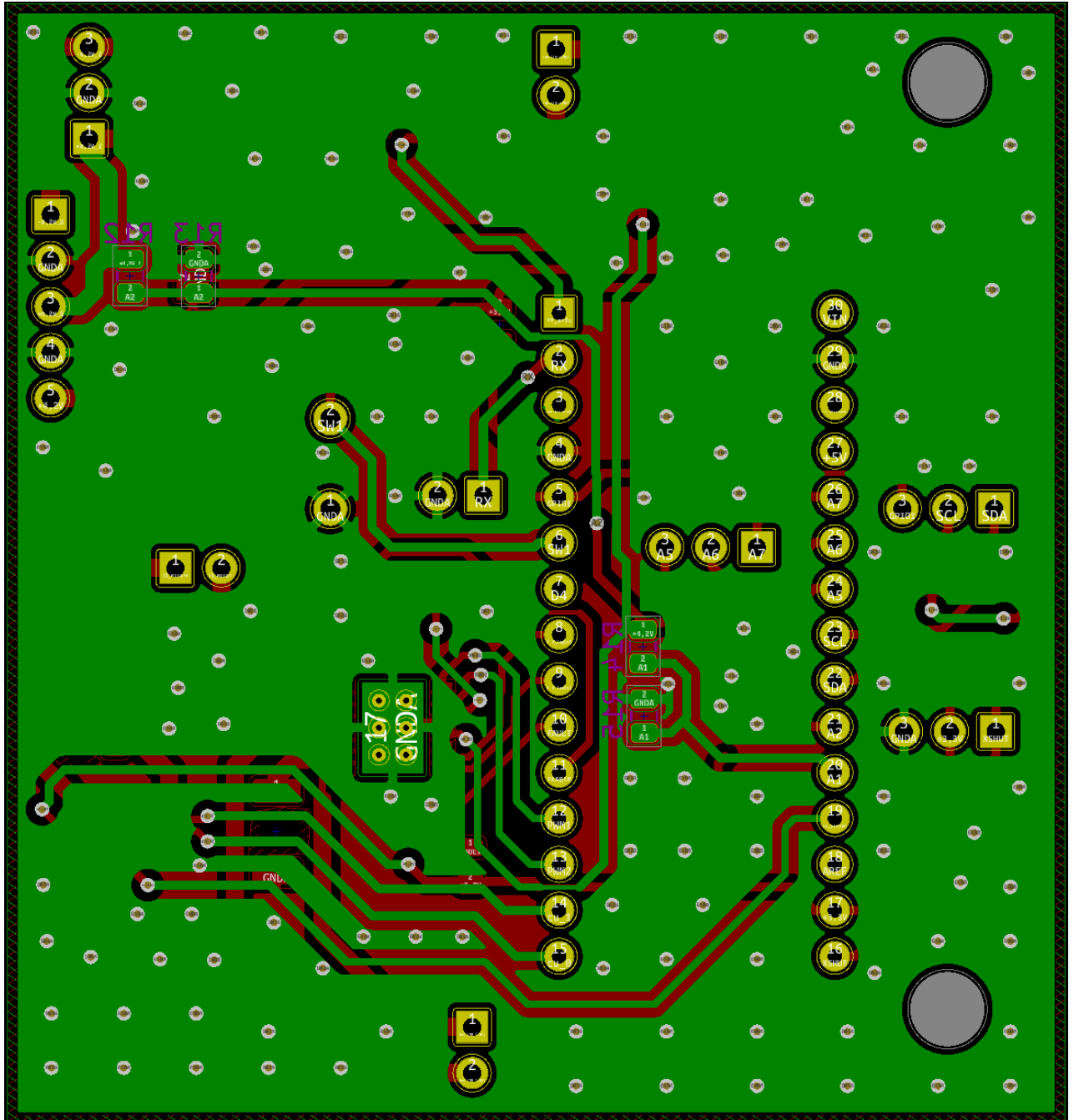
3.14. ábra. VLC vevő nyomtatott áramköri terv front oldal

3.8. Adó és vezérlő nyomtatott áramköri terve

Az adó- és vezérlőáramkör nyomtatott áramköri elrendezésének tervezésénél egyik fontos szempont volt, hogy a csatlakozók számára elegendő helyet hagyjak, illetve a hordozó alapterületéről semmi ne lógjon ki.



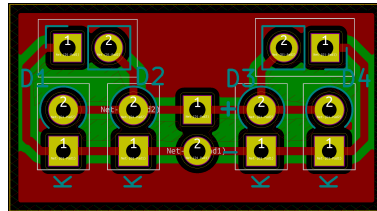
3.16. ábra. VLC adó nyomtatott áramköri terv front oldal



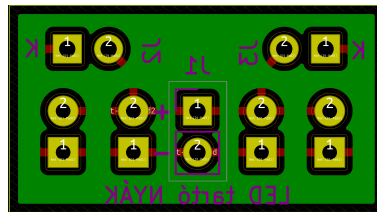
3.17. ábra. VLC adó nyomtatott áramköri terv bottom oldal

3.9. Diódatartók nyomtatott áramköri terve

Feladatomban mechanikai konstrukciója okán a fényforrásként használt LED-ek számára kialakítottam a karosszérián több furatot. Összesen 6db LED-et kívánok használni, ebből 2 db megfelelően rögzül, a maradék 4 db viszont nem. Ez indokolja az adó oldalon egy kis méretű NYÁK megtervezését, amelyre a 4 db LED csatlakozni tud, illetve a 2 db szélső 2 LED is. Ezzel a megoldással egyszerűen létre tudom hozni köztük a párhuzamos kapcsolást, továbbá a kisméretű NYÁK-on el tudok helyezni egy tüskesort is, megoldva a 6 db LED tápellátását. A kisméretű NYÁK layout terve látható a 3.18, és a 3.19,

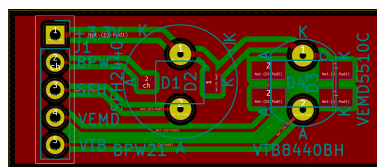


3.18. ábra. LED tartó nyomtatott áramköri terv front oldal

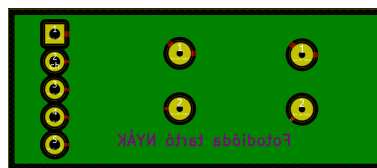


3.19. ábra. LED tartó nyomtatott áramköri terv bottom oldal

A vevő oldalon fotodiódát használok optikai-elektromos átalakítóként így szükségessé válik egy további NYÁK, amelyet rögzíteni lehet megfelelő helyzetben a modellautón. Az Optikai és Mikrohullámú Távközlés Laboratóriumban 4 db általam használható típus található, ezt figyelembe véve terveztem meg a 3.20 és a 3.21 ábra által bemutatott nyomtatott áramköri tervet.



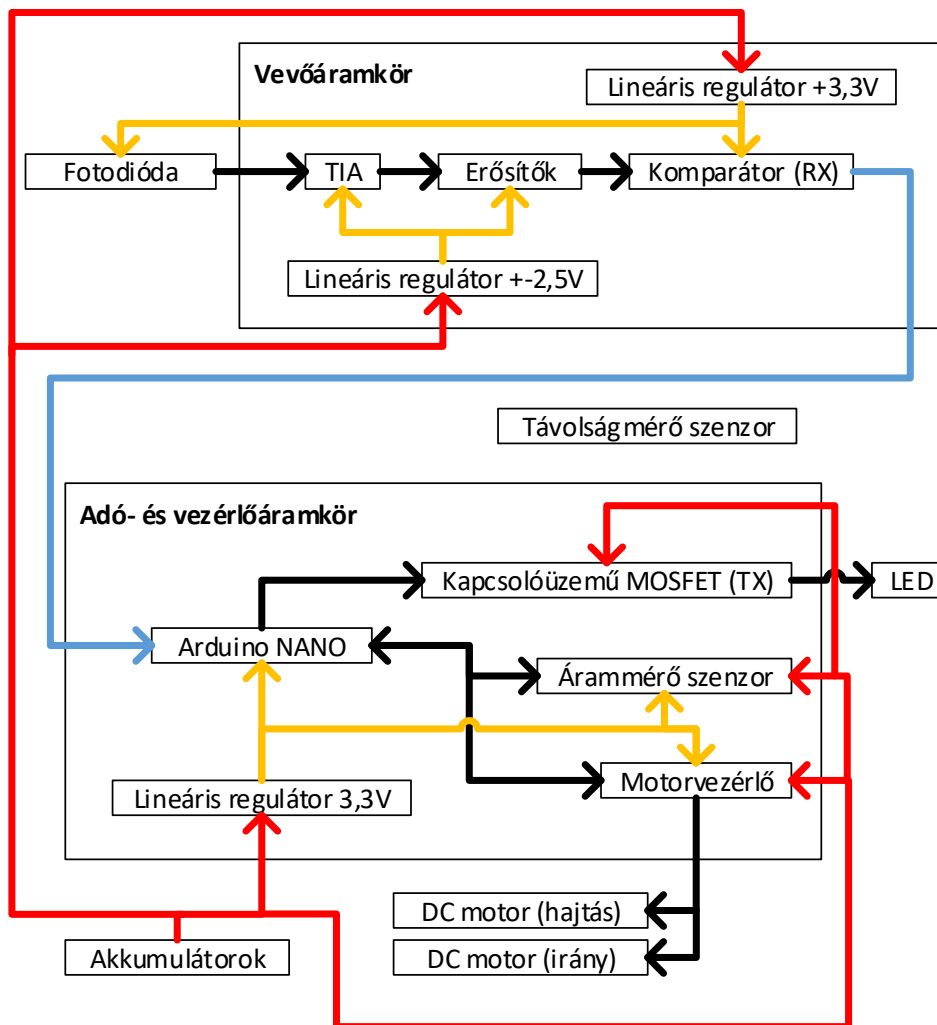
3.20. ábra. Fotodióda tartó nyomtatott áramköri terv front oldal



3.21. ábra. Fotodióda tartó nyomtatott áramköri terv bottom oldal

3.10. Teljes rendszer blokkvázlata

A 3.22 ábrán látható a teljes rendszert reprezentáló blokkvázlat. Ezen ábrán az adóhoz, vezérlőhöz, illetve vevőhöz tartozó valamennyi egység fel van tüntetve. Gyakorlati megvalósítás szempontjából mindkét modellautó számára a vezérlőegység szükséges. Az adó szerepét betöltő modellautóba a vezérlőn kívül az adóegység, illetve távolságmérő szenzor, a vevő szerepét betöltő autóba pedig a vevőegység foglal helyet. Piros színnel jelölöm az akkumulátorokból közvetlenül érkező feszültséget, a narancs szín jelöli a működéshez szükséges stabilizált feszültségeket, feketével a vezérlő, információt hordozó jeleket, és kék szín jelöli a vevőáramkörből az adó-és vezérlőáramkörbe érkező RX jelet.



3.22. ábra. Teljes rendszer blokkvázlata

4. fejezet

Áramkörépítés

4.1. Alkatrészek beültetése, élesztés

Adó esetén a beültetés először a kisebb passzív alkatrészekkel kezdődött, majd következtek sorra az integrált áramkörök, hüvelysorok beforrasztása, végül a diódák, nagyobb csatlakozók. Egyes csatlakozók nem tudnak felfeküdni a NYÁK felületére, ennek oka pedig az alkatrészek sűrű elhelyezkedése. A működés, stabilitás szempontjából ez nem okoz problémát (kellő mennyiségű forrasztóon felhasználásával).

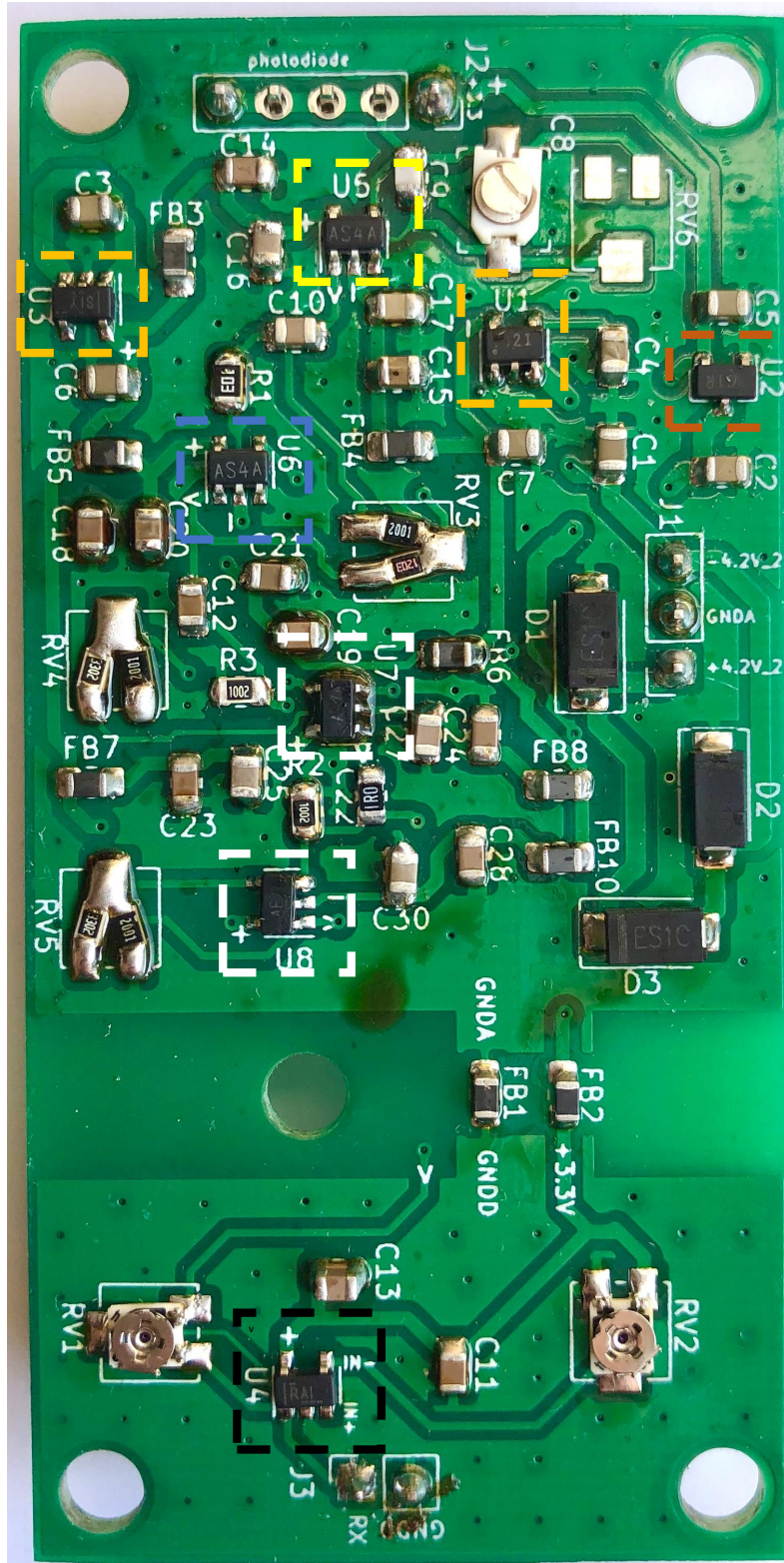
Vevő esetén először a tápfeszültségek előállításához, szűréséhez szükséges alkatrészeket forrasztottam be, majd ellenőriztem a műveleti erősítőkhöz eljutó tápfeszültségek értékét. Következő lépésként a fotodiódát ültettem be a fotodióda tartó NYÁK-ra, majd hozzácsatlakoztattam a vevőáramkör bemenetéhez. Végül az egymás után elhelyezett erősítőfokozatokat, utolsóként a komparátort ültettem be. A kritikus helyeken még a forrasztás folyamata közben mikroszkóppal ellenőriztem az egyes kész forrasztások minőségét, illetve a rövidzárak nemlétét. Miután minden alkatrész a helyére került, a tápcsatlakozók bemenetein bemeneti impedanciát mértem, hogy egy esetlegesen nem észrevett rövidzár ne okozza az áramkör tönkremenetelét.

A felhasznált eszközök a következők voltak:

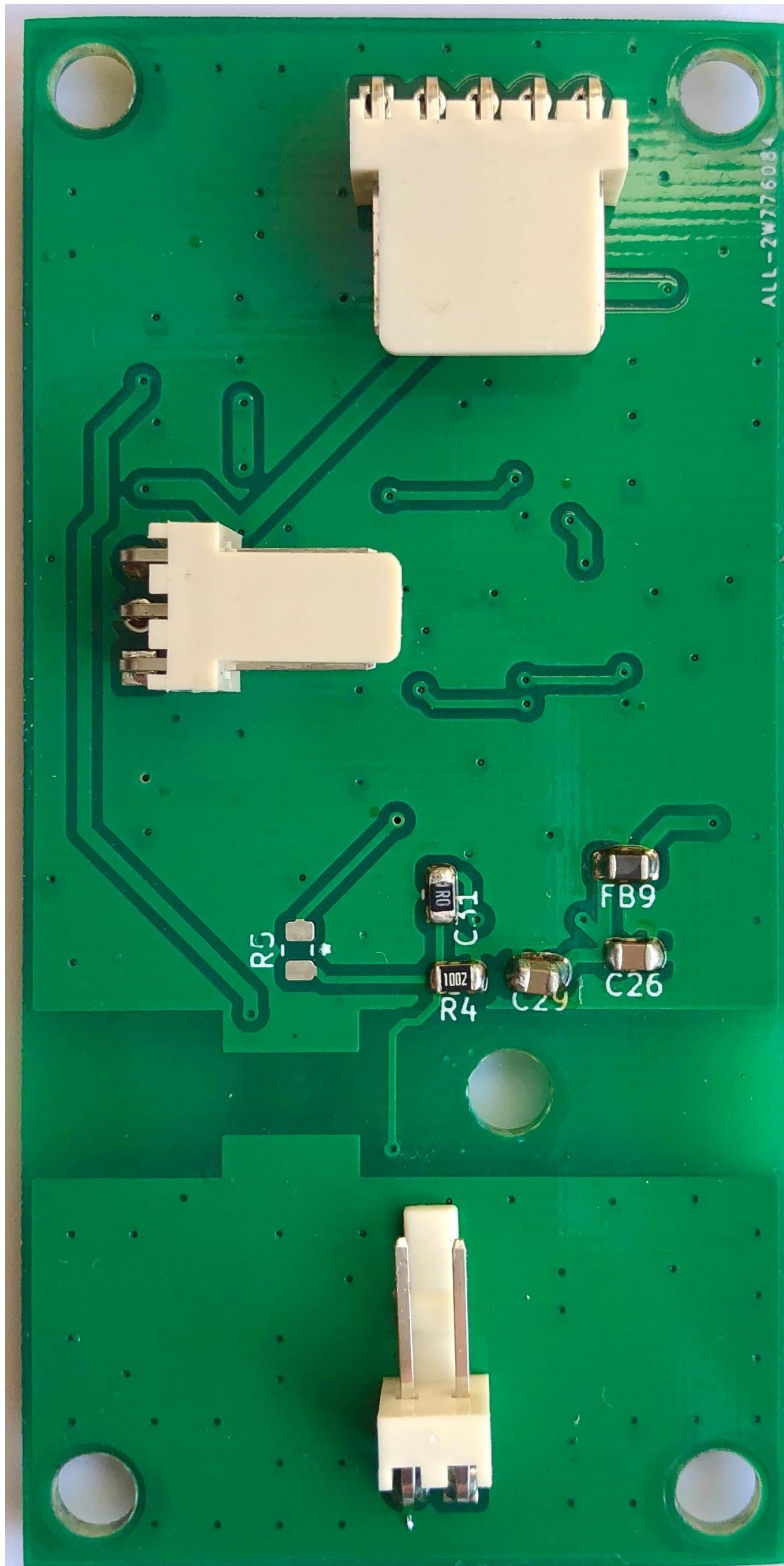
- ATTEN 850D hőlégfúvó
- Glue Gun ZD-7A ragasztópisztoly
- Weller WSD 50 forrasztóállomás
- Weller WSD 81 forrasztóállomás
- NYÁK tartó állvány
- Andonstar ADSM302 digitális mikroszkóp
- Erem SWISS 102ACA csipesz
- ChipQuik SMD291NL folyasztószer
- Loctite 60/40 370 5C 0,38mm forrasztóon
- Loctite 60EN 309 5C 0,7mm forrasztóon
- XURO-WICK W4015-1 ónszívó szalag
- ESD karszalag

4.2. Megépített vevő áramkör

A 4.1 ábrán keretezéssel jelöltem a vevő áramkör főbb egységeit. Narancs színnel a szimmetrikus tápfeszültséget előállító 2 db lineáris regulátort, pirossal a +3,3 V-ot előállító lineáris regulátort, sárgával a TIA fokozatot, kékkel az invertáló erősítőfokozatot, fehérrel pedig a 2 db neminvertáló erősítőfokozatot, végül feketével a komparátort.



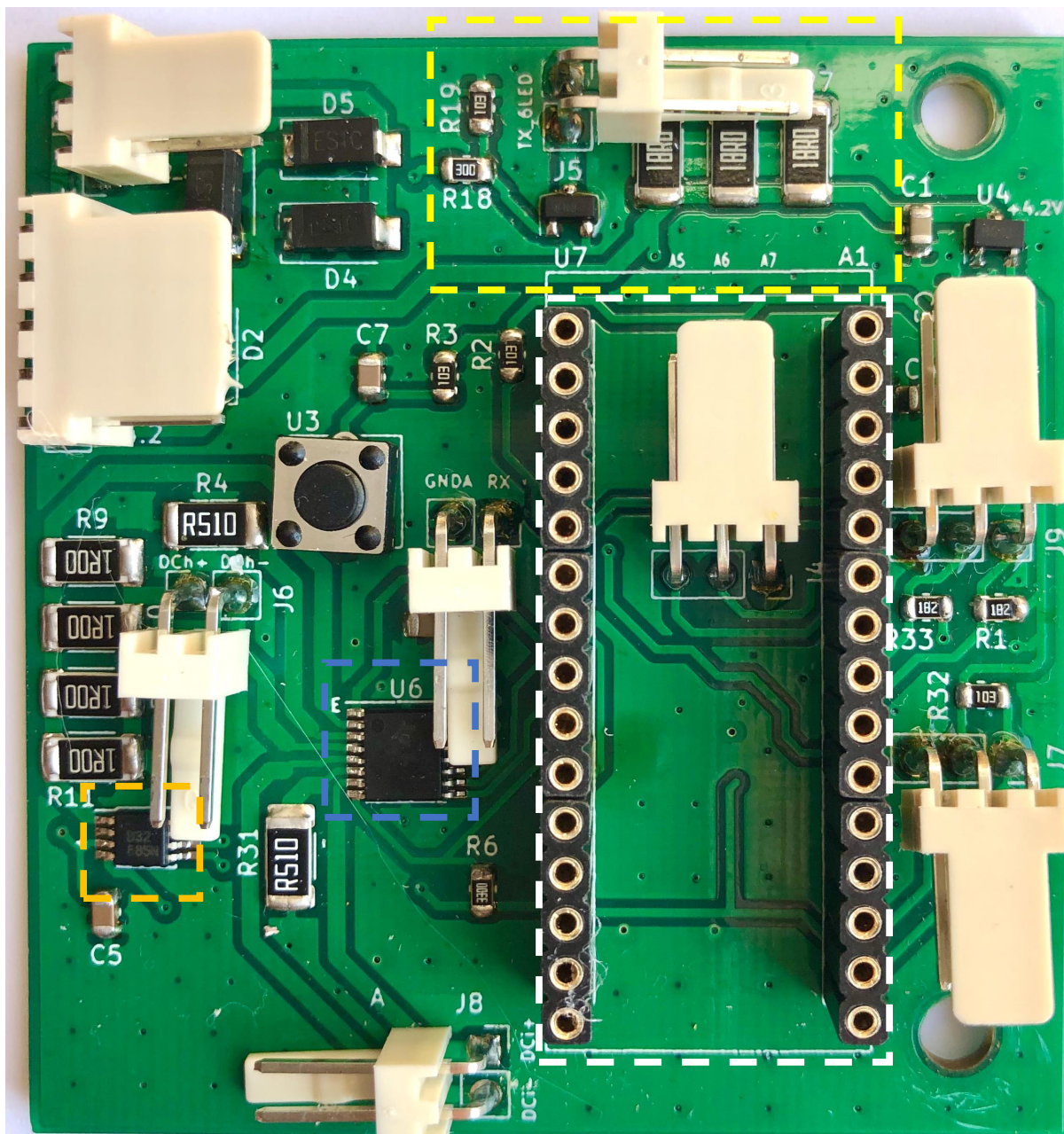
4.1. ábra. Megépült VLC vevő áramkör front oldal



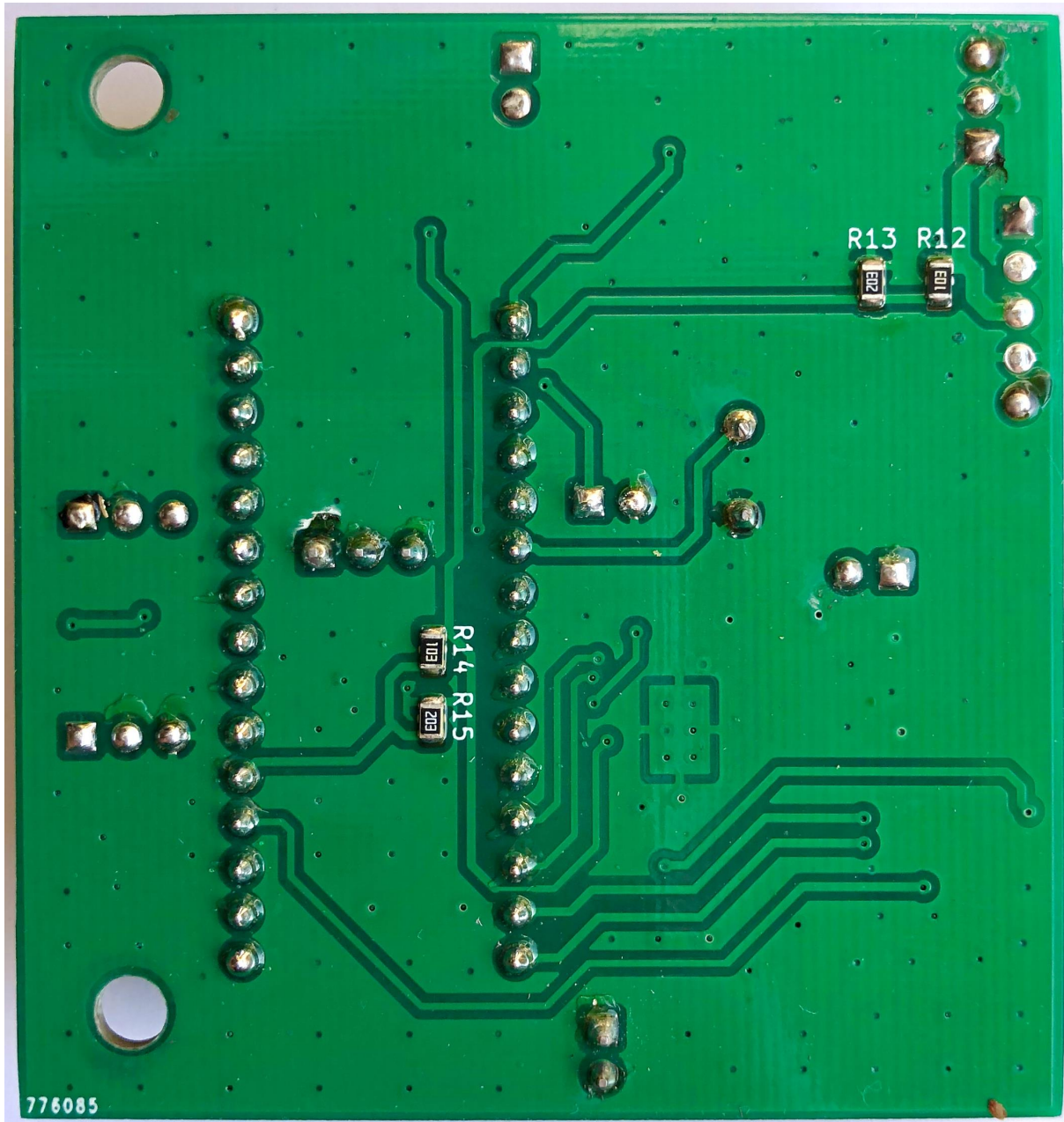
4.2. ábra. Megépült VLC vevő áramkör bottom oldal

4.3. Megépített adó és vezérlő áramkör

A 4.3 ábrán bekereteztem a fontosabb egységeket. Fehérrel az Arduino NANO hüvelyszorait, sárgával jelölöm az adó áramkört, késsel a motorvezérlő IC-t, és narancs színnel az árammérő IC-t. A képen bár úgy tűnhet, de a rendelkezésre álló hely jelentős részét a csatlakozók ellendarabjai elfoglalják. Egy újabb fejlesztési lehetőség más típusú, mechanikailag szintén megbízható, de kisebb méretű csatlakozót találni, amely alkalmas a jelenlegi csatlakozók helyettesítésére.



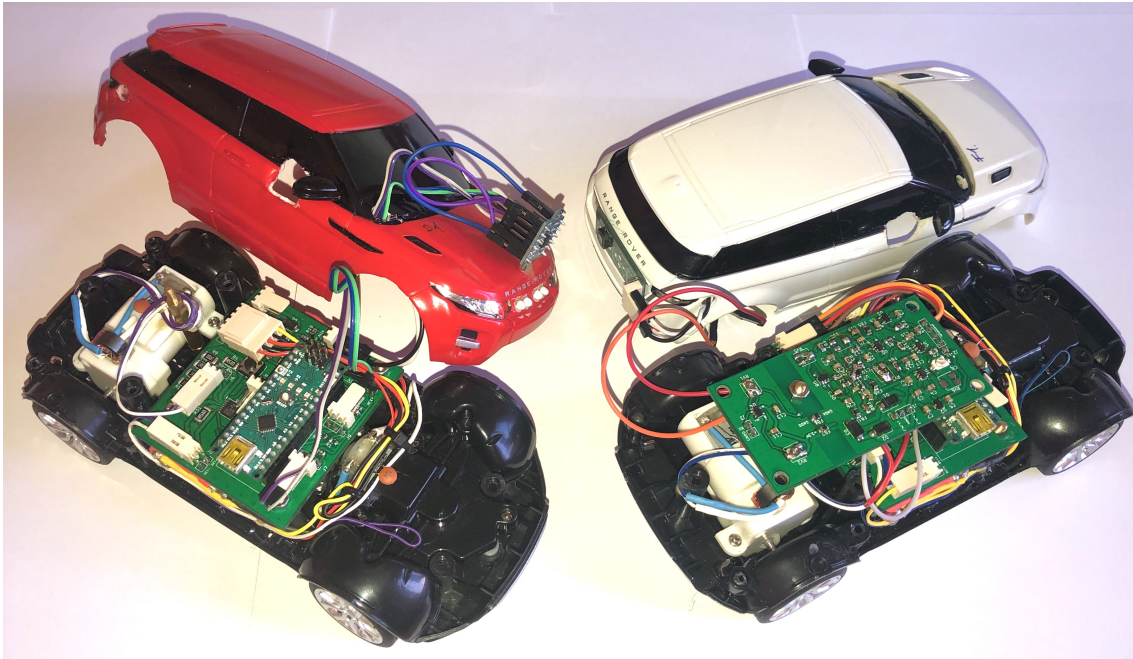
4.3. ábra. Megépült VLC adó és vezérlő áramkör front oldal



4.4. ábra. Megépült VLC adó és vezérlő áramkör bottom oldal

4.4. Elkészült mechanikai konstrukció

Mindkét modellautó számára elkészítettem egy adót, illetve egy vevőt, ezáltal elviekben mindkettő képes lenne betölteni mindkét (adási, vételi) szerepet. Most azonban a látható fényű kommunikáció demonstrálása a cél, így az egyik modellautóban elegendő ha csupán az adó és vezérlő áramkör illetve a távolságmérő foglal helyet, a másik modellautóban pedig a fotodióda, vevő áramkör, és az adó és vezérlő áramkör. Mindez látható a 4.5 ábrán. Az előzetes elvárásoknak megfelelő konstrukció valósult meg, a karosszéria könnyedén



4.5. ábra. Elkészült mechanikai konstrukció

felhelyezhető a modellautókra. A karosszérián kívül elhelyezett egységek vezetékai sem zavarják az összeszerelést. Fejlesztési javaslatként felmerül egy kétállású kapcsoló, amely a vevő áramkör által adott RX jelet rákapcsolja az Arduino NANO RX bemenetére, avagy megszakítja azt. Szoftverfejlesztési fázisban derült ki számomra, hogy az Arduino NANO programozása, és a vevőáramkör RX kimenete is ugyanazt a soros portot használja. Ez azzal jár, hogy amíg rá van csatlakoztatva a vevőáramkörre, addig nem lehet programozni.

5. fejezet

Vezérlőszoftver

5.1. Arduino NANO

A mechanikai, hardveres tervezésen túl a feladatom igényel szoftveres megoldásokat is. Ilyen célra több típusú fejlesztőkörnyezet is kapható a piacon. Az Arduino egy jó választás a feladatra, hiszen relatíve alacsony árú (hivatalos forgalmazónál 20 Euró), szabad szoftveres, nyílt forráskódú elektronikai fejlesztőplatform. Népszerűségét annak is köszönheti, hogy széleskörű bővíthetőséggel rendelkezik, a hivatalos oldalán pedig részletesen dokumentált példakódokat találhatnak a felhasználók. Az én esetemben az Arduino NANO indokolt a modellautók által szabott méretbeli korlátok miatt. Az Optikai és Mikrohullámú Távközlés Laboratórium 2 db Arduino NANO-t biztosított számomra a munkámhoz.

Az Arduino NANO egy ATmega328P mikrokontrollert tartalmaz amely 8 bites szervezésű, és 16MHz-es órajellel működik. 5 V-os és 3,3 V-os tápfeszültségről is működőképes (mérések alapján az Arduino NANO kb. 2,7-2,8 V körül kapcsol be). 22 db digitális pinto és 8 db analóg pinto tartalmaz, előbbiből 6 db PWM-re is képes. A rátöltött programot flash (nem felejtő) memóriában tárolja, amelyből 32 kB áll rendelkezésre összesen. Ebből azonban egy részt még lefoglalnak a különböző könyvtárak, és a letöltőprogram (bootloader), ennél fogva kb. 24-30kB-ot használhatunk fel. A programban definiált belső változókat és a stacket 2kB méretű SRAM-ban (Static Random-Access Memory) tárolja. A tartósnak szánt adatokhoz pedig 1 kB EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) áll rendelkezésre.

Programozása magas szinten történik, lényegében c++ nyelven. Az Arduino "sketch"-nek nevezi a programkódot, amelyet az ingyenesen letölthető Arduino IDE tölti rá magára az Arduino NANO-ra USB-n keresztül. Ez a folyamat a gyakorlatban rendkívül gyorsan elvégezhető. Az Arduino IDE megnyitása után megírt kódot 1 kattintással rá lehet tölteni az Arduino NANO-ra, miután kiválasztottuk az alaplap, processzor típusát, illetve, hogy melyik porton található az Arduino NANO.

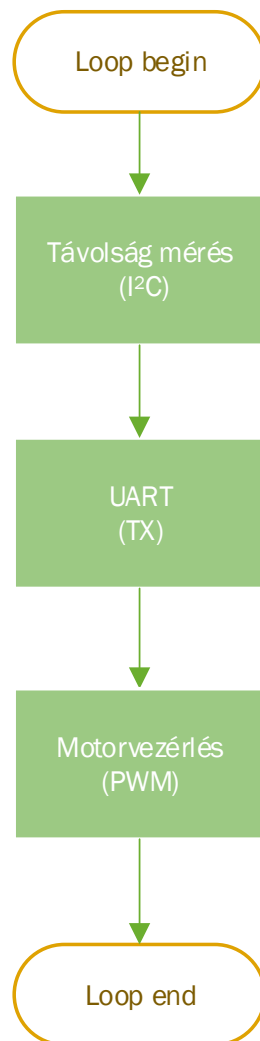
Miután rátöltöttünk egy programot, annak működése alapvetően 2 függvényen alapul. Ezek a `setup()` és a `loop()`. A `setup` függvénybe írt kódrészlet az Arduino NANO indulásakor egyszer fut le, majd ezt követően a `loop` futása ciklikusan történik.

5.2. Adóoldali szoftver

Adó oldalon a megvalósítandó feladat az, hogy a lézeres távolságmérőt felhasználva lemérje a hátul haladó modellautó az előtte lévőtől való távolságát, majd ezt látható fény felhasználásával elküldje az elől haladó modellautónak. Távolságtartást kell megvalósítani, így valamekkora haladási sebességet is létre kell hozni a hátul haladó autónak. A

haladás iránya (előre vagy hátra) lényegtelen, mert az elől haladó autóban futó program mindkét irányban képes kell legyen megtartani a távolságot.

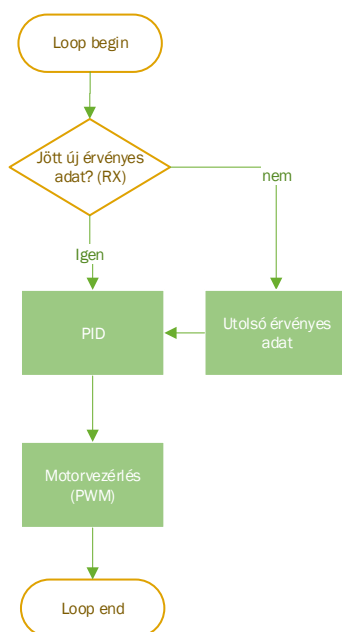
A távolságmérőt működtető programkönyvtár letölthető az Arduino IDE segítségével. A könyvtár tartalmazza a .cpp kiterjesztésű, és a header fájlokat. Ilyen módon letölthető könyvtárak gyakran tartalmaznak egy példakódot a működtetésre. Ezt a példakódot használom fel apróbb módosításokkal a távolság mérésére. A távolságmérő által visszaadott érték milliméterben értendő. Ezt az értéket küldöm el az Arduino NANO TX lábára kapcsolt adóáramkör segítségével. Az 5.1 ábra mutatja az adóoldali program blokkvázlatát.



5.1. ábra. Adóoldali program blokkvázlat

5.3. Vevőoldali szoftver

Vevő oldalon megoldandó feladat az, hogy a vevőáramkör által szolgáltatott RX jelet feldolgozva egy PID szabályzás jöjjön létre. Az 5.2 ábra mutatja a vevőoldali program blokkvázlatát. Minden loop elején el kell dönteni, hogy jött-e új adat. Ha jött, akkor azzal az új adattal kell PID szabályzást megvalósítani. Ha nem jött új adat, akkor a korábbi értéket adjuk a PID szabályzó bemenetére. A PID szabályzás 3 paraméterét (K_p , K_i , K_d), az "alapjelet" (setpoint), és a PID szabályzó kimenetének tartományát állítani lehet, így korlátozható az általam használt PWM-et leíró tartományra. A motorvezérlő jel pedig a PID szabályzó kimenete (output).



5.2. ábra. Vevőoldali program blokkvázlat

6. fejezet

Mérések

6.1. Felhasznált műszerek

A későbbiek során található megnevezések az alábbi eszközökre, és műszerekre vonatkoznak.

- Rigol DS-1054Z oszcilloszkóp
- OWON AG 1011F függvénygenerátor
- Digimess HM100 multiméter
- Maxwell 25304 multiméter
- TWINTEX TP-4503N labortápegység
- Mérőszalag
- Digitális tolómérő

6.2. Adó és vezérlő áramkör

6.2.1. DC feszültségek és áramok

A 6.1 táblázatban foglaltam össze a DC feszültségmérések eredményeit. A mérési elrendezést mutatja a 6.1 ábra. Az áramokat ismert ellenállásokon eső feszültségből számoltam ki Ohm törvény segítségével. Az akkumulátorok kb. 4,2 V és 3,6 V között használhatók a modellautóknak, ezalatt bizonytalanná válik a működés. Korábbi állításom igazolódott, azaz DC motor meghajtás, illetve bekapcsolt LED-ek esetén az akkumulátorból felvett áram (I_{akku}) nem okozza majd az akkumulátoroknál alkalmazott melegragasztó megolvadását. Az LED-ek által felvett áramok összege a 6 Ω eredő ellenállással rendelkező ellenállás csoporton eső feszültségből számítható. Jól láthatóan a tranzisztor nyitott állapotában nagyon alacsony U_{DS} feszültséggel jellemezhető. A rajta átfolyó áram (I_{6LED}) ismeretében meghatározható teljesítmény mely disszipálódik rajta elhanyagolhatóan kicsiny, kb. 0,7 mW. A tapasztalat ezt igazolja is, a kezem hőmérsékletét se érte el a tranzisztor így annak hűtésére egyelőre nem kell komolyabb figyelmet fordítani. Összesen 3 db áramkorlátozó ellenállás található az adóáramkörben, egymással párhuzamosan. Ezáltal a teljes I_{6LED} oszlik el 3 egyenlő arányban. Egy ilyen ellenállás 18 Ω -os, így felülről becsülve 50 mW disszipálódó teljesítmény van jelen ellenállásonként. Tekintve, hogy egy

ellenállás névlegesen 0,75 W teljesítményt bír el, így a hűtésükről nem szükséges gondoskodni. A kapott DC mérési eredmények megfelelnek az előzetes elképzeléseknek, így az adóáramkör időtartománybeli mérésekre kész. Figyelembe véve, hogy az akkumulátor által szolgáltatott feszültség folyamatosan változik, a kapott értékek egy része csupán tájékoztató jellegű.

6.1. táblázat. Adó és vezérlő áramkör DC feszültségei és áramai

Mért mennyiség	Mért érték [V, A]
U_{akku}	4,05
I_{akku}	0,3
$U_{linreg,be}$	3,95
$U_{linreg,ki}$	3,30
$U_{motorvez,tap}$	3,29
$U_{arammero,tap}$	3,29
$U_{arduino,tap}$	3,29
$U_{lezer,tap}$	3,29
$U_{DCmotor}$	3,59
$I_{DCmotor}$	0,13
I_{6LED}	0,15
U_{6LED}	3,04
U_{DS}	0,0043
U_{GS}	3,20

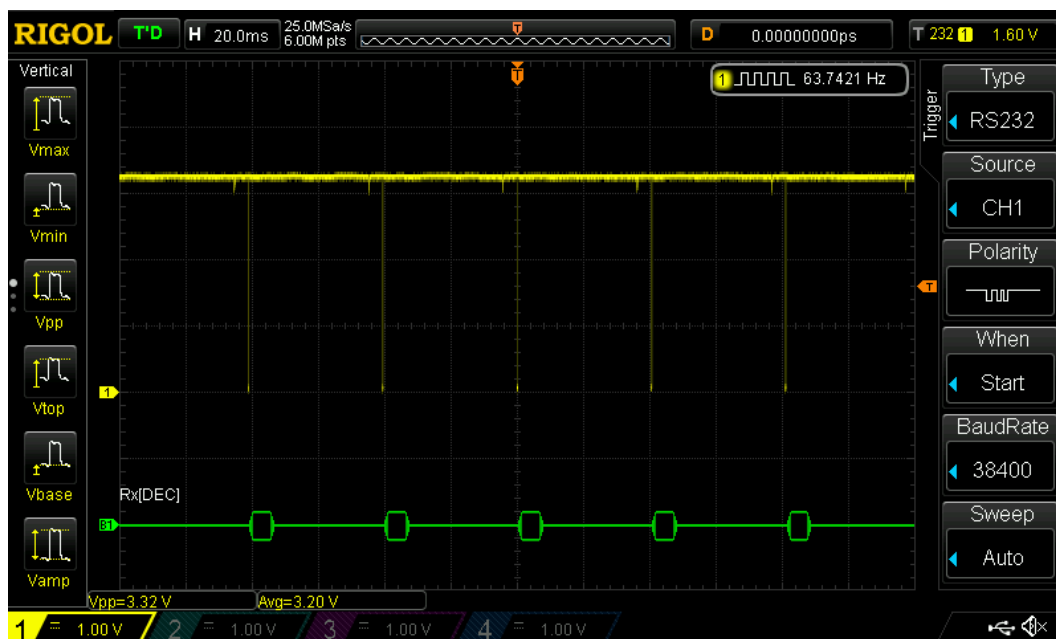


6.1. ábra. Adó és vezérlő áramkör mérési elrendezés

6.2.2. Időtartománybeli mérések

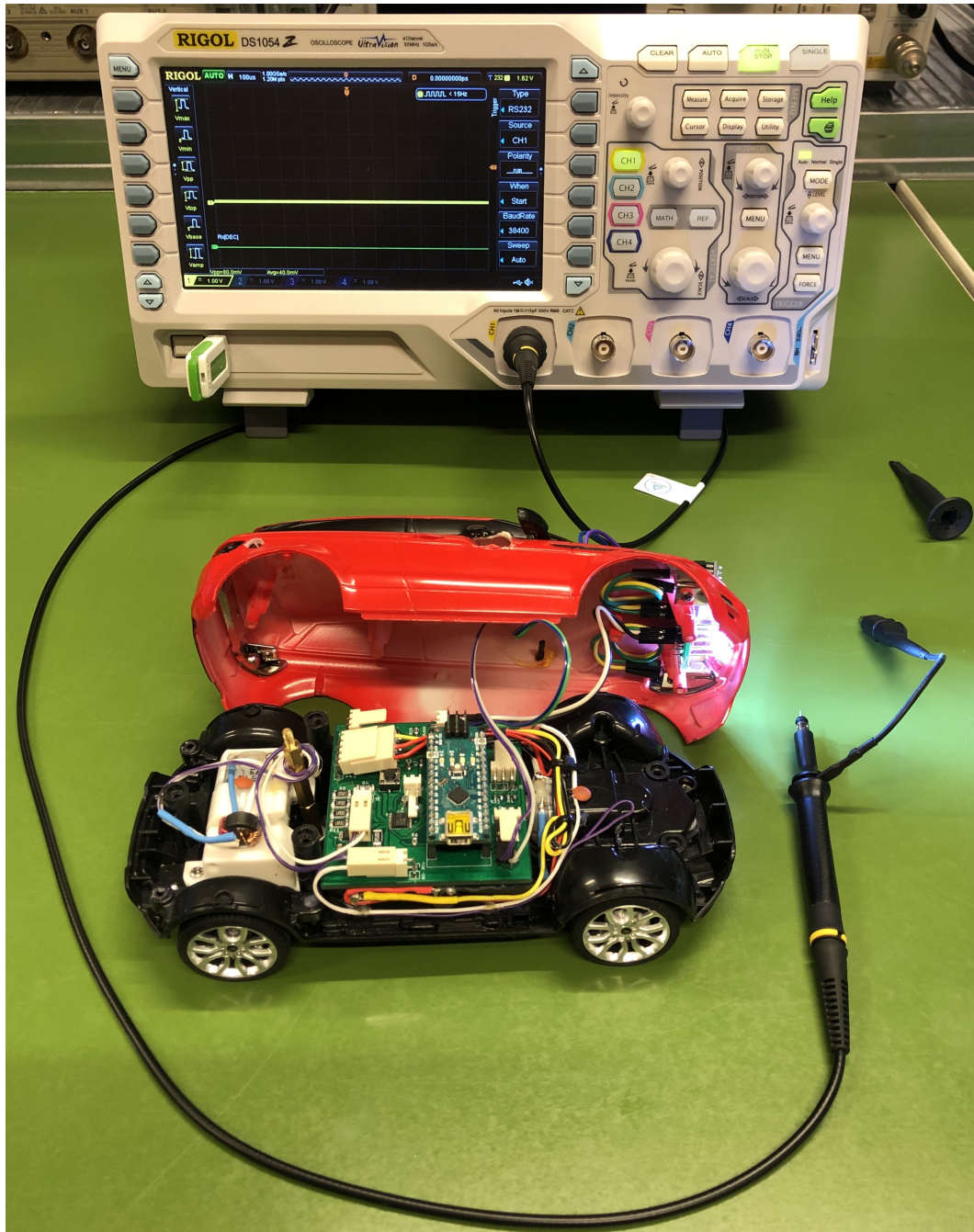
Adó esetén időtartományban olyan mérést végeztem, amely reprezentálja az adó által küldött távolságvérték időbeli gyakoriságát, azaz milyen időközönként kerül kiküldésre egy lemért távolság. Ennek mérési elrendezését jeleníti meg a 6.3 ábra.

A mérés elvégzéséhez szükséges egy adótesztelésre szánt szoftver is, melyet a függelékben mellékelek. A kód működését tekintve a következő. Lemér egy távolságot, amelyet milliméterben kell értelmezni, ezt átváltja centiméterbe, majd elküldi a soros (TX) kimeneten. A mérés eredményét pedig a 6.2 ábra mutatja, amely alapján a ciklusidő kb. 40 ms. A 6.2 ábrán látható függőleges periodikus vonalak az adó által küldött távolságokat



6.2. ábra. Arduino NANO TX lábán mért jelalak

jelentik, az oszcilloszkóp azonban ilyen időalap mellett már nem tudja dekódolni a küldött értéket.



6.3. ábra. Adó áramkör mérési elrendezés

6.3. Vevő áramkör

6.3.1. DC feszültségek és áramok

A 6.2 táblázat mutatja a vevő áramkörön lévő integrált áramkörök tápfeszültségeit. Ezeket a méréseket multiméterrel végeztem, a vevő tápellátását pedig már akkumulátorokkal valósítottam meg. A mért feszültségeket összevetve a lineáris regulátorok adatlapján található értékekkel, az áramkör időtartománybeli mérésekre kész. Megjegyzés: A vevő tápáramát kapcsolóval megszakítani nem lehet, így ha használat után nem távolítjuk el az akkumulátorokat, akkor nagyobb idejű tárolás esetén azok kapocsfeszültsége lecsökkenhet annyira, hogy a lineáris regulátorok már nem tudják belőle előállítani az üzemszerű kimeneti feszültségeiket. Ez több alkalommal is előfordult, és ilyen esetben a lineáris regulátorok üzemszerű feszültséghez képest ellentétes előjelű feszültséget állítottak elő. Ezen okból egy további fejlesztési lehetőség a vevő tápáramát megszakító kapcsoló beépítése az áramkörbe.

6.2. táblázat. Vevő áramkör DC feszültségei

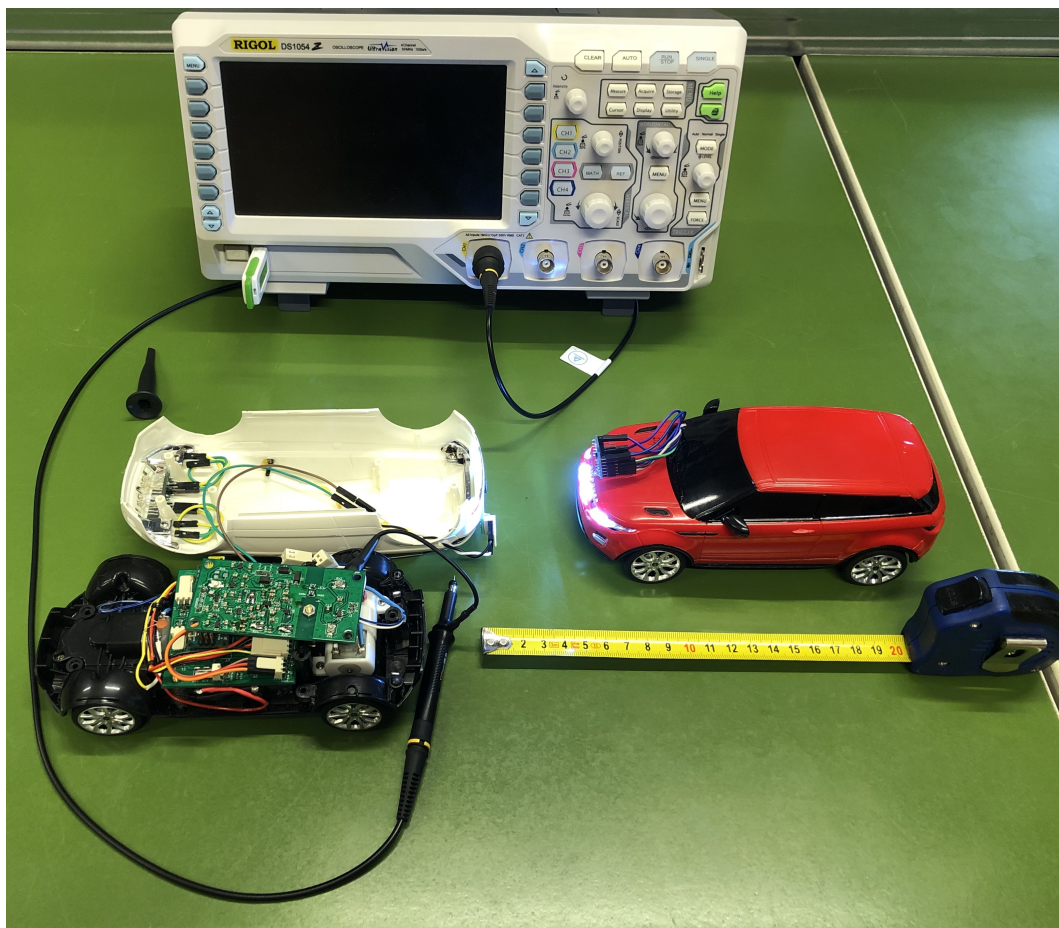
Integrált áramkör	Feszültség [V]
U_5	$U_+=2.49$
U_5	$U_-=-2.49$
U_6	$U_+=2,49$
U_6	$U_-=-2,49$
U_7	$U_-=-2,49$
U_7	$U_-=-2,49$
U_8	$U_-=-2,49$
U_8	$U_-=-2,49$
U_4	$U_+=3,29$
U_4	$U_-=0$

6.3.2. Időtartománybeli mérések

A következő méréseket oszcilloszkóp segítségével végeztem. A vevő számára az OOK modulált fényt az általam elkészített adó szolgáltatva oly módon, hogy az adóban egy tesztelésre készített szoftver ciklikusan egy 3 elemű tömb elemeit küldi el. A tesztelésre írt programkódot a függelékben mellékelem. A három elem decimálisan a 10, 255, 29. Kihasználtam az oszcilloszkóp dekódolási funkcióját, így ellenőrizni tudtam az adó áramkörben (Arduino NANO TX lába) létrejövő bitsorozat helyességét. Ezek után a 6.4 ábrán látható mérési elrendezésben a vevő egyes fokozatainak kimenetén mértem a vett jelalakot több különböző távolságban. Az oszcilloszkóp dekódolási funkcióját szintén alkalmaztam ezen mérések alatt.

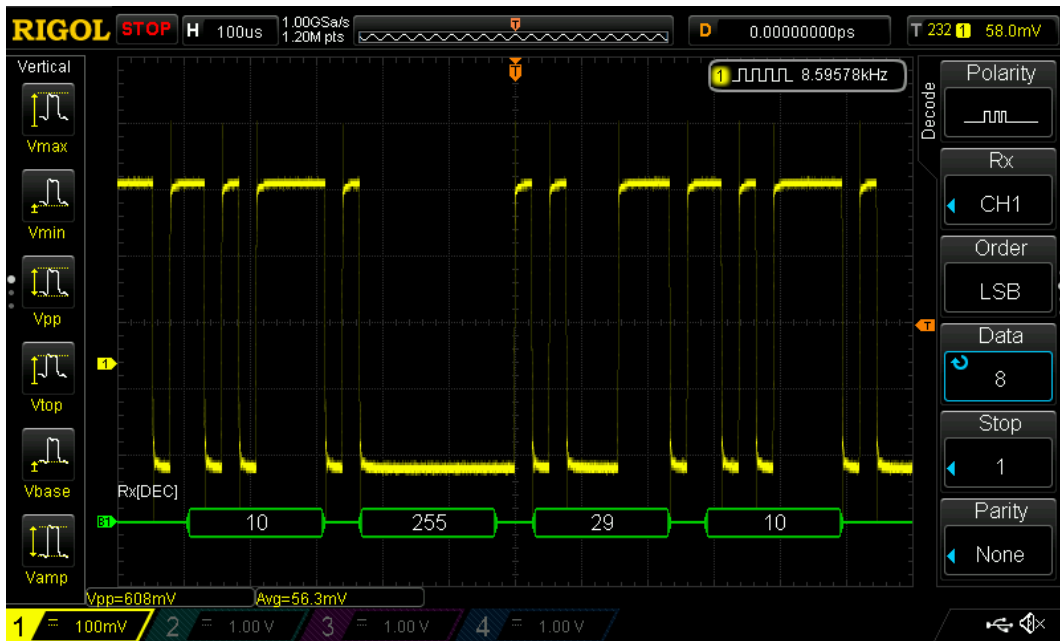
TIA fokozat kimenet

Ennek a fokozatnak a tápfeszültség minősége az egyik legkritikusabb pontja, mivel mind a bemeneten lévő áramjel, mind a kimeneten lévő feszültségjel effektív értéke meglehetősen kicsiny. A vevő további erősítői hiába működnének jól, ha az első fokozat kimenete bármilyen jellegű gerjedést/zavart tartalmaz. Itt érdemes megjegyezni a TINA segítségével végzett szimulációk által adott kép hiányosságait. A TIA fokozat első megépítés után ugyanis egy kb. 2 MHz-es szinuszos jelet produkált, abban az esetben, ha a fotodióda nem kapott általam sugárzott OOK modulált fényt. Ha pedig ráirányítottam

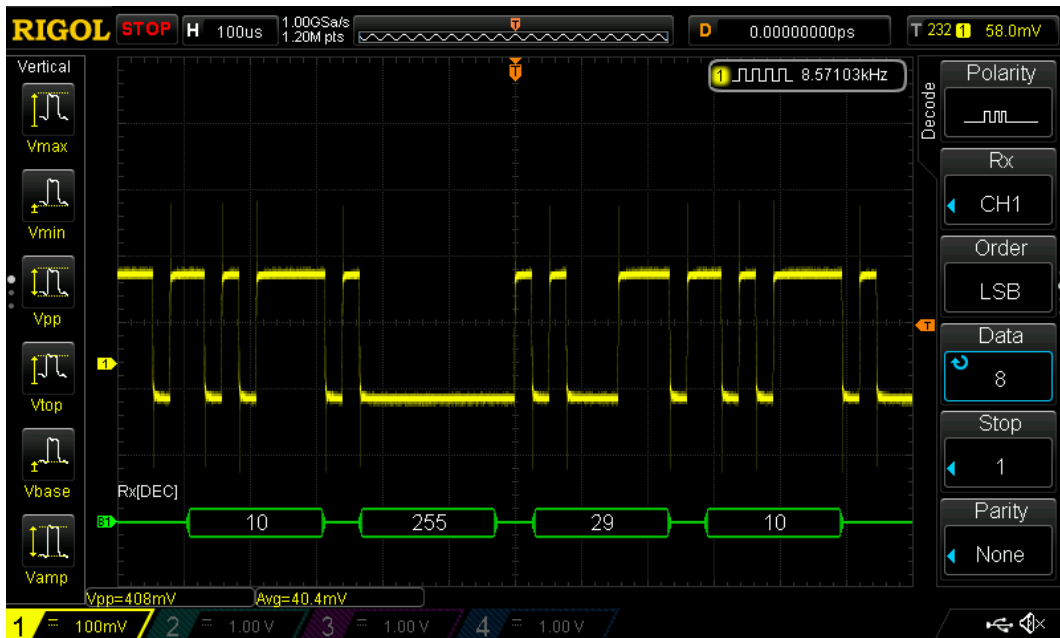


6.4. ábra. Vevőáramkör mérési elrendezés

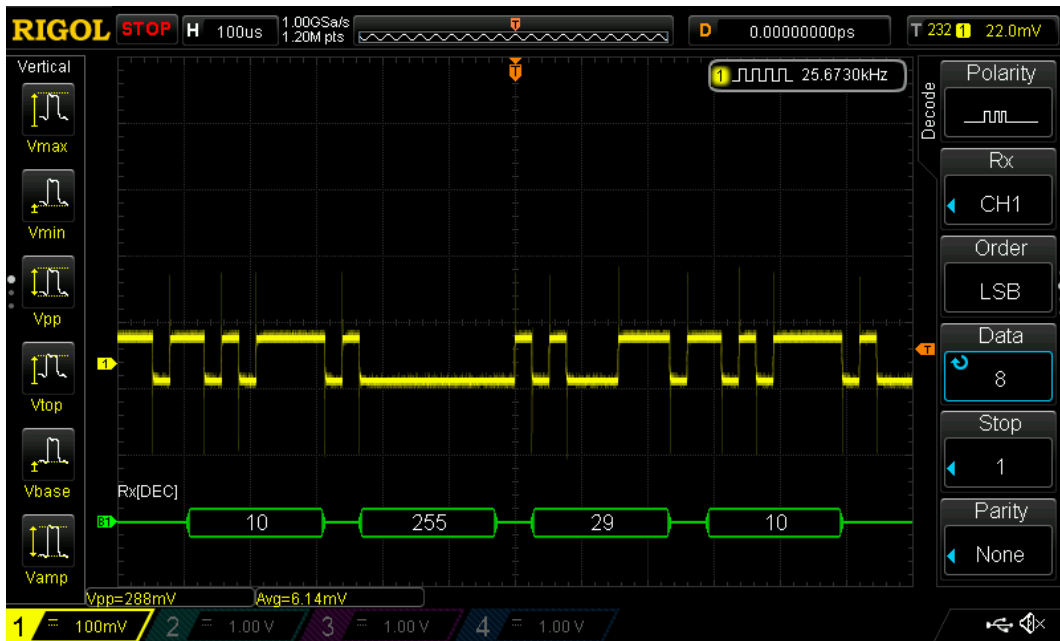
az adó által kisugárzott fényt, akkor az volt a tapasztalat, hogy küldött bitsorozatnak megfelelő tendencia megjelent ugyan, de rászuperponálódott az imént említett szinuszos jel. Első módosításként elhelyeztem egy-egy $10\mu\text{F}$ -os kondenzátort a TIA tápszűrősein, amelynek hatására már csak a kimenetén lévő jel alsó tartományában volt észlelhető a szinuszos jel. A szinuszos jeltől teljesen mentes működést akkor tapasztaltam amikor az erősítést $5,1\text{ k}\Omega$ -os ellenállással állítottam be, illetve a kimeneten található felüláteresztő szűrő kapacitásának helyére rövidzárat (ebben az esetben $0\ \Omega$ segítségével realizálható) ültettem. A 6.5, 6.6, 6.7, 6.8 ábrákon látható a TIA fokozat kimeneti jele azokban az esetekben, amikor az adó és vevő távolsága 5 cm, 10 cm, 20 cm, és 40 cm. Minden esetben mérőszalaggal biztosítottam a megfelelő távolságot, így centiméteres pontosságról beszélhetünk. 5 cm-es távolsághoz képest a 40 cm-es távolság esetén sokkal zajosabb jel mérhető, pontosabban a fotodiódára eső fényteljesítmény által indított áram nagyságrendje összemérhetővé válik a zajteljesítménnyel, amely minden esetben a vevő bemenetére kerül. Az oszcilloszkóp dekódolás funkciója azonban mind a 4 távolság esetén képes volt még helyesen dekódolni a küldött bitsorozatot. Az oszcilloszkópon nem lehet beállítani, hogy több UART csomag érkezése esetén melyik legyen a trigger esemény, csak azt, hogy ha érkezik egy csomag, akkor a trigger esemény annak start bitje, stopbitje, vagy maga az adat legyen. Ennélfogva látható az ábrákon a stop felirat, így tudtam elérni mindig azonos kezdeti dekódolt értéket.



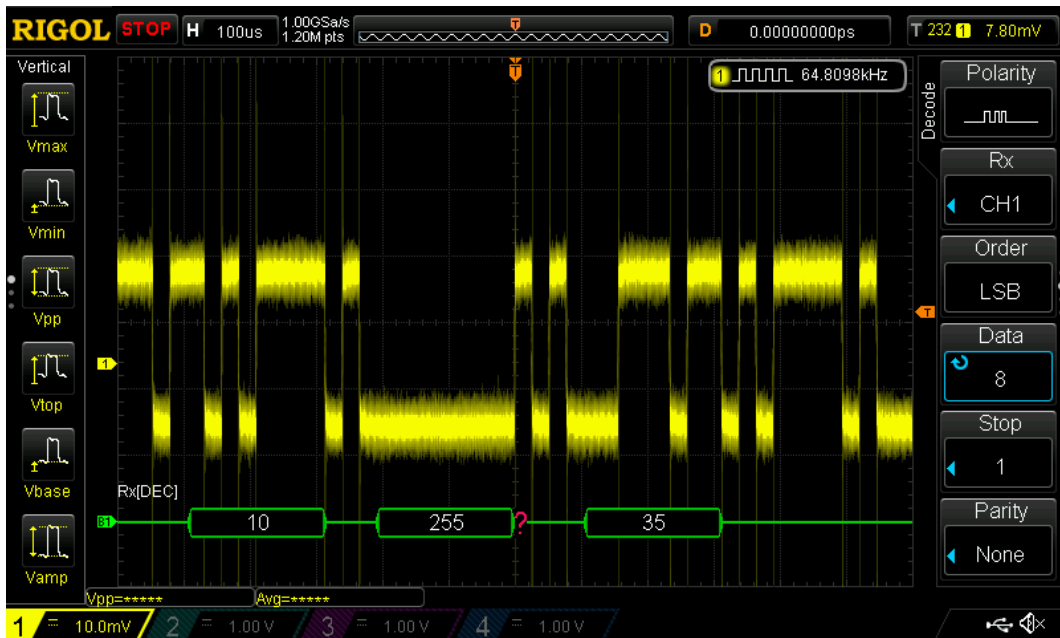
6.5. ábra. TIA fokozat kimeneti jel 5 cm



6.6. ábra. TIA fokozat kimeneti jel 10 cm



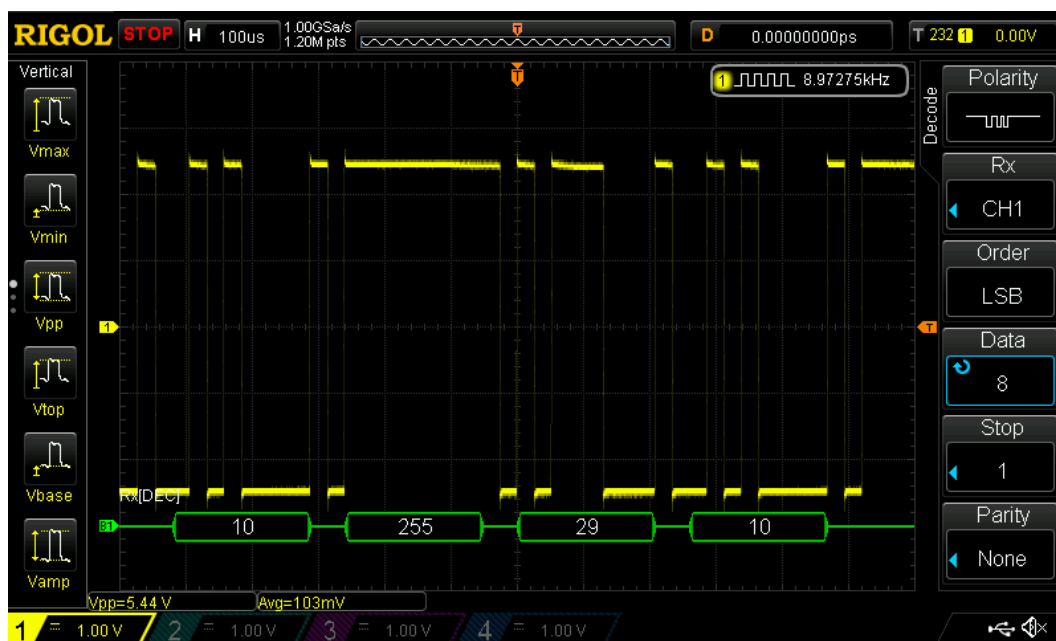
6.7. ábra. TIA fokozat kimeneti jel 20 cm



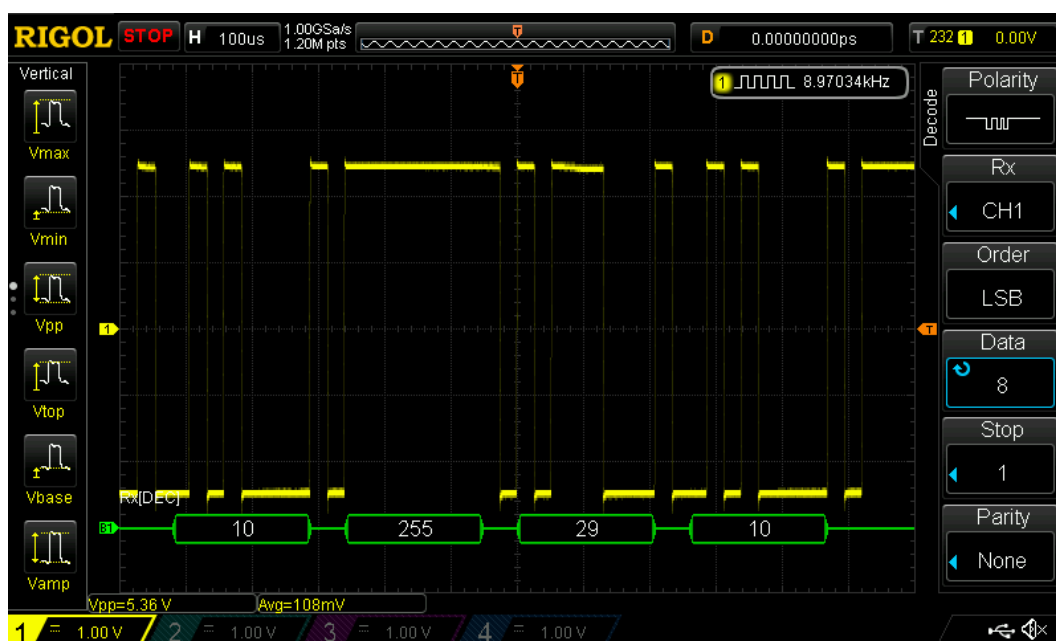
6.8. ábra. TIA fokozat kimeneti jel 40 cm

Invertáló fokozat kimenet

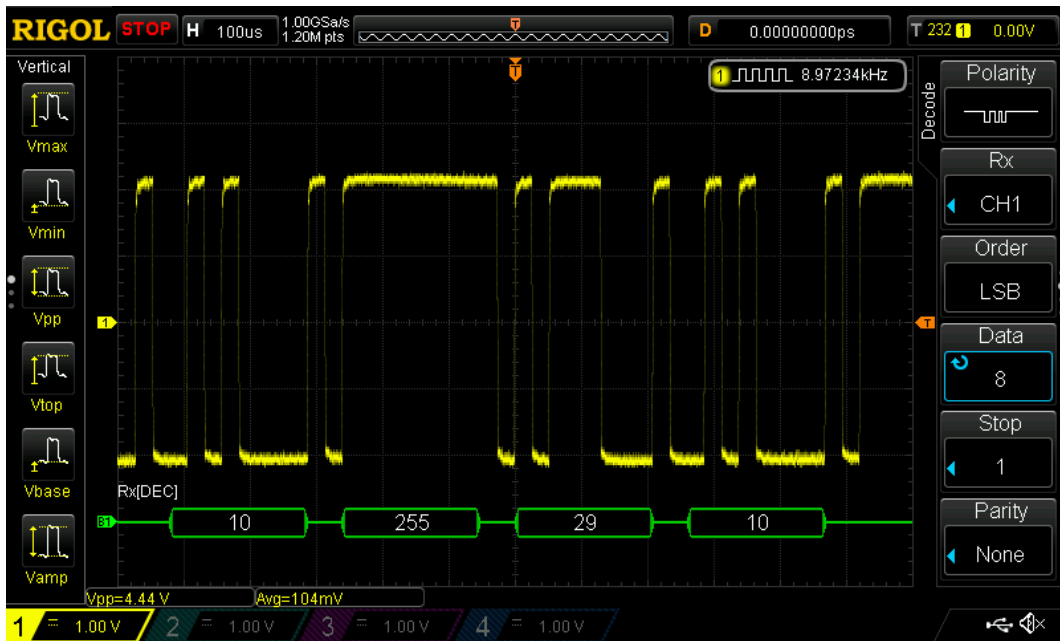
A 6.9, 6.10, 6.11, 6.12 ábrákon látható az invertáló erősítő fokozat kimeneti jele azokban az esetekben, amikor az adó és vevő távolsága 5 cm, 10 cm, 20 cm, és 40 cm. Jól láthatóan csak 20 cm-es, és 40 cm-es távolság esetén nem került túlvezérelt állapotba az invertáló fokozat műveleti erősítője. A dekódolás ebben a 4 esetben is hibátlanul megtörtént, a 40 cm-es távolság esetén viszont észrevehető volt egy kb. másodperces gyakoriságú zavarjel, amely ráült a bitsorozatra. Ennek oka a mérések során nem derült ki.. Ezeknél a méréseknél a dekódolás polaritását (ábrákon jobb felső sarokban: Polarity) meg kellett fordítani az invertáló tulajdonság miatt.



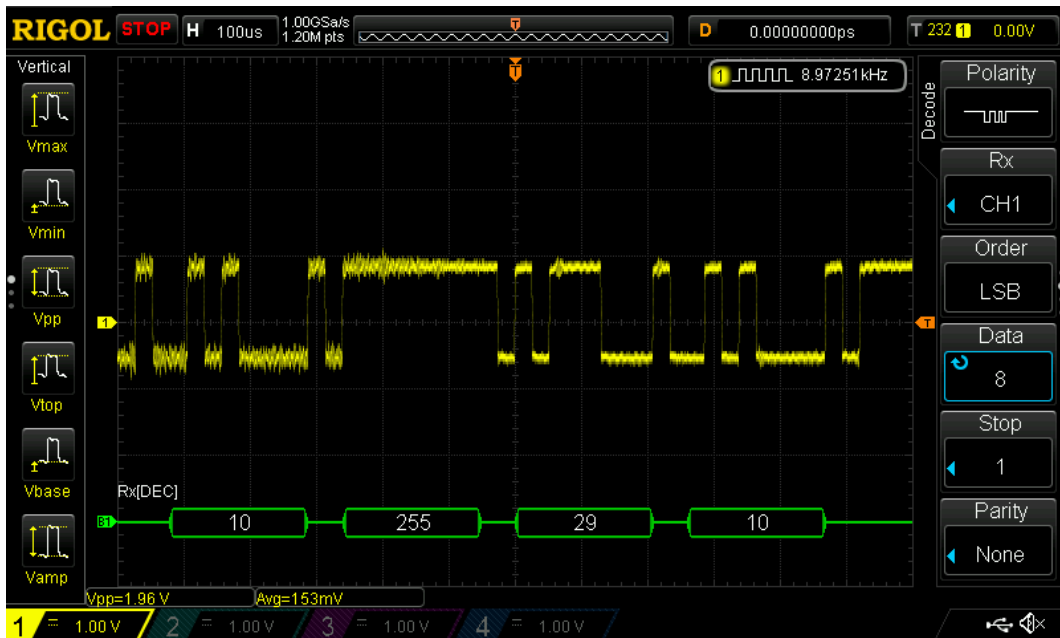
6.9. ábra. Invertáló erősítő fokozati kimeneti jel 5 cm



6.10. ábra. Invertáló erősítő fokozati kimeneti jel 10 cm



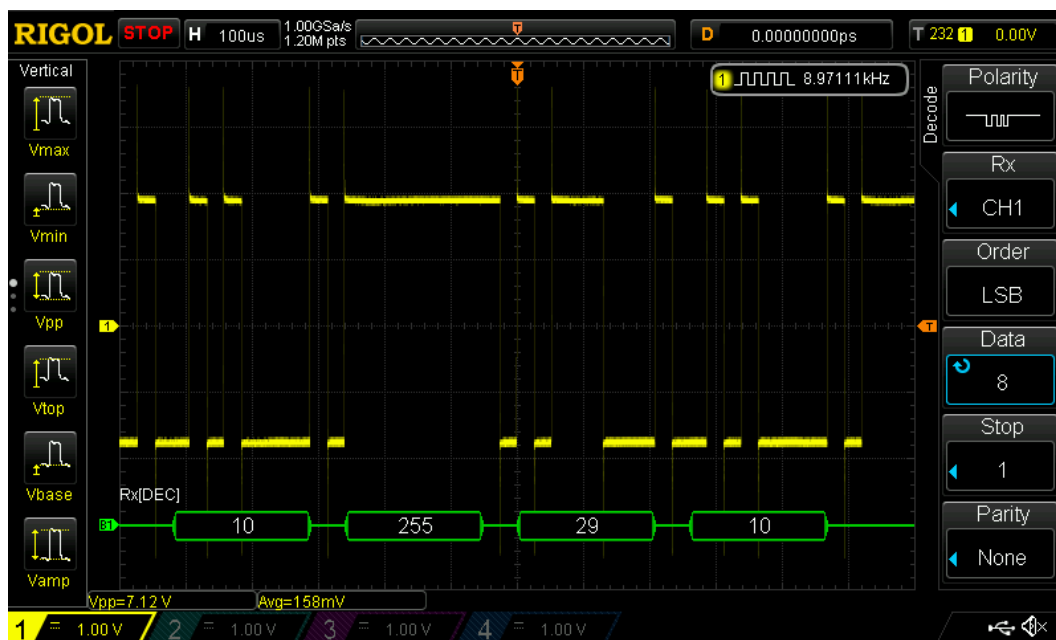
6.11. ábra. Invertáló erősítő fokozati kimeneti jel 20 cm



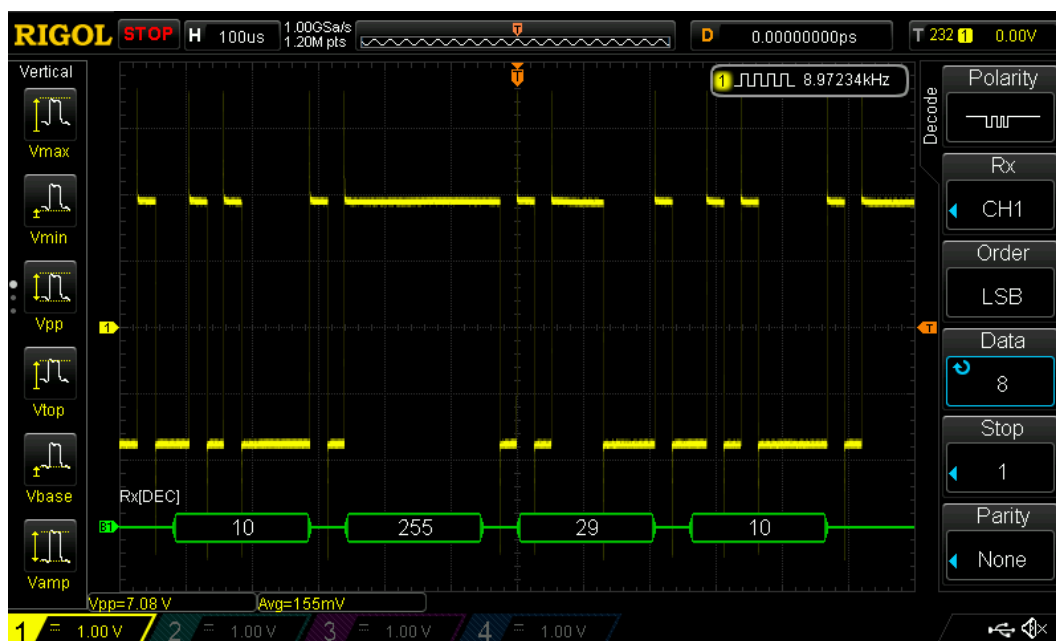
6.12. ábra. Invertáló erősítő fokozati kimeneti jel 40 cm

Neminvertáló fokozat kimenet

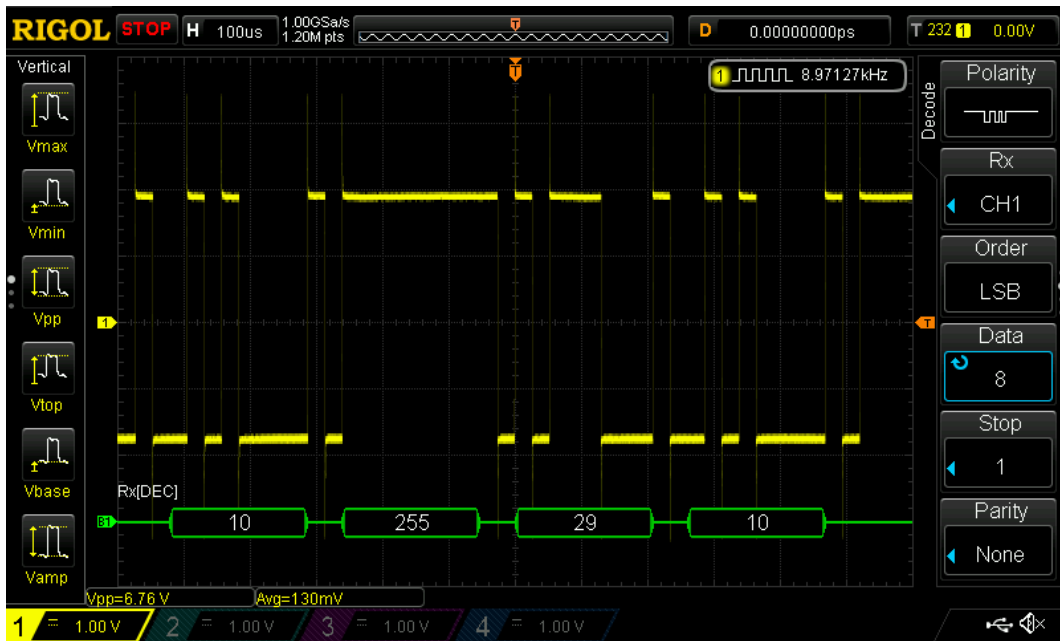
A 6.13, 6.14, 6.15, 6.16 ábrákon látható a neminvertáló erősítő fokozat kimeneti jele azokban az esetekben, amikor az adó és vevő távolsága 5 cm, 10 cm, 20 cm, és 40 cm. Átvitel szempontjából kielégítő jelalakok láthatók, ezért az utolsó erősítő fokozat kimenetén mérhető jelalakokat (a 3. fokozat kimenetén mérhető jelalakokkal való nagy hasonlóságuk okán) nem ismertetem. Ehelyett a következő lépésben a komparátor kimeneti jelalakjait mutatom be.



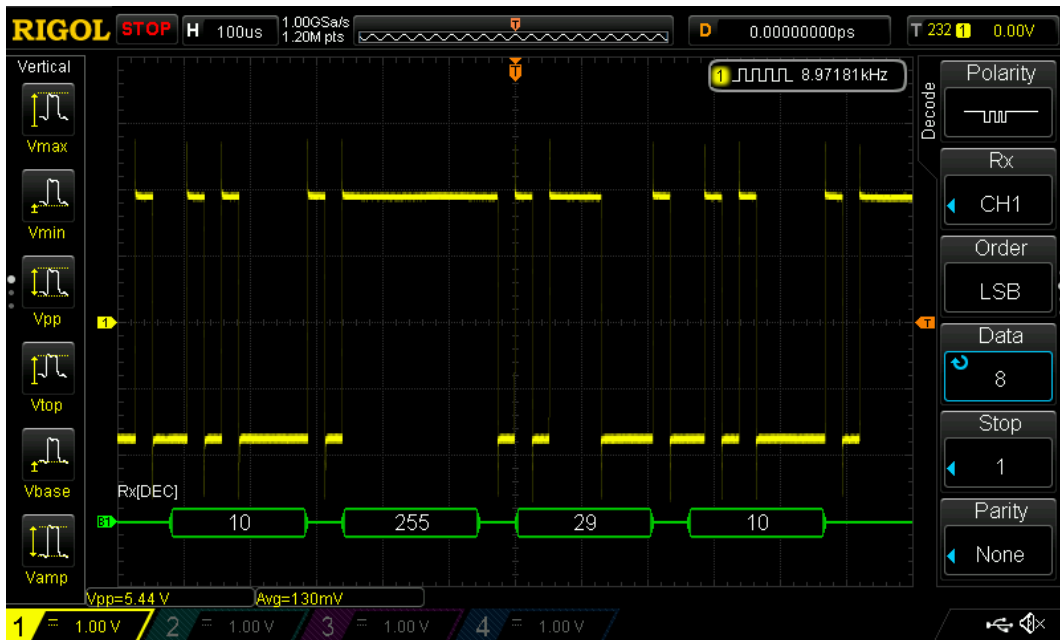
6.13. ábra. Neminvertáló erősítő fokozat kimeneti jel 5 cm



6.14. ábra. Neminvertáló erősítő fokozat kimeneti jel 10 cm



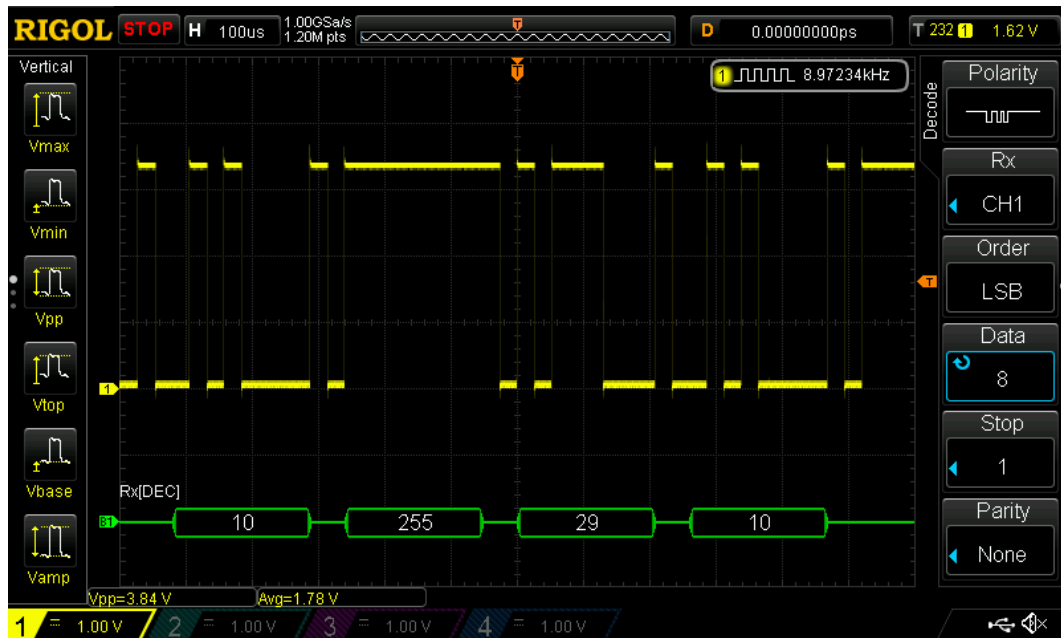
6.15. ábra. Neminvertáló erősítő fokozat kimeneti jel 20 cm



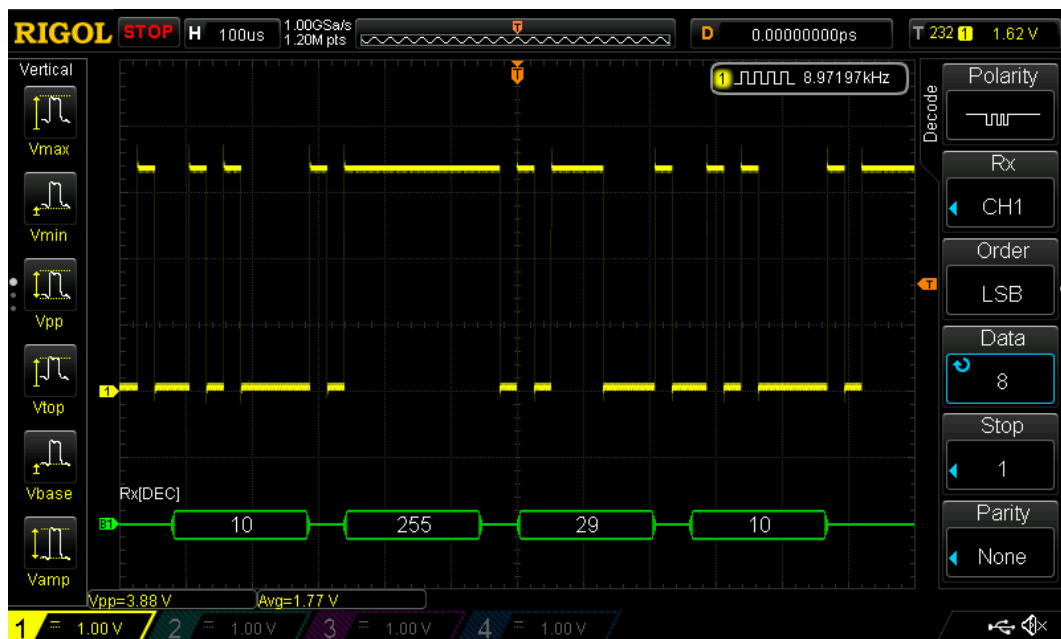
6.16. ábra. Neminvertáló erősítő fokozat kimeneti jel 40 cm

Komparátor kimenet

A 6.17, és 6.18 ábrákon látható a komparátor kimeneti jele azokban az esetekben, amikor az adó és vevő távolsága 5 cm, és 50 cm. Utóbbira azért került sor, hogy kiderüljön a hatótávolság. A tapasztalat azt mutatta, hogy kb. 50 cm az a távolság ahol még nem dekódol rossz értéket az oszcilloszkóp, és stabilan ugyanazok az értékek jelennek meg, amelyeket az adó küldött.



6.17. ábra. Komparátor kimeneti jel 5 cm



6.18. ábra. Komparátor kimeneti jel 50 cm

7. fejezet

Összefoglalás

7.1. Kommunikációs platform értékelése

A mérések alatt bizonyítást nyert mind az adóáramkör, mind a vevőáramkör működése. Mechanikai felépítést tekintve stabil áramkörrögztetés, jó minőségű (nem kontakthibás) csatlakozások jellemzik a konstrukciót. Az adó sikeresen leméri a távolságokat, és UART csomagként el tudja küldeni VLC-t felhasználva. A vevő kis távolságok esetén képes az OOK modulált fény által hordozott bitsorozat vételére, amelyet továbbít a vezérlő áramkörnek. A vezérlő áramkörben futó program ez alapján megvalósít egy PID szabályzást, amelynek köszönhetően a vételi képességgel felszerelt modellautó a DC motorokat úgy hatja meg, hogy egy előre definiált (10 cm) távolság jöjjön létre a hátul haladó modellautótól.

7.2. Fejlesztési javaslatok

A beszámoló egyes részein már említettem, de felsorolás szerűen megismétlem a javaslataim:

- Karosszérián kétállású kapcsoló elhelyezése, amely a vevő áramkör RX kimenetének kapcsolatát az adó áramkörrel megszakítja.
- Kétállású kapcsoló kialakítása, amely a vevő áramkör tápellátását szakítja meg.
- Nyomtatott áramköri tervben egyszerűsítő módosítások.
- DC motor helyett léptetőmotor alkalmazása.
- Vevőáramkör strukturális felépítésének megváltoztatása (főleg zavarjelterjedés szempontjából).
- Vevőáramkörben hatékonyabb, alaposabb tápszűrési megoldások.
- Más típusú, mechanikailag szintén megbízható, de kisebb méretű csatlakozót találni, amely alkalmas a jelenlegi csatlakozók helyettesítésére.

7.3. Távlati tervek

Ezen platform továbbfejlesztése a kiindulási pont. Adaptív erősítésszabályozás a vevő áramkörben, másik fotodióda tesztelése, PID szabályzás finomítása. A témát tovább szeretném vinni szakdolgozat készítéshez, illetve opcionálisan akár MSc képzésen is további önálló laboratórium alapjául szolgálhat.

Irodalomjegyzék

- [1] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7647/aaf74a#jpphotonaaf74as6>
- [2] <https://jwcn-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-1499-2013-37>
- [3] <https://e2e.ti.com/support/archive/launchyourdesign/m/msp430microcontrollerprojects/665142>
- [4] M. Akanegawa; Y. Tanaka; M. Nakagawa: Basic study on traffic information system using LED traffic lights. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 2. évf. (2001. Dec) 4. sz., 197-203. p. ISSN 1524-9050.
- [5] K. Siddiqi; A. D. Raza; S. Sheikh Muhammad: Visible light communication for V2V intelligent transport system. *2016 International Conference on Broadband Communications for Next Generation Networks and Multimedia Applications (CoBCom)* Graz, Ausztria, (2016. Szept 14-16)
- [6] <http://www.ti.com/tool/TINA-TI?keyMatch=TINA&tisearch=Search-EN-everything&usecase=part-number>

Ábrák jegyzéke

1.1. OOK moduláció szemléltetése [3]	6
1.2. VLC adó blokkvázlata	7
1.3. VLC vevő blokkvázlata	7
2.1. Modellautó oldalnézet	9
2.2. Modellautó felülnézet	10
2.3. Modellautó előlnézet	10
2.4. Modellautó hátulnézet	11
2.5. Modellautó alulnézet	11
2.6. Modellautó első felbontás	12
2.7. Modellautó kiinduló karosszéria	13
2.8. Modellautó LED fényforrás	14
2.9. Modellautó kiinduló alváz	15
3.1. VLC vevő kapcsolási rajza TINA programban	19
3.2. VLC vevő Bode diagram	20
3.3. VLC vevő Bode diagram kiegészítés	21
3.4. VLC adó és vezérlő kapcsolási rajza	22
3.5. VLC adó és vezérlő kapcsolási rajza kiegészítés	23
3.6. Tápellátás blokkvázlat	24
3.7. VLC adó és vezérlő tápellátás kapcsolási rajz	25
3.8. VLC vevő tápellátás kapcsolási rajz	25
3.9. TIA kapcsolási rajz	26
3.10. Invertáló fokozat kapcsolási rajz	26
3.11. Neminvertáló fokozat kapcsolási rajz	27
3.12. Neminvertáló fokozat kapcsolási rajz	27
3.13. Komparátor kapcsolási rajza	27
3.14. VLC vevő nyomtatott áramköri terv front oldal	29
3.15. VLC vevő nyomtatott áramköri terv bottom oldal	30
3.16. VLC adó nyomtatott áramköri terv front oldal	31
3.17. VLC adó nyomtatott áramköri terv bottom oldal	32
3.18. LED tartó nyomtatott áramköri terv front oldal	33
3.19. LED tartó nyomtatott áramköri terv bottom oldal	33
3.20. Fotodióda tartó nyomtatott áramköri terv front oldal	33
3.21. Fotodióda tartó nyomtatott áramköri terv bottom oldal	33
3.22. Teljes rendszer blokkvázlata	34
4.1. Megépült VLC vevő áramkör front oldal	36
4.2. Megépült VLC vevő áramkör bottom oldal	37
4.3. Megépült VLC adó és vezérlő áramkör front oldal	38
4.4. Megépült VLC adó és vezérlő áramkör bottom oldal	39

4.5. Elkészült mechanikai konstrukció	40
5.1. Adóoldali program blokkvázlat	42
5.2. Vevőoldali program blokkvázlat	43
6.1. Adó és vezérlő áramkör mérési elrendezés	45
6.2. Arduino NANO TX lábán mért jelalak	46
6.3. Adó áramkör mérési elrendezés	47
6.4. Vevőáramkör mérési elrendezés	49
6.5. TIA fokozat kimeneti jel 5 cm	50
6.6. TIA fokozat kimeneti jel 10 cm	50
6.7. TIA fokozat kimeneti jel 20 cm	51
6.8. TIA fokozat kimeneti jel 40 cm	51
6.9. Invertáló erősítő fokozati kimeneti jel 5 cm	52
6.10. Invertáló erősítő fokozati kimeneti jel 10 cm	52
6.11. Invertáló erősítő fokozati kimeneti jel 20 cm	53
6.12. Invertáló erősítő fokozati kimeneti jel 40 cm	53
6.13. Neminvertáló erősítő fokozat kimeneti jel 5 cm	54
6.14. Neminvertáló erősítő fokozat kimeneti jel 10 cm	54
6.15. Neminvertáló erősítő fokozat kimeneti jel 20 cm	55
6.16. Neminvertáló erősítő fokozat kimeneti jel 40 cm	55
6.17. Komparátor kimeneti jel 5 cm	56
6.18. Komparátor kimeneti jel 50 cm	56

Táblázatok jegyzéke

6.1. Adó és vezérlő áramkör DC feszültségei és áramai	45
6.2. Vevő áramkör DC feszültségei	48

A. függelék

Függelék

A.1. Vevő tesztelésére szánt programkód

```
int infoArray[3]= {10,255,29};
void setup()
{
  Serial.begin(38400);
}
void loop()
{
  for (int i = 0; i < 3; i = i + 1)
  {
    Serial.write(infoArray[i]);
  }
}
```


A.2. Adó programkód

```
#include "Adafruit_VL53L0X.h"
Adafruit_VL53L0X lox = Adafruit_VL53L0X();
#define analpin0 A0
#define analpin1 A1
#define analpin2 A2
#define analpin3 A3
#define analpin4 A4
#define analpin5 A5
#define analpin6 A6
#define analpin7 A7
#define digitpin0 0
#define digitpin1 1
#define digitpin2 2
#define digitpin3 3
#define digitpin4 4
#define digitpin5 5
#define digitpin6 6
#define digitpin7 7
#define digitpin8 8
#define digitpin9 9
#define digitpin10 10
#define digitpin11 11
#define digitpin12 12
#define digitpin13 13
unsigned int distance;

void setup()
{
  Serial.begin(38400);
  if (!lox.begin()) {
    Serial.println(F("Failed to boot VL53L0X"));
    while(1);
  }
  pinMode(analpin0, INPUT);
  pinMode(digitpin8, OUTPUT);
  digitalWrite(digitpin8, HIGH);
  pinMode(digitpin9, OUTPUT);
  pinMode(digitpin10, OUTPUT);
}

void loop()
{
  VL53L0X_RangingMeasurementData_t measure;
  lox.rangingTest(&measure, false);
  distance=measure.RangeMilliMeter;
  distance=distance/10;
  Serial.write(distance);
}
```

A.3. Vevő programkód

```
#include <PIDController.h>
PIDController pid;
#define analpin0 A0
#define analpin1 A1
#define analpin2 A2
#define analpin3 A3
#define analpin4 A4
#define analpin5 A5
#define analpin6 A6
#define analpin7 A7
#define digitpin0 0
#define digitpin1 1
#define digitpin2 2
#define digitpin3 3
#define digitpin4 4
#define digitpin5 5
#define digitpin6 6
#define digitpin7 7
#define digitpin8 8
#define digitpin9 9
#define digitpin10 10
#define digitpin11 11
#define digitpin12 12
#define digitpin13 13
int distance = 10;
int pwm;
void setup()
{
  Serial.begin(38400);
  pinMode(analpin0, INPUT);
  pinMode(digitpin8, OUTPUT);
  pinMode(digitpin9, OUTPUT);
  pinMode(digitpin10, OUTPUT);
  pid.begin();
  pid.setpoint(10);
  pid.tune(10, 10, 10);
  pid.limit(-255, 255);
  digitalWrite(digitpin8, HIGH);
}

void loop()
{
  if (Serial.available())
  {
    distance = Serial.read();
  }
  int output = pid.compute(distance);
```

```
Serial.println(output);
pwm=abs(output);
if(distance<10)
{
digitalWrite(digitpin10, LOW);
analogWrite(digitpin9, pwm);
}
else
{
digitalWrite(digitpin9, LOW);
analogWrite(digitpin10, pwm);
}
}
```