



SZAKDOLGOZAT-FELADAT

Ferenczy Márton (A5ZF6I)
szigorló villamosmérnök hallgató részére

Automatizált teszteszköz BLDC motorvezérlőhöz

A modern gépjárművek biztonságtechnikai és kényelmi funkcióinak megvalósításában, környezetvédelmi jellemzőinek javításában egyre jelentősebb szerepet kapnak a számítástechnikai megoldások. Ma egy prémium személyautó gyártójának közel száz elektronikus vezérlőegységből (ECU) és számos fedélzeti kommunikációs sínből kell kialakítani egy megbízhatóan működő elosztott rendszert, amely komoly algoritmus- és kommunikációtervezési, illetve munkaszervezési kihívást jelent.

Az egyre komplexebb szoftver megoldások megjelenése miatt a szisztematikus, több szintű tesztelés is nagyobb szerepet kap. A szoftvertesztelés egyik fontos lépése a PIL (processor-in-the-loop) tesztelés, ahol a szoftver először fut a cél processzoron, és először használja annak valós perifériáit. Az egyes vezérlőeszközökben a beágyazott processzorok a leggyakrabban *mikrovezeztelők*, azaz integráltan tartalmazzák végrehajtó egységet, memóriákat, és különböző perifériákat. Emiatt a PIL környezetnek képesnek kell lennie a perifériák által használt külső jelek (pl. analóg jelek, kommunikációs buszok) szimulálására, és az előállított jelek (pl. impulzus-szélesség modulált jelek) megfigyelésére is.

Jelen feladat célja egy, a cégünkönél használt 16 bites beágyazott mikrovezérlőhöz a megfelelő PIL teszt eszköz elkészítése. A hallgató feladata magában foglalja az alábbiakat:

- A mikrokontroller megismerése
- A tesztkörnyezet követelményeinek tisztázása, blokkvázlatának elkészítése
- A szükséges hardver megtervezése (tesztkártya)
- A hardver összeszerelésében való részvétel, az élesztés elvégzése
- Az elkészült környezet funkcionális tesztelése

A feladat megvalósításához szükséges eszközöket a ThyssenKrupp Presta Hungary Kft. biztosítja.

Tanszéki konzulens: Dr. Sujbert László, docens

Külső konzulens: Dr. Balogh András (ThyssenKrupp Presta Hungary Kft.)

Budapest, 2015. október 6.

.....
Dr. Jobbágy Ákos
tanszékvezető



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Ferenczy Márton

Automatizált teszteszköz BLDC motorvezérlőhöz

KONZULENS

Dr. Sujbert László

KÜLSŐ KONZULENS

Dr. Balogh András

BUDAPEST, 2015

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	6
Abstract	7
1 Bevezető	8
2 Rendszerterv	9
2.1 Főbb követelmények.....	11
2.1.1 Funkcionális követelmények	11
2.1.2 Nem funkcionális követelmények	12
2.2 Blokkvázlat és magas szintű architektúra	14
3 A kapcsolás elemei	16
3.1 Intelligens GDU	16
3.2 TI mikrokontroller és kiegészítői.....	19
3.3 Digitális-analóg átalakító	24
3.4 Szintillesztő áramkör	26
3.5 UART kommunikáció.....	27
3.6 Fázis komparátorok.....	30
3.7 Táp áramkör	32
3.7.1 Bemenet	32
3.7.2 Feszültség stabilizátor.....	32
3.7.3 DC-DC átalakító	32
3.8 Teljesítmény elektronika.....	36
3.8.1 Teljesítmény ellenállások	36
3.8.2 Teljesítmény MOSFET-ek.....	37
3.8.1 Puffer kondenzátor.....	39
3.8.2 Védelmek	40
4 Nyomtatott áramkör	41
4.1 Rétegek	41
4.2 Tervezési irányelvek	42
4.3 Háromdimenziós modell.....	45
5 Az eszköz élesztése	48
6 Konklúzió és kitekintés	52

Irodalomjegyzék.....	53
Ábrajegyzék.....	55
Függelék.....	56

HALLGATÓI NYILATKOZAT

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

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

Kelt: Budapest, 2015. 12. 11.

.....
Ferenczy Márton

Összefoglaló

A dolgozat témája a modern autóipar egyik fontos fejlesztési módszeréhez kapcsolódik. Az autóiparban egyre nagyobb teret nyernek a fejlett elektronikai eszközök és vezérlések, ezért nagyon fontos, hogy ezen komplex rendszerek fejlesztésénél, megfelelő tesztkörnyezet álljon rendelkezésre. Mivel egyre gyorsabban kell új termékeket kifejleszteni, lényeges szempont, hogy a) amíg az új hardver elkészül, annak bizonyos moduljaira már a szoftverfejlesztés is elkezdődhessen, és b) az egyes rendszerkomponenseket izoláltan, a többi elemtől függetlenül is lehessen tesztelni. Erre a célra alkalmasak az úgynevezett „hardware-in-the-loop” rendszerek, amelyek lényege, hogy egy vezérlő vagy annak egy része köré egy hardveresen szimulált környezetet építsünk fel, és így az adott eszköz úgy működhet, mintha már be lenne építve a későbbi rendeltetési helyére.

A feladatom az volt, hogy egy BLDC motor teljes körű vezérlésére alkalmas speciális kontroller számára megtervezek és elkészítsek egy ilyen tesztkörnyezetet. Ez magában foglalja a megfelelő hardverelemek kiválasztását és az azok közötti kapcsolatok, megtervezését és kialakítását.

A dolgozatban egy ilyen tesztrendszer tervezési lépéseit mutatom be a kiindulási feltételektől kezdve egészen az elkészített, működő hardver funkcionális teszteléséig. Első lépésként készítettem egy logikai rendszertervet és meghatároztam a rendszerrel szemben támasztott funkcionális és nem funkcionális feltételeket. Elkészítettem a rendszer blokkvázlatát, majd megkerestem a megvalósításhoz leginkább alkalmas hardver elemeket. Elkészítettem az alkatrészek kapcsolásba helyezéséhez szükséges alkatrészkönyvtárat, majd a kapcsolási rajzot. Ezt követően a meghatározott fizikai feltételek és a kapcsolási rajz alapján elkészítettem a nyomtatott áramkör tervét. A panel legyártását követően, folyamatos tesztelési lépések közbeiktatásával beültettem a panelra az alkatrészeket. Végül elvégeztem a rendszer funkcionális tesztelését.

A tesztrendszert hibátlan működés esetén a későbbiekben valódi ipari tesztelési célokra használják majd fel.

Abstract

The subject of this thesis is one of the important test methods of modern automotive industry. In this domain, the electronic devices and controls have more and more importance. Therefore, when a new, complex system is developed, it is important to have an appropriate test system. Given the need to develop new products faster and faster, it is crucial that a) while the new hardware is still in development the development of the software for it can be started, and b) there is a possibility to independently test the subsystems. For this kind of testing one widely used method is the hardware-in-the-loop testing. The essence of these systems is that we can build a hardware simulated environment to test our controller as if it was embedded in its final place.

My task was to develop a novel test system for a special controller, which is fully suitable for controlling a BLDC motor. This includes the selection of the needed hardware elements and the development of the connections between them.

In this thesis I present the steps of the development process of a hardware-in-the-loop system from the initial conditions to the functioning hardware and its basic testing. At first, I created a logic system plan with the functional and non-functional conditions. I made the block diagram of the system and selected the most suitable hardware elements. Then I created the necessary libraries for the components and drew the schematic diagram. Then I made the PCB design based on the schematic diagram and the specified physical conditions. After the panel has been manufactured, with continuous insertion of test steps, I set the parts on the panel. Finally, I performed the basic testing of the system.

When the system will have been fully functional it will be used for real industrial testing.

1 Bevezető

Manapság az autóiiparban egyre több, korábban valamilyen más elven működő eszközt váltanak ki fejlett elektronikai eszközökkel. Ezek az eszközök általában valamilyen kényelmi vagy helytakarékoság és súlycsökkentés szempontjából előnyös fejlesztést jelentenek miközben általában az energiafogyasztás is csökken a beépítésükkel. Ennek a fejlődési iránynak köszönhetően sokkal több elektronika kerül egy mai autóba, mint tíz évvel ezelőtt. Az elektronika pedig általában gyorsan fejlődik, aminek köszönhetően egy új autóba beépített eszköz sokkal hamarabb válik elavulttá, mint régebben az aktuális eszköz mechanikus megfelelője. Ennek köszönhetően a fejlesztési ciklusokat a gyártók igyekeznek a korábbi 6 év körüli időtartamról akár a harmadára lecsökkenteni.

Ahhoz, hogy emellett megmaradjon a hatékony ellenőrzés és minősítés, nagyon fontos, hogy olyan automatizált tesztrendszereket fejlesszenek ki, amelyekkel már azelőtt el lehet kezdeni bizonyos modulok tesztelését mielőtt a végleges eszköz prototípusa elkészülne.

Ezen szakdolgozat témája egy ilyen automatizált tesztrendszerhez tartozó testkártya tervezési lépéseinek bemutatása a követelmények meghatározásától egészen a kész hardver elkészítéséig és funkcionális teszteléséig.

2 Rendszerterv

A tesztrendszer egy „hardver/processzor in the loop” elvű szimulációt kell, hogy megvalósítson. A módszer lényege, hogy a működéshez szükséges szoftverek fejlesztése akár a hardver elkészülése előtt elkezdődhessen. Az elnevezés abból adódik, hogy a vezérlőt, amely majd a kész eszközre kerül, egy hardveresen szimulált környezetbe helyezzük. Ennek a környezetnek a bonyolultsága nagyon változó lehet. Előfordul, hogy egy bonyolultabb vezérlőegység esetében egy egész autót szimuláló rendszerbe kötik be az új eszközt. A mi esetünkben csak egy vezérlőegység részegységéhez kellett megteremteni a szimulációs környezetet. Ebben az esetben a tesztrendszer lényegesen kisebb méretben és alacsonyabb költségen előállítható. Ilyenkor általában valamilyen szabványméretű panelen valósítják meg a szimulációs környezetet, amelyből egy kisebb sorozatot gyártanak le, hogy több fejlesztő egyszerre tudjon dolgozni a vezérléshez szükséges különálló modulokon.

Beágyazott rendszerek esetében ez egyre elterjedtebb technológia, amelynek számos előnye van, de természetesen szem előtt kell tartani, hogy ez a tesztelési forma nem helyettesíti a valós eszközön elvégzett tesztekét, csak előkészíti azokat.

Esetemben a tesztrendszer egy intelligens GDU köré épült, amely kifejezetten háromfázisú, állandó mágneses motorok meghajtására és vezérlésére fejlesztettek ki főként autóiipari alkalmazásokhoz. Itt rögtön tisztáznék két fogalmat. Az egyik a GDU (Gate Driver Unit) vagyis a motort meghajtó MOSFET-ek vezérlésére szolgáló eszköz. Normális esetben ahhoz, hogy egy FET-et be- vagy kikapcsoljunk, nem feltétlenül lenne szükség valamilyen kiegészítő áramkörre, de mivel itt 16-20 kHz körüli frekvenciájú PWM jelekkel dolgozunk, a kapcsolásoknak nagyon gyorsan kell végbemenniük, a lehető legnagyobb meredekséggel. Ehhez arra van szükség, hogy a Gate-ekbe 200nC körüli töltést juttassunk be körülbelül 20-50 ns alatt. Ilyenkor – ugyan nagyon rövid időre – akár 2 A nagyságú áram is folyhat a gate-eken, amit egy hagyományos mikrokontroller nem lenne képes kezelni. Ilyenkor a kontroller PWM jeleit egy Gate meghajtó áramkörre kapcsolják, és az szolgáltatja a szükséges áramot mind a bekapcsoláskor mind pedig a kikapcsoláskor.

Az eszközt azért nevezhetjük intelligensnek, mert, tulajdonképpen egy mikrokontrollerbe integrált GDU-ról van szó, azaz minimális kiegészítő áramkörökkel,

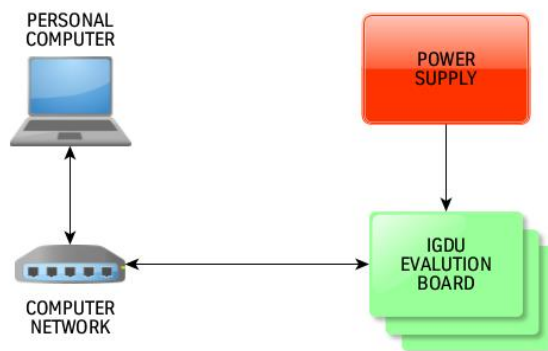
önállóan tud vezérelni, és meghajtani egy BLDC motort vagy más hasonló vezérléssel rendelkező eszközt.

A tesztrendszer lényege az, hogy a megfelelő szoftvermodulokat lehessen futtatni az intelligens GDU-n, anélkül hogy a teljes ECU-t (Electronic Control Unit) kellene ehhez használni. Ezt úgy oldottam meg, hogy a motort három, csillag elrendezésbe kapcsolt teljesítmény ellenállással helyettesítettem. Mivel ezeken nem tapasztalhatók egy motor tekercselésében fellépő induktív hatások, és a rajtuk folyó áram csak az előre meghatározott ellenállásértéktől és a FET-ek állapotától függ, ezért nincs mit szabályozni.

Normális esetben egy motor a terheléssel, illetve az aktuális nyomatékkal arányos áramot vesz fel, amit söntellenállások segítségével az analóg bemenetekre visszavezetve mérni tudunk, és így a szituációnak megfelelően szabályozhatjuk a fordulatszámot/nyomatékot.

Ezen a ponton válik szükségessé egy másik mikrokontroller, ami a fázisok aktuális állapota alapján egy valódi motorkarakterisztikához tartozó áramjeleket és az ezeknek megfelelő tengelyszöghöz tartozó szimulált jeleket adja vissza egy digitális analóg átalakítón keresztül. Ezen felül az intelligens GDU egyéb ki- és bemenetéhez tartozó eszközöket is szimulálja, helyettesíti. Ezzel el is érkeztünk a processzor/hardver in the loop megvalósításhoz. A motor szimulációjára már vannak létező megoldások, ezek valamelyikét lehet implementálni a fejlesztés következő szakaszában. Ezek közül az egyik legelterjedtebb a MATLAB/SIMULINK alapú szimuláció. [1]

Egy ilyen tesztrendszernél fontos a távoli elérhetőség, mivel egyszerre több kártyán szimultán folyik a tesztelés. Ennek megvalósítását szematikusan illusztrálja az 1. ábra.



1. ábra. A tesztrendszer használatának szematikusan illusztrált folyamatábrája

2.1 Főbb követelmények

A hardware-in-the-loop rendszer sikeres megvalósításához meg kell fogalmaznunk a kivitelezéshez szükséges alapkövetelményeket.

2.1.1 Funkcionális követelmények

A funkcionális követelmények több csoportra oszthatók. Elsőként a tápellátás megoldását ismertetem. Itt az volt a fő cél, hogy a valós körülményekhez alkalmazkodjunk. A valós körülmények itt egy autóban elhelyezett vezérlőegység esetén a 12-14 V-os tápfeszültség, ami esetenként a 20 V-ot is elérheti. Az intelligens GDU erre van méretezve, de például a szimulációs processzor tápfeszültségének előállításáért felelő elektronika méretezésénél már figyelembe kell venni az esetleges túlfeszültséget.

Mivel a szimulációt végző controller tápfeszültsége 3.3 V, ehhez szükség volt egy külön tápegységre. Erre vonatkozó követelmény volt, hogy ne hagyományos disszipációs elven működő feszültség stabilizátor legyen, hanem egy DC-DC konverter, amelyet megfelelően méretezve sokkal alacsonyabb disszipációt érhetünk el.

További lényeges követelmények vonatkoznak a külső kommunikációra. Tekintve hogy a tesztártyák nem igénylik a fizikai beavatkozást, egy szerverteremben elhelyezett rackszekrényben helyeztük el őket. Ebben a helyzetben célszerű volt valamilyen ethernet alapú kommunikációt megvalósítani. A szimulációt végző controller esetében alapkövetelmény lett tehát, hogy legyen saját ethernet interfésze, és ne kelljen a csatlakozón és pár passzív alkatrészén kívül más kiegészítő elektronika hozzá. Követelmény volt továbbá, hogy az intelligens GDU a szimulációs processzor nélkül, akár közvetlenül is elérhető legyen. Mivel itt viszonylag kevés kommunikációs lehetőség áll rendelkezésre, egy ethernet-UART interfész [2] beépítése mellett döntöttem, amelynél további követelmény volt, hogy legyen olyan szabadon felhasználható lába, amelyet az intelligens GDU esetleges külső újraindítására fel lehet használni. Az intelligens GDU egyetlen UART perifériát tartalmaz, amire bizonyos teszteknel a szimulációs processzornak szüksége lehet, ezért további követelmény volt, hogy ez az interfész egy egyszerű jumper áthelyezéssel átköthető legyen az ethernet-UART interfész és a szimulációt végző controller között.

2.1.2 Nem funkcionális követelmények

A rackszekrényben történő elhelyezéshez szükség volt valamilyen szabványos rögzítési megoldásra. Erre a célra rendelkezésre állnak kifejezetten ilyen tesztkárttyák befogadására szolgáló, szabvány elemek (rögzítő dobozok), amelyek sokféle méretben beszerezhetők. Egy ilyen doboz látható a 2. ábrán.



2. ábra. Rögzítő doboz illusztráció

Itt meg kellett becsülni, hogy ehhez az alkalmazáshoz melyik méret elegendő. A rendelkezésre álló szabványméretek alapján a 114X165 mm-es kártyamérethez tartozó dobozt választottuk ki, és a tervezésnél ez alapján állítottuk be később a panel méretét.

Ezen rögzítési formának megfelelően a csatlakozókat és gombokat úgy kellett elhelyezni, hogy azok könnyen hozzáférhetőek maradjanak a beépítést követően is, ezért az ennek megfelelő külső, rövid oldalon (114 mm) kellett elhelyezni őket.

A megfelelő rögzítéshez és kulturált kinézethez egy előlapra is szükség lesz, aminek a helyét már a panel megtervezésekor elő kellett készíteni. Ennek megfelelően a panel sarkain megfelelő átmérőjű furatokat kellett elhelyezni, és körülöttük annyi szabad helyet kellett hagyni, hogy a rögzítő fülek elférjenek. Mivel a panel hardveres tesztelése és élesztése közben még nem árt, ha egy asztalra is kényelmesen le lehet tenni anélkül, hogy valamilyen károsodást vagy rövidzárat kockáztatnánk, a panel mind a négy sarkára kerültek furatok, hogy azokba lábakat lehessen tenni erre az időtartamra. Ezeket a lábakat a hardveres tesztelés után eltávolíthatjuk, és a két első helyére felcsavarozható az előlap.

Mivel a panelre egy tervezetnek megfelelően kivágott előlap kerül majd, az is fontos, hogy a csatlakozók úgy legyenek elhelyezve, hogy a panel szélétől olya

távolságban legyen az elülső oldaluk, hogy az előlap rögzítését követően egy síkba essenek az előlappal.

A hardveres tesztelésnél nagyon komoly előny, ha nem kell keresni a megfelelő mérési pontokat. Emiatt követelmény volt, hogy minden jelvezetékre, illetve fontos táppontra kerüljön egy tesztpont. Ezeken felül a panel több pontján lesznek egyedi szögletes footprinttel ellátott GND-re kötött pontok, hogy a mérések során minimális legyen az áramút, és így kevesebb legyen a zavaró jel. Minden tesztpontot egyedi, a funkciójára jellemző felirattal látunk el, hogy minél könnyebb legyen megtalálni a megfelelő mérési pontot. A tesztpontoknak – fizikai kialakításukat tekintve – olyan furattal rendelkező pad-nek kell lenniük, amelyekbe egy oszcilloszkóp mérőfejét bele lehet illeszteni, és akár folyamatos tartás nélkül otthagyni.

2.2 Blokkvázlat és magas szintű architektúra

A megfelelő követelmények alapján már elkészíthető volt egy előzetes terv arról, hogy az eszközön milyen elemeket kell elhelyezni, és ezek egymással hogyan kapcsolódnak össze. A két fő egységen belül további alegységeket helyeztem el, a világos és áttekinthető kapcsolatrendszer érdekében. A blokkvázlat letisztult végleges változata – amely a 3. ábrán látható – komoly segítséget jelentett a TM4C controller láb kiosztásának megtervezésénél és az alkatrészek fizikai elrendezése során is.

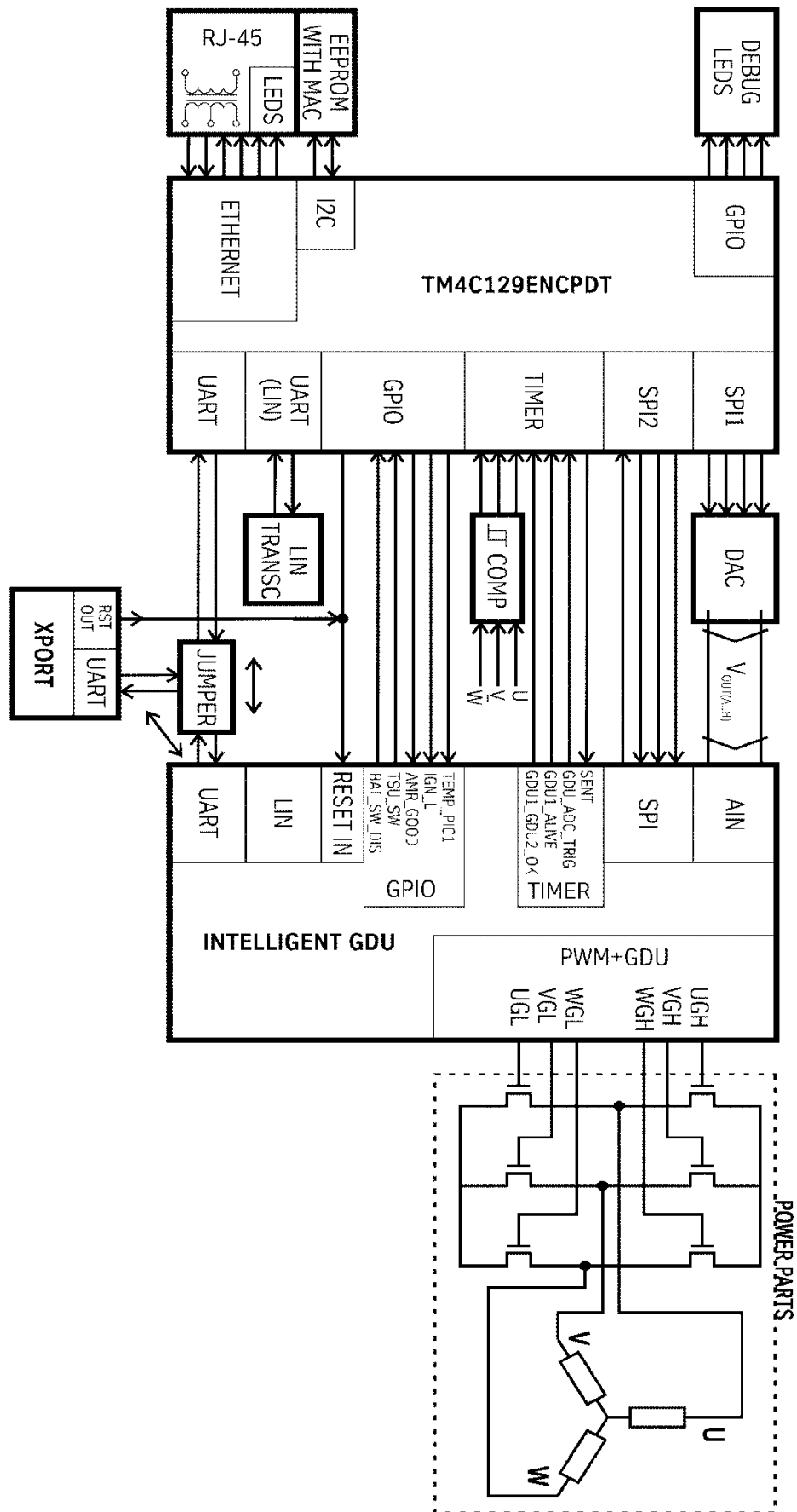
Az intelligens GDU esetében bizonyos jelek esetében a kapcsolási rajzon is szereplő elnevezések szerepelnek. Ez azért volt fontos, hogy a tervezés során tudni lehessen, hogy az aktuális jel milyen funkciót valósít meg.

Mivel egy viszonylag komplex rendszerről van szó a kapcsolási rajz elkészítése során a tervet funkcionális blokkonként több lapra osztottam. Az integritás és áttekinthetőség érdekében ezeket a lapokat egy – a blokkvázlathoz nagyon hasonló elrendezésű – blokk lapon fogtam össze, amely a függelékben található 16. ábrán látható. A különböző lapokon belül is igyekeztem minden vezetékhez egy logikus nevet rendelni, amely a layout megtervezése során is komoly előny volt. A kapcsolási rajzokon – ahol ez lehetséges volt – a könnyebb olvashatóság érdekében igyekeztem balról jobbra tartó logikai sorrendet felépíteni. Az egyszerű, passzív, lineáris komponenseken kívül minden alkatrésznél megtalálható a pontos típusmegjelölés.

A homogén, jól áttekinthető dizájn érdekében egy-két kivételtől eltekintve saját készítésű alkatrészkönyvtárakat használtam, amelyek létrehozásánál igyekeztem arra törekedni, hogy az alkatrészek illeszkedjenek egymáshoz, miközben megmaradnak a szabványos jelölések.

A footprinteket minden esetben az alkatrészek adatlapja alapján készítettem el. Először az erre alkalmas kiegészítővel, a méretek alapján generáltattam egy háromdimenziós modellt, majd ha ez szükséges volt, módosítottam a generált footprintet az adatlapban megadott ajánlás alapján.

Bonyolultabb alkatrészek esetén az alkatrész modelljét beszereztem a gyártótól, vagy letöltöttem egy erre a célra létrehozott honlapról. Bővebben erről a *Háromdimenziós modell* fejezetben írok.



3. ábra. Az eszköz blokkvázlata

3 A kapcsolás elemei

3.1 Intelligens GDU

A modern autóiipari rendszerekben egyre hangsúlyosabb a nagyintegráltságú beágyazott elektronika használata. Egy mikrovezérlő több feladatot lát el, amiből egyszerre több előny is származik. Mivel az autóiiparban milliós tételekről beszélünk, az egyik ilyen nem elhanyagolható előny, hogy bár egy sokfunkciós vezérlő nem jelentősen drágább, mint egy kevesebb beépített funkciót megvalósító alternatívája, viszont a kiegészítő áramkörökkel együtt már valószínűleg alkatrészkielégítésben megtérül a befektetés. A tervezés során további előny, hogy kevesebb alkatrészre kell dolgozni, ami gyorsítja a folyamatot, és kevesebb hibalehetőséget rejt magában.

Egy mai modern autóban körülbelül 120 villanymotor [3] található. Ezek nagy része egyszerű szénkefécs vagy léptetőmotor, de bizonyos esetekben ezek vagy nem elég jól szabályozhatók, vagy az erejük/nyomatékuk nem megfelelő. Ilyen esetben van szükség a BLDC (Brushless DC) motorokra, amelyek jól szabályozható, nagy nyomatékot képesek kiadni.

Ezekhez a motorokhoz azonban már ennek megfelelően bonyolultabb vezérlőelektronika szükséges. Ezt a feladatot, látja el az intelligens GDU, amely kifejezetten erre célra lett kifejlesztve. Ilyen vezérlő IC-ből a kiválasztott **Freescall S912ZVML12F1MKH** [4][7] nem egyedülálló a kínálatban, de a jelenlegi felhasználásra ez a legalkalmasabb, mivel minden szükséges ki- és bemenettel rendelkezik egy motor teljes körű vezérléséhez, valamint a számítási teljesítménye is megfelelő. Az ára pedig talán a legjobb a versenytársai között, ami a majdani tömeggyártás szempontjából ugyancsak nem elhanyagolható szempont.

Ez egy kifejezetten autóiipari felhasználásra tervezett 16-bites mikrokontroller család tagja, amely akár 40 V-on üzemelő analóg rendszerbe is integrálható. A kontrollerben egy S12Z processzormag gondoskodik a vezérléshez és szabályzáshoz szükséges szenzorok jeleinek feldolgozásához és a kommunikációhoz szükséges számítási teljesítményről. A legfontosabb komponens ennél a kontrollernél az integrált GDU, ami akár 6 teljesítmény FET meghajtására is alkalmas. A kontrollerben helyet

kapott továbbá egy 5 V-os feszültségszabályozó is, amely a digitális részek táplálásán kívül a minimális kiegészítő elektronika táplálására is alkalmas.

A kontroller 50 MHz-es órajel frekvenciáját több forrásból is nyerheti. Hagyományos módon egy 4-20 MHz közötti kvarc oszcillátorral is üzemeltethető, de esetünkben egy 1 MHz-es, beépített RC oszcillátor lesz az órajelforrás, amiből egy PLL áramkörrel előállítjuk az 50 MHz-es órajelet. Az RC oszcillátor finomhangolható és maximális hibája $\pm 1,3\%$, ami jelen alkalmazásban megengedhető.

Az eszköz központi eleme a Gate meghajtó áramkör, amely a teljesítmény FET-ek vezérlésért felelős, az autóiipari kategóriának megfelelően mostoha körülmények között is megállja a helyét. Saját beépített 11 V-os feszültségszabályzó áramköre van, amely a feszültségcsökkenés esetén akár boost üzemmódban is képes működni és megfelelő szinten tartani a kimeneti feszültséget. Arra az esetre, ha a tápfeszültség 12 V-nál kisebbre van megválasztva, az eszköz rendelkezik egy bootstrap áramkörrel, amellyel a félhíd magasabb feszültségű FET-je is meghajtható. Esetünkben erre nem lesz szükség, mert 12 V-os vagy a fölötti tápfeszültséggel lesz a rendszer ellátva.

A következő fontos elem a PWM periféria, amely szoros kapcsolatban áll a Gate meghajtó áramkörökkel. Szerencsére a gyártó elég sok konfigurálási lehetőséggel látta el ezt a modult is, így teljes mértékben hozzáigazíthatjuk az aktuális alkalmazáshoz.

Kommunikáció terén minden lehetőség adott, amire egy ilyen alkalmazásban szükség lehet: LIN, SPI, CAN, UART. Jelen megvalósításban ezek közül az SPI, UART és LIN van használatban. Ahogy az ilyen kontrollereknél már megszokott, itt is többféle funkciót láthat el egy kivezetés, így a használaton kívüli kommunikációs protokollokhoz tartozó lábakat fel lehet használni más célokra (például GPIO).

Az SPI kapcsolat a valós környezetben egy főprocesszorral történő kommunikációt szolgál, így ez is a szimulációt végző kontrollerhez fog csatlakozni, Slave eszközként, ahogy egyébként az egy ECU-ban is történne.

Az eszköz teljeskörűen fel van készítve a LIN kommunikációra, így nem igényel külső transciever-t sem. A kontrollerbe integrált fizikai réteg a LIN szabvány 2.2-es [5] verziójának specifikációját teljesíti. A kommunikáció 10,4 kbit/s illetve 20 kbit/s baudra van optimalizálva, de akár nagysebességű (250kbit/s) működés is lehetséges. A minél alacsonyabb energiafogyasztás érdekében a LIN periféria rendelkezik standby móddal, amit engedélyezni lehet, ha éppen nincs szükség erre a kommunikációs módra. Az SPI-

hoz hasonlóan a LIN kommunikáció is a szimulációt végző processzorra fog zajlani, annyi különbséggel, hogy itt a busz valós esetben nem csak két eszköz kommunikációjára szolgálna, ezért a szimulációt végző processzor programozásánál ezt majd figyelembe kell venni.

Az IGDU UART kommunikációját kétféleképpen lehet majd használni. Az egyik lehetőség, hogy az előbbiekhöz hasonlóan a szimulációs processzorra van összekötve, vagy – két jumper áthelyezésével – közvetlenül kommunikálhat a panelen elhelyezett UART-Ethernet interfészen (XPort) keresztül a külvilággal.

Az intelligens GDU-hoz és környezetéhez tartozó kapcsolásrészletek a 17. ábrán láthatók.

3.2 TI mikrokontroller és kiegészítői

A „hardware-in-the-loop” megvalósításhoz szükséges mikrokontroller kiválasztásához alapkövetelmény volt a szükséges kommunikációs interfészek megléte, a szimuláció futtatásához megfelelő sebesség, a viszonylag egyszerű programozhatóság, és előnyt jelentett az alacsony fogyasztás.

Ezen szempontok figyelembevételével már el lehetett készíteni egy, a mikrokontrollerrel szemben támasztott minimális követelményeket tartalmazó paraméterlistát:

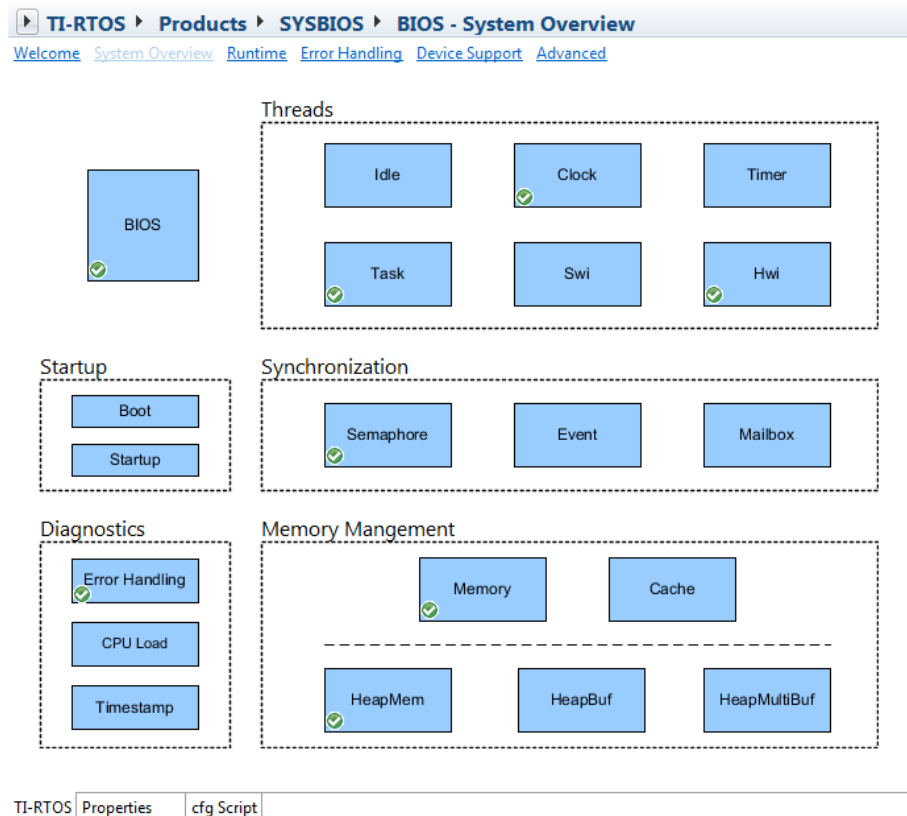
- Kommunikációs interfészek
 - o Ethernet
 - o I2C
 - o SPI
 - o UART
- 32 bites architektúra
- Minimum 100MHz-es processzor
- Egyszerű beültetés (LQFP tokozás)
- A szimulációs kódok és a rendszer tárolására alkalmas belső memória
- Valamilyen ingyenesen elérhető beágyazott operációs rendszer (előny)

Mivel ezen szempontok mindegyikének megfelelt, egy általam már korábban használt Texas Instruments Tiva C sorozatába tartozó mikrokontroller, erre esett a választás. A TM4129CENC PDT [6] kódnevű kontroller egy ARM Cortex M4-es processzormaggal rendelkezik, az összes szükséges kommunikációs formát támogatja, és elérhető hozzá a TI RTOS ingyenes beágyazott operációs [7] rendszer.

Itt rögtön meg is ragadnám az alkalmat ennek az operációs rendszernek a gyors ismertetésére, illetve a használatával kapcsolatos előnyök bemutatására. A név itt tulajdonképpen egy rövidítés Texas Instruments Real-Time Operating System. Ezt a rendszert kifejezetten beágyazott rendszerekhez használt mikrokontrollerekhez fejlesztették ki, azzal a céllal, hogy a tesztelést és fejlesztést egyszerűsítsék,

felgyorsítsák. A fejlesztőknek nem kell a perifériák kezeléséért felelős meghajtó modulokat megírnia, és a különböző feladatok ütemezésére is kész megoldást ad.

A rendszer rendelkezik egy félgrafikus konfigurációs felülettel, ahol a controllerre vonatkozó alapbeállításokat megadhatjuk, illetve kiválaszthatjuk, hogy melyik perifériákat akarjuk használni. Itt hozhatunk létre folyamatokat is, amelyeknek rögtön megadhatjuk, hogy milyen prioritással fussanak. A felület a 4. ábrán látható.



4. ábra. Félgrafikus konfigurációs felület

A rendszer kiválóan alkalmas akár multitaszkolásra is, és az olyan – gyors kommunikációt biztosító – kapcsolatokat is stabilan tudja kezelni, mint az Ethernet és USB 2.0.

A rendszer további előnye, hogy számos, a megismerést és a korai tesztekhez segítő mintakódot tartalmaz, amelyeket minimális módosítással már fel lehet használni egyszerűbb tesztelési feladatokhoz, ami esetemben komoly előny volt.

A controller mellett szól továbbá az is, hogy egy **ARM** [8] architektúrájú Cortex M4-es processzormagot tartalmaz. Mivel ez az architektúra beágyazott rendszerekben és más alkalmazásokban is széleskörűen elterjedt, nagyon sok dokumentációt, példakódot és egyéb hasznos információt találhatunk hozzá viszonylag egyszerűen. Az architektúra

másik nagy előnye az alternatívákhoz képest alacsony fogyasztás, és ennek köszönhető gazdaságos működés. Ez azért fontos, mert a tesztek több kártyán egyszerre fognak futni, és így egy kisebb fogyasztáskülönbség is jelentős lehet, ha mondjuk a tízszeresével számolunk.

A TM4C kontroller további nagy előnye, hogy sok periféria áll rendelkezésünkre, és ezek egymástól függetlenül szabadon konfigurálhatóak. Annyi megkötés van csupán, hogy egy fizikai láb egyszerre csak egy funkciót láthat el. Mivel egy bizonyos perifériából több is rendelkezésre áll, eldönthetjük, hogy az aktuális kapcsolatban nekünk melyik felel meg leginkább, és ezzel egyszerűsíthetjük a kapcsolási rajz megtervezését, illetve a huzalozást, feltéve hogy nem akarjuk az összes rendelkezésre álló portot felhasználni. Bizonyos lábaknak viszont előre dedikált, nem módosítható funkciója van. Ilyenek például az Ethernethez, az órajelhez és hibernálás funkcióhoz tartozó lábak. A tervezés során érdemes ezekből kiindulni. Erre főleg akkor van szükség, ha – mint esetemben is – szeretnénk az Ethernetet használni, mert ilyenkor érdemes a processzort úgy elhelyezni, hogy annak megfelelő oldala minél közelebb legyen a csatlakozóhoz. Ennek oka, hogy az Ethernet kommunikáció 200MHz-es differenciálisan vezetett jelekkel történik, amelyek hossza a panelen nem haladhatja meg a két centimétert speciális kiegészítő áramkör nélkül. Az órajel(ek)hez tartozó kristályok elhelyezésénél már kevésbé kell körültekintőnek lennünk. Ugyan ezek is nagyfrekvenciás jelek, de itt az nem szempont, hogy könnyen hozzáférhetőek legyenek, csak hogy a kontroller lábaihoz a lehető legközelebb kerüljenek.

Ezek a paraméterek nagyjából meghatározzák a kontroller orientációját, és ez alapján el lehet dönteni, hogy a további perifériák közül melyiket mely lábakra konfiguráljuk. Természetesen a GPIO-k kivételével ezek előre meghatározott helyeken lehetnek, de elég sok választási lehetőségünk van, ha nem akarjuk teljes mértékben kihasználni a rendszert.

A kontrolleren rendelkezésre álló kommunikációs lehetőségek közül elsődleges volt az Ethernet kommunikáció. Mivel ez a kontroller a fizikai szinttől rendelkezik Ethernet támogatással nincs szükség külön PHY chip-re, mert már előre beépítették az eszközbe. Ennek köszönhetően csak egy RJ45-ös csatlakozóra, leválasztó transzformátorra és pár passzív alkatrészre van szükség. Csatlakozóból olyat választottam, amely nemcsak a leválasztó transzformátort, hanem a státusz LED-eket is tartalmazza. Ezután csak arra volt szükség, hogy a négy Ethernet vonalra feltegyek

egy-egy lezáró ellenállást, a reflexió csökkentésének érdekében, illetve a LED-ekhez kellett megfelelő előtét ellenállást választani. A státusz LED-ek szabadon bármelyik szabad GPIO port-ra ráköthetők és később szoftveresen beállítható, hogy az Ethernethez tartoznak. Természetesen a kontroller adatlapjában van egy ajánlott konfiguráció is, amelyet én is alkalmaztam, mivel ez más fontosabb funkcióval nem ütközött.

Ugyan a megfelelő fizikai kialakítás adott, a működéshez szükséges MAC címmel [9] nem rendelkezik az eszköz. Ez a cím minden Ethernet kommunikációra alkalmas eszköz esetében egy teljesen egyedi 48 bites azonosító. Ezt a problémát többféleképpen lehet orvosolni. Az egyik lehetőség, hogy veszünk egy címet vagy címtartományt és azt a forráskódba beírva tudjuk használni. A címek ilyenformán történő beszerzése viszont egy elég bonyolult és költséges megoldás, főleg ilyen kis tétel esetén. Mivel a probléma nem egyedi, bizonyos gyártók kínálnak erre egy egyszerűbb, hardveres megoldást. Be lehet szerezni kifejezetten erre a célra gyártott, kis tárolókapacitású EEPROM-okat, amelyek tartalmazzak egy előre beégetett MAC címet. Ezt a címet pedig az ethernet periféria inicializálása előtt kiolvashatjuk, és így a probléma meg van oldva.

A jelen kapcsolásban a Microchip **24AA02E48** [10] kódnevű 2kbit-es EEPROM látja el ezt a feladatot amelyből I2C busz segítségével tudjuk kiolvasni a MAC címet. Ugyan az eszközből létezik más, gyorsabb kommunikációt használó típus is, itt ez nem volt szempont, mivel csak egyszer, a bekapcsoláskor kell kiolvasni a címet. A gyártó megadja a dokumentációban, hogy a szükséges adatok melyik memóriacímtől elérhetőek és így gyorsan hozzáférhetünk. Az I2C kommunikáció további előnye volt, hogy két felhúzó ellenálláson kívül semmilyen kiegészítést nem igényel.

A következő fontos kommunikációs forma az SPI. Ennek segítségével kommunikál egymással a két kontroller, illetve a digitális-analóg átalakító is ezen keresztül kapja az utasításokat. SPI esetén ez történhetne úgy, hogy egyetlen SPI interfészre van kötve másik két eszköz, viszont mivel a TM4C kontroller akár négy különböző SPI interfészt képes működtetni, jobbnak tűnt két független kapcsolatot használni. Ebben az esetben akár használhatunk különböző órajelet is, és nem kell külön chip select logikát csinálnunk. Mindkét eszköz esetében azért használjuk az SPI kommunikációt, hogy megfelelő sebességű adatátvitelt tegyünk lehetővé.

Az utolsó a használt kommunikációk közül az egyszerű UART kommunikáció. A kontroller két külön interfészét használtam ebben az esetben is. Ezek közül az egyik

az Ethernet-UART interfésszel osztozik az intelligens GDU UART kapcsolatán. Azt, hogy az IGDU-val éppen melyik eszköz legyen összekötve UART-on keresztül, két jumper segítségével lehet beállítani.

A TM4C kontrolleren használt másik UART vonal LIN-buszos kommunikációt szolgál. A LIN-busz, jelen esetben csak a két kontroller közötti kommunikációt teszi lehetővé, ugyanakkor valós esetben ezen a buszon több eszköz is helyet kapna. A kontrolleren futó szimulációnak az is része, hogy ezen eszközök kommunikációját helyettesítse és ellássa a master eszköz feladatkörét. Ahhoz, hogy a TM4C kontrollert a LIN buszhoz csatlakoztassam, szükség volt egy megfelelő LIN transceiver-re. Az erre vonatkozó követelmények röviden:

- Minimum a LIN 1.3 szabvány teljesítése
- Kompatibilitás 3,3 V-os jelszintű kontrollerrel
- 20 kBaud-os buszsebesség
- Egyszerű lábszerelt tokozás

Ezen feltételek alapján a Texas Instruments **TPIC1021** [11] típusú transceiver-t választottam, a megfelelő szűrések elvégzése után megmaradt IC-k közül.

A megfelelő kommunikációs interfészek kiválasztása után már következhetett a két kontroller közötti, egyéb szimulációs célokat szolgáló Timer és GPIO kapcsolatok. Ezek közül először a Timer ki- vagy bemeneteket használó kapcsolatokat alakítottam ki, mert ezeket csak limitált számú dedikált lábakra lehet kötni. Itt megint a praktikum került előtérbe, azaz igyekeztem úgy megválasztani a megfelelő lábakat, hogy majd a huzalozás folyamán minél kevesebb egymást keresztező kapcsolat alakuljon ki. Itt nem csak a két kontroller közötti kapcsolatokat kellett számításba venni, hanem a három komparátor kimenetet is, mivel ezek is Timer bemenetre kell, hogy csatlakozzanak.

Amikor ezek a kapcsolatok is megvoltak, következhetek az általános célú egyszerű ki- és bemenetek. Mivel a kontrolleren sok láb maradt szabadon, és ezek szinte bármelyikét lehetett ilyen célra használni, itt csak az döntött, hogy hogyan lehet a legegyszerűbb huzalozást megvalósítani.

A TM4C kontrollerhez és környezetéhez tartozó kapcsolásrészletek a függelék 18. és 19. ábráján láthatók.

3.3 Digitális-analóg átalakító

A nagyobb mikrokontrollerek általában tartalmazzanak analóg bemeneteket, de az analóg kimenetek általában már nem beépített elemek. Ha erre van szükségük, akkor ezt valamilyen külső eszközzel kell megvalósítanunk, ami valamilyen digitális bemeneten keresztül megkapja a kimeneti analóg értéket és elvégzi a konverziót. Azért van szükség erre az elemre, hogy a szimulációt végző TM4C controller kiadhassa a megfelelő áramjeleket, amelyek valós esetben a motor áramának méréséből adódnának, illetve a szögzenzor jeleit. Az intelligens GDU-nak ugyan kilenc analóg bemenete van, de ebből csak nyolcat kell ilyen módon meghajtani, mert a kilencedik a 3,3 V-os referenciafeszültséget figyeli. Ebből adódik, hogy egy 8 kimenettel rendelkező IC-t válasszak. Mindenképpen elég gyors konverzióra van szükség, hogy az intelligens GDU minimális késleltetéssel kapja vissza a vezérléshez szükséges jeleket, továbbá az is fontos volt, hogy elég jó pontossággal, felbontással lehessen kiadni a megfelelő jeleket.

Kommunikáció terén az SPI mellett döntöttem mivel ezt a TM4C controller támogatja és elég nagy sebességű kommunikációt tesz lehetővé az alkalmazáshoz.

További feltétel volt, hogy az intelligens GDU 5 V-os tápfeszültségéről tudjon üzemelni illetve ez legyen a maximális kimeneti feszültség, hogy a bemeneteket teljesen ki lehessen vezérelni. Emellett az is fontos volt, hogy ne kelljen külön szintillesztő áramkört alkalmazni a két controller között, ezért TTL kompatibilis eszközt kerestem.

A követelmények rövid összefoglalása:

- 5 V-os tápfeszültség
- SPI kommunikáció
- TTL kompatibilis
- 16 bites felbontás

Ezen követelményekkel sikerült elég gyorsan megtalálni a megfelelő eszközt mivel az összes szűrhető paraméter megadása után jóformán csak a Linear Technology **LTC2600** [12] típusú modellje maradt, mert ez volt TTL kompatibilis.

Az IC főbb paraméterei:

- 2,5-5 V-ig terjedő aszimmetrikus tápfeszültség

- Alacsony fogyasztás (250 μ A kimenetenként 3 V-os tápfeszültség esetén)
- Egymástól függetlenül lekapcsolható kimenetek
- Alacsony áthallás a kimenetek között (<10 μ V)
- Kettős pufferralású digitális bemenet
- 16 lábú SSOP tokozás

Az SPI kommunikációhoz szükséges vezetékek bekötésénél fontos volt, hogy a jelvezetékek között legyen egy-egy GND vezeték is, mivel azon a fizikai távolságon amely a controller kimenete és a DAC bemenete között van, áthallás jöhet létre és így a beállítások átvitele hibás lehet. A DAC ugyan rendelkezik digitális reset-elési lehetőséggel, be lett kötve a hardveres reset lába is a controller egy szabad kimenetére.

Annak érdekében, hogy a kimenetek a lehetőségek szerint leginkább zajmentes referencia alapján legyenek beállítva, a referencia-bemenet nem közvetlenül van a tápfeszültségre kötve, hanem egy ferrit bead-en keresztül, és kapott egy külön szűrőkondenzátort is, amelyek az előforduló zajok nagy részét kiszűrik. Ugyanilyen megoldással lett a 3,3 V-os referencia is bekötve az intelligens GDU megfelelő lábára.

Mivel a DAC az intelligens GDU 5 V-os feszültségstabilizátoráról kapja a tápfeszültséget, aminek kimenete elérheti az 5,5 V-ot is, szükséges volt valamilyen védelmet beépíteni a DAC táphozzávezetésébe, hiszen a tápfeszültség felső korlátja pont 5,5 V. Valószínűleg ez semmilyen problémát nem okozna ebben a szintetikus környezetben, de elővigyázatosságból egy egyszerű Zener diódás tápstabilizátor is bekerült az áramkörbe.

3.4 Szintillesztő áramkör

Míg az intelligens GDU digitális ki- és bemenetei 5 V-os jelszinten működnek, a szimulációért és kommunikációért felelős TM4C kontroller 3,3 V-os jelszintet használ. A két egység közötti kommunikációhoz szükséges, hogy ezeket a ki- és bemeneteket összekössük, de ezt közvetlenül nem tehetjük meg.

Erre a célra többféle megoldás is létezik. Mivel összesen tizenöt kapcsolatot kell független kapcsolatot kell létrehozni a két kontroller között a vonalankénti szintillesztés lehetőségét gyorsan elvettem. Erre a célra léteznek céláramkörök, amelyek egyszerre akár 32 vonalat is tudnak kezelni. Esetemben egy 16 vonalas típus jó megoldásnak tűnhet, de egy ilyen eszköz használata esetén szükségtelenül bonyolultabb lenne a huzalozás és a jelvezetékek hossza is megnőne. A jó kompromisszumot a megfelelő huzalozás és viszonylag alacsony alkatrészszükséglet között a négy vonalas szintillesztő áramkörrel találtam meg. Mivel gyors vonalak kiszolgálására is alkalmasnak kellett lennie, mint például a két kontroller közötti SPI kommunikáció vagy a Timer vonalak, olyan eszközt kellett keresni, amely alkalmas nagy sebességű vonalak kiszolgálására.

A követelmények röviden:

- 3,3 V és 5 V-os vonalak illesztése
- 4 vonalas kivitel
- Gyors átvitel (maximum 10ns átviteli késleltetés)
- Valamilyen lábszerelt tokozás
- Minimális kiegészítő elektronika

Ezen paraméterek alapján már gyorsan ki tudtam választani a megfelelő eszközt, amely a Texas Instruments **TXB0104D** [13] típusú eszköze lett, amely bőven túlteljesíti a vele szemben támasztott elvárásokat. Az eszköz semmilyen kiegészítő áramkört nem igényel a tápfeszültségeket szűrő két darab 100nF-os kondenzátoron kívül, azaz logikai a ki- és bemenetei közvetlenül összeköthetőek a kontrollerekével.

3.5 UART kommunikáció

A feladat megvalósításánál fontos volt, hogy az intelligens GDU könnyen és akár közvetlenül is elérhető legyen. Erre egy céleszköz beépítése tűnt a megfelelő ötletnek. Mivel az eszköz a későbbiekben egy szerverteremben lévő rackszekrényben lesz elhelyezve célszerű volt, hogy a kommunikáció Etherneten történjen. Az intelligens GDU-n nem volt nehéz kiválasztani a megfelelő kommunikációt mivel összesen három lehetőség közül választhatunk. Ezekből kettő (SPI, LIN busz) a valós környezet szimulálásához szükséges és össze van kötve a TM4C kontrollerrel, így csak egy lehetőség maradt, az UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) kommunikáció.

Ennek szellemében megszülettek az eszköz elvárt paraméterei:

- Külső csatlakozás Ethernet RJ45 csatlakozó
- Belső csatlakozás UART
- Egyszerűen használható beépített konfigurációs felület

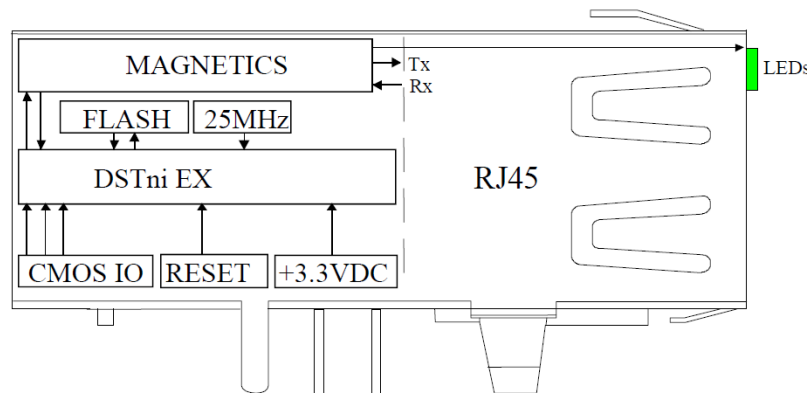
Erre a célra több gyártó is kínál megfelelő megoldást, de ezek többsége valamilyen bővítőkártya formájában csatlakoztatható az aktuális eszközhöz. Jelen esetben ez hátrányt jelentett mivel ezek általában egy függőleges csatlakozósorral csatlakoztatható önálló panelek, amelyeken még az Ethernet csatlakozó is helyet kap ezért jelentősen megnövelték volna a kártya magasságát.

Olyan megoldás kellett, ami közvetlenül a panelra ültethető. Rövid keresés után sikerült a Lantronix **XPort** nevű [1] eszközét megtalálni, amely pontosan erre lett kitalálva. Az eszköz külsőre alig megkülönböztethető egy egyszerű, szabványos Ethernet csatlakozótól. A különbség csak annyi, hogy valamivel hosszabbra nyújtották a fémházat ahol helyet kapott egy egyszerű mikrokontroller, ami a vezérlésért és a kommunikációért felelős. A belső felépítés az 5. ábrán látható.

Az eszköz fontosabb paraméterei:

- Teljesen integrált megvalósítás
- Beépített web szerver
- Stabil, TCP/IP protokoll feletti webes keretrendszer

- Egyszerű konfiguráció webes interfész segítségével
- Testreszabható HTML alapú konfigurációs képernyők
- Interaktív kezelőfelület JAVA-s alkalmazásokkal
- EMI tesztelt
- Az adatok ki- és becsomagolása a TCP csomagokba automatikus
- Szükség esetén akár 256 bites AES titkosítás
- Jelszavas védelem
- Hálózaton keresztül frissíthető vezérlőprogram
- Akár 921600 baud-os soros adatátviteli sebesség



5. ábra. Az XPort belső felépítése

Ezek a funkciók tökéletesen kielégítik az eszközzel szemben támasztott követelményeket.

A teljes integráltság azt takarja, hogy az eszközbe be van építve az Ethernet csatlakozó, az ehhez szükséges leválasztó transzformátor, egy DSTin EX mikrokontroller az ehhez szükséges 25MHz-es kvarckristály és 512 KB Flash memória a vezérlőprogram tárolására, továbbá megtalálhatóak rajta az Ethernetnél megszokott státusz LED-ek. A panel felé a kivezetések az eszköz alján található furatszerelt lábakkal vannak megvalósítva.

Mivel az eszköz amellet, hogy UART kommunikációt valósít meg a panel felé, rendelkezik három szabadon felhasználható GPIO port-tal, amelyek közül az egyiket fel is használtam. Szükség szerint az intelligens GDU újraindítható, ha erre a kimenetre egy megfelelő szélességű logikai 1-es impulzust adunk ki. A másik két

általános célú láb jelenleg nincs kihasználva, de a panelra ki vannak vezetve egy-egy mérőpontra ezzel elősegítve az esetleges későbbi felhasználást, vagy hibakeresést.

A beépített kezelőfelület nagyban megkönnyíti a majdani tesztelők dolgát, ugyanis az eszköz teljesen működőképes állapotban érkezik a gyártótól és a bekapcsolás után egy rövid konfigurációt követően azonnal használható. Ha ugyanezt egy elemenként összeépített interfésszel akarnánk megvalósítani, akkor az mind hardvertervezés, mind szoftverfejlesztés terén egy sokkal hosszabb és bonyolultabb feladat lenne. Mivel esetünkben a kész tesztkártya kis sorozatban fog csak készülni, gyorsabb és költséghatékonyabb megoldás egy ilyen eszközt használni, mint elemenként felépíteni, annak ellenére, hogy egy ilyen interfész ára a 10000 Ft-os nagyságrendbe esik.

Azt még érdemes kiemelni tulajdonságok közül, hogy az eszköz úgy van megtervezve és tesztelve, a normális körülmények között fellépő elektromágneses hatásoknak ellenálljon, ami fontos tényező egy ilyen tesztrendszer stabilitását tekintve.

Mivel a 921600 maximális baud rate egy fél nagyságrenddel nagyobb az intelligens GDU stabil, alacsony hibaarányú (0,006%) 115200 baud rate-jénél, biztos, hogy utóbbi sebességen stabil és megbízható kapcsolat alakítható ki. Abban az esetben, pedig ha a hibák egyáltalán nem megengedhetőek a sebesség tovább csökkenthető.

Az XPorthoz tartozó kapcsolás részlet a függelékben található 21. ábrán látható.

3.6 Fázis komparátorok

Mivel az intelligens GDU-k nem egy valódi motort fognak vezérelni, és motor szimulációjához a TM4C kontrollernek szüksége van a fázisok aktuális állapotára, a fázisfeszültségek egy-egy komparátoron keresztül be lesznek kötve a TM4C kontroller egy-egy timer bemenetére. Erre azért van szükség, hogy tudjuk, hogy mikor mennek végbe a fázisátmenetek és ennek megfelelően tudjuk kiadni a digitális-analóg átalakítón keresztül az intelligens GDU számára a megfelelő analóg jeleket, amelyek valós esetben a FET-es hidak áramméréséből adódnának. Mivel a TM4C kontroller nem csak a motor szimulálásáért felelős, hanem vezérli is az intelligens GDU-t, a komparátorok segítségével az is ellenőrizhető, hogy a vezérlésnek megfelel-e a kimenet.

A komparátorok tápfeszültsége a kontrollerhez igazodva 3.3 V kell, hogy legyen, ehhez viszont az szükséges, hogy a bemeneten megfelelő jelformálást végezzünk. Mivel még 12 V-os tápfeszültség esetén is előfordulhatnak ennél magasabb csúcscsértékek is jelváltások közben, első lépésként egy feszültségosztóval 0,189-ed részére csökkentem a jel amplitúdóját, ezzel a feszültség szintet a kívánt tartományba hozom abban az esetben, ha a bemeneti feszültség nem haladja meg a 16 V-ot. További védelemként a föld és a bemenet, illetve a bemenet és a 3.3 V-os tápfeszültség közé elhelyezek egy-egy Schottky diódát, amelyek levágják az esetleges túl- és alullövéseket. Ennek fizikai megvalósítására egy dupla, soros elrendezésű diódát (BAT54S) választottam, amelynek nagy előnye, hogy a két dióda egy tokban van elhelyezve és ennek megfelelően csak 3 lábba van szükség, ami egy nagyon gyakori és jól használható SOT-23-as tokozást tesz lehetővé. Utolsó lépésként minden, már leosztott fázis és a föld közé beraktam egy 100pF-os kondenzátort, amely a hirtelen, magas csúcsokat tudja eliminálni.

Ezután következett a megfelelő komparátor kiválasztása. Mivel mind a három fázist rá kellett kötni egy-egy komparátorra érdemesebb volt egy olyan IC-t választani, amelyben egy tokon belül 4 darab komparátor helyezkedik el (3 darabos nem létezik) és ezek közül egyet üresen hagyni. Mindenképpen olyan komparátorra volt szükség, ami elhanyagolható késleltetéssel fel tudja dolgozni a bemeneten érkező fázisváltásokat. Mivel korábban már dolgoztam a Microchip MCP6564 [14] típusú komparátorával és ez a jelenlegi paramétereknek is megfelelt, most is ezt választottam. Sebességét és árát tekintve is körülbelül a középmezőnyben helyezkedik el. Mivel nem volt szükség

gyorsabb működésre, mint amit az MCP6564 tud, nem lett volna értelme körülbelül négyszeres árat fizetni egy nagyobb sebességű alternatíváért.

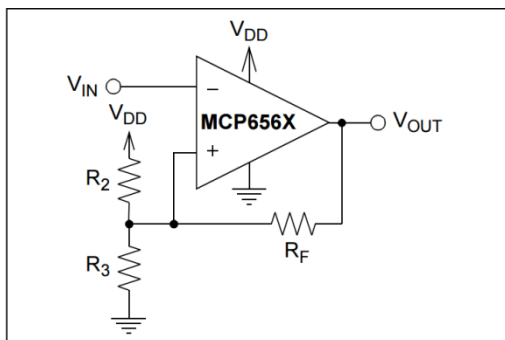
Miután a megfelelő jelformálás megtervezése és a komparátor kiválasztása megtörtént már csak arra volt szükség, hogy az esetleges téves váltások elkerülése érdekében beállítsam a megfelelő hiszterézist. A korábban hasonló áramkörökön végzett mérési tapasztalatok alapján úgy állítottam be az ellenállásértékeket, hogy a tápfeszültség feléhez képest körülbelül 150-150 mV legyen az eltérés mindkét irányban a komparálási szintben. Szerencsére az adatlap elég részletes volt ezért nem jelentett nagy gondot a kiválasztott invertáló kapcsoláshoz tartozó ellenállásértékek kiszámítása. Az alábbi képletek, a 6. ábrán látható kapcsolás és a 7. ábrán látható karakterisztika alapján jöttek ki az elkészített kapcsolásban szereplő értékek. A kapcsolás a függelékben található 20. ábrán látható.

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \quad (1)$$

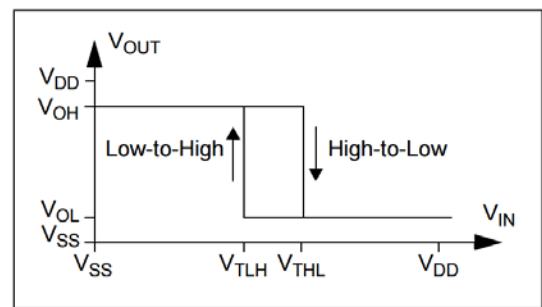
$$V_{23} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \times V_{DD} \quad (2)$$

$$V_{THL} = V_{OH} \frac{R_{23}}{R_{23} + R_F} + V_{23} \frac{R_F}{R_{23} + R_F} \quad (3)$$

$$V_{TLH} = V_{OL} \frac{R_{23}}{R_{23} + R_F} + V_{23} \frac{R_F}{R_{23} + R_F} \quad (4)$$



6. ábra. Komparátor invertáló kapcsolása



7. ábra. Hiszterézis szemléltető állapotátmeneti ábra

3.7 Táp áramkör

3.7.1 Bemenet

A felhasználás jellegéből adódóan a könnyű és gyors csatlakoztatás érdekében az áramkör tápellátása egy 2.1 mm-es DC Jack csatlakozón [15] keresztül történik. Ez a csatlakozó széles körben elterjedt különböző elektronikai eszközök körében, ezért könnyen és relatív olcsón beszerezhető az autókban található speciális csatlakozókhoz képest. Megfelelően robusztus ahhoz, hogy akár 5000-szer csatlakoztassák és a terhelhetőségében is van tartalék jelen felhasználásban.

Közvetlenül a kapcsolás bemenetén található egy 5 A-ig terhelhető Schottky dióda, ami az áramkört megvédi az esetleges fordított tápfeszültségtől.

Mint általában az ilyen alkalmazásoknál, itt is elhelyezésre került egy indikátor LED, amely jelzi a tápfeszültség meglétét. Mivel az eszköz a későbbiekben egy rackszekrényben lesz elhelyezve, fontos volt, hogy a LED az előlap felől jól látható legyen. A probléma megoldására egy erre a célra kifejlesztett lightpipe-ot [16] (fénycső) használtam, amelyet a panel síkjába beültetett LED fölé kell beépíteni és így a fényt 90 fokban megtörve az előlap felé vezeti.

3.7.2 Feszültség stabilizátor

Az intelligens GDU automotive alkalmazásokhoz lett kifejlesztve, ezért úgy lett megkonstruálva, hogy széles feszültségtartományban, de jellemzően 12 Volt körül működőképes és védett legyen. Az alacsonyabb feszültségen üzemelő perifériák (általános célú és timer ki-bemenetek, Analóg bemenetek, SPI, UART) számára saját maga előállít egy 5 V-os tápfeszültséget egy beépített LDO (Low Dropout) feszültség stabilizátor segítségével, amelynek a kimenetére csak a megfelelő szűrő és puffer kondenzátorokat kell elhelyezni és a megfelelő bemenetekre visszakötni. Jelen esetben ez a tápfeszültsége a kapcsolatban elhelyezett Digitális- Analóg konverternek is, illetve referencifeszültségként szolgál a két controller közötti szintillesztő áramkörök számára is.

3.7.3 DC-DC átalakító

Más a helyzet viszont a TI TM4C mikrokontrollerrel, az XPort kommunikációs interfésszel és a komparátor áramkörrel. Ezeknek stabil 3.3 Voltos feszültségre van

szükségük a megfelelő működéshez. Erre a célra a DC-DC átalakító tűnt megfelelő választásnak, mivel a kívánt feszültség szint és a bemenet között jelentős eltérés van, ez egy hagyományos feszültség stabilizátoron jelentős disszipációt okozott volna.

Az eszköz kiválasztásánál a következő paraméterek voltak az irányadók:

- 3.3 V-os fix kimeneti feszültség
- Széles bemeneti feszültségtartomány
- Minimum 1,5 MHz-es kapcsolási frekvencia
- Minimum 700 mA terhelhetőség
- Maximum 1 A terhelhetőség
- Könnyű kézi ültethetőség

A fix kimeneti feszültség praktikus okokból volt feltétel, ugyanis így elhagyhatóak az állítható kimenetű eszközökhöz szükséges beállító elemek.

A bemeneti feszültségtartományt igyekeztem úgy megválasztani, hogy illeszkedjen az alkalmazás többi alkatrészének paramétereire.

A kapcsolási frekvencia emelkedésével a kiegészítő áramkörök mérete és ára csökkenthető illetve a hatásfok is javul bizonyos mértékben. Az 1,5 MHz közepes értéknek számít ebből a szempontból, viszont ennél lényegesen magasabb kapcsolási frekvenciával rendelkező átalakítók esetén a terhelhetőség, a bemeneti feszültségtartomány vagy az árkategória nem megfelelő.

A terhelhetőség a kiszolgált eszközök maximális összes fogyasztása alapján lett meghatározva. Az ezen a feszültség szinten üzemelő eszközök a TM4C kontroller, az XPort, a komparátor áramkör és a szintillesztő áramkörök. Utóbbi kettő fogyasztása nagyságrendekkel alacsonyabb az előbbieknél ezért ezek nem voltak jelenősek ilyen szempontból. A kontroller funkcionalitásához képest alacsony fogyasztású, teljes terhelés esetén körülbelül 400 mA. Ennek szöges ellentéte az XPort, amely tudásához képest meglepően sokat fogyaszt. Teljes kihasználtság esetén ez elérheti a 230 mA-t.

A terhelhetőségre azért lett maximumérték is meghatározva, mert a DC-DC átalakítók működési elvükből adódóan részterhelés esetén akár egy nagyságrenddel rosszabb hatásfokkal működnek, mint a terhelési maximum közelében.

A könnyű ültethetőség azért volt szempont, mert a komplett áramkör kis szériában fog készülni és az alkatrészek kézzel lesznek forrasztva. Ezért fontos volt, hogy olyan tokozást válasszak, amelynél ez viszonylag egyszerűen megoldható.

Így esett a választás a Linear Technology LT3973-3.3 [17] típusú konverterére, melynek fontosabb tulajdonságai:

- Széles bemeneti feszültségtartomány (4,2 V-tól 42 V-ig)
- Állítható kapcsolási frekvencia (200 kHz-től 2.2 MHz-ig)
- 750 mA terhelhetőség
- Integrált diódák
- Nagyon alacsony üresjáratú áram (12 V bemeneti feszültség esetén 1,9 μ A)
- Alacsony kimeneti lengés (<10 mV_{P-P})

Az eszköz adatlapjából az is kiderül, hogy a jelen felhasználási területre kifejezetten ajánlott. A választásnál az is komoly előny volt, ez a típus viszonylag kevés külső kiegészítéssel képes ellátni a feladatát.

A kiválasztást követően meg kellett határozni az adatlap és a bemeneti feszültség alapján a kapcsolási frekvenciát, majd különböző kiegészítő alkatrészek értékeit és típusait.

A maximális kapcsolási frekvenciát a következő képlet írja le:

$$f_{SW(MAX)} = \frac{V_{OUT} + V_D}{t_{ON(MIN)}(V_{IN} - V_{SW} + V_D)} \quad (5)$$

A képletben szereplő értékek jelentése:

- V_{OUT} : kimeneti feszültség, jelen esetben 3,3 V
- V_{IN} : bemeneti feszültség
- V_D : kimeneti diódán eső feszültség (~0,7 V)
- V_{SW} : kapcsolások során eső feszültség (maximális terhelés esetén 0.5 V)
- $t_{ON(MIN)}$: minimális bekapcsolási sebesség (70 ns)

Ezen értékek alapján meghatározható a maximális kapcsolási frekvencia. Az egyetlen paraméter, ami nem fix, a bemeneti feszültség, amelyet ha 35 V-ban maximálunk,

valamivel 1,6 MHz feletti frekvencia adódik. Az adatlapból kiolvashatók az adott frekvenciákat beállító ellenállás értékek így adódott a 61,9 k Ω .

A kapcsolási frekvencia ismeretében a következő képlettel már meghatározható a kimeneti tekercs értéke is:

$$L = 1,5 \frac{V_{OUT} + V_D}{f_{SW}} \quad (6)$$

A fenti értékekből és a képletből 3,75 μ H adódik. Számításba kellett venni még a maximális áramot, ami az adatlap alapján 1,5 A és az is fontos, hogy az egyenáramú ellenállás alacsony legyen ($\sim 0,1 \Omega$). Ezen paramétereket figyelembe véve végül egy 3.9 μ H-s induktivitású BOURNS SRN6028-3R9M árnyékolt tekercs került a kapcsolásba, ami ugyan terhelhetőségben szinte fölöslegesen nagy (3 A), az ára és mérete kedvező a kapcsoláshoz.

A bemenetre az adatlap szerint egy 4,7 μ F-os X5R vagy X7R típusú kerámiakondenzátort kell elhelyezni és mellé egy nagyobb elektrolit kondenzátort, abban az esetben, ha hosszú kábellel csatlakozik az áramforráshoz. Jelen esetben ez szükséges mivel az eszköz egy rackszekrényben lesz elhelyezve, ahol a hozzávezetés egy körülbelül két méteres kábellel lesz megvalósítva.

A kimeneti kondenzátor választása már nem ilyen egyszerű, mivel itt már egy kapcsolási frekvenciától függő képlettel határozhatjuk meg a szükséges kapacitást.

$$C_{OUT} = \frac{50}{V_{OUT} f_{SW}} \quad (7)$$

A képletből 9,4 μ F adódik, ezt nyugodtan kerekíthetjük felfelé 10 μ F-ra és így egy tipikus, erre a célra gyakran használt értéket kapunk. A kimenetre is elhelyeztem egy nagyobb méretű elektrolit kondenzátort, ami kettős szerepet lát el. Egyrészt csökkenti a kimeneti feszültséglengést, másrészt pufferként szolgál a hirtelen, nagy áramfelvételek esetén.

A boost kondenzátor értékére az adatlapban fix 470 nF ajánlás van és ezt is használtam.

A ki és bemeneteken további szűrőkondenzátorokat is elhelyeztem, hogy a lehetséges villamos zajokat, gerjedéseket csökkentsem.

A DC-DC konverterhez tartozó kapcsolási rajz részlet a 22. ábrán látható.

3.8 Teljesítmény elektronika

Az intelligens GDU eredeti rendeltetése szerint teljesítmény MOSFET-eken keresztül egy háromfázisú BLDC motort hajtana meg. Mivel ebben a kapcsolásban, a motor csak egy szimulált karakterisztika szintjén van jelen, szükség van valamire, ami helyettesíti a kapcsolásban, hogy a Gate meghajtó áramkörök megfelelően működjenek. Az ebben a részben tárgyalt elemek a függelékben elhelyezett 17. ábrán láthatók a kapcsolási rajzon.

3.8.1 Teljesítmény ellenállások

Erre a célra három darab nagy teljesítményű ellenállást használunk, amelyeknek van egy közös pontja (valós esetben ez lenne a motor csillagpontja), a másik kivezetésük pedig egy-egy fázisra csatlakozik. Ezek értéke úgy lett meghatározva, hogy 12 V-os tápfeszültség esetén a legrosszabb esetben is maximum 1 A erősségű áram folyjon keresztül rajtuk. Ez az áramérték nagyjából megfelel egy üresen járó motor áramának, de még nem okoz akkora disszipációt az ellenállásokon, hogy az ellehetetlenítse a tesztpanelek használatát a nagy hőleadás miatt. Itt a legrosszabb eset az, amikor egy fázishoz tartozó, a híd magas oldalán elhelyezkedő FET, a másik két fázisból pedig az alacsony oldali FET van nyitott állapotban vagy ennek fordítottja. Ebben az esetben ugyanis az egyik ellenállással sorba van kapcsolva a másik két ellenállás párhuzamos eredője. Ilyenkor a táp felől nézve a legalacsonyabb a terhelő ellenállás, amely a legnagyobb árammal jár.

Könnyen belátható, hogy ebben az esetben az értékválasztásnál úgy kell számolnunk, hogy a kívánt eredő ellenállás – ami jelen esetben $12\ \Omega$ – kétharmada, azaz $8\ \Omega$ legyen a minimális ellenállásérték. A korábban részletezett kapcsolásban maximum 8 V és 1 A jut egy ellenállásra, amiből kiszámolhatjuk, hogy az eldisszipált teljesítmény ebben az esetben 8 W. Itt egy kis tartalékot, hagyva a rendszerben 10 W-os ellenállások közül válogattam.

A következő kérdés az volt, hogy milyen fizikai kiserelésben legyenek az ellenállások elhelyezve a panelen. A teljesítmény SMD ellenállásokat viszonylag gyorsan elvettem, mivel azok nagyon nagy hőterhelésnek tennék ki a panelt és emiatt nagy hűtőfelületeket kellene hagyni nekik vagy hűtőbordákat szerelni rájuk, ami bonyolítaná az eszköz összeszerelését, illetve méretnövekedéssel járna, ami nem volt megengedhető, mivel a panel mérete alapparaméter volt a tervezésnél.

A másik lehetőség a furatszerelt huzallellenállások használata volt. Ezeknek több előnye is volt az SMD-kel szemben. Áruk a párszáz forintos nagyságrendben mozgott, míg felületszerelt alternatíváik általában több mint ezer forintba kerültek. Mivel ki vannak emelve a panel síkjából és a felületük is sokkal nagyobb, nem kell gondoskodni külön hűtésről sem. Beültetésük is lényegesen egyszerűbb, mivel darabonként két lábat kell csak beferrasztani. Egyetlen hátrányuk – ami egyben előnyük is volt – a méretük. Mivel nem fértek volna el ideális helyzetben a panelen, a probléma úgy lett orvosolva, hogy a panel hátoldalára kerülnek, a panel rackszekrény-beli helyzetéhez képest függőlegesen, ami elősegíti a természetes légáramlást. Ennek az elrendezésnek további előnye, hogy a FET-ekhez képest a másik oldalon helyezkednek el és így nem melegítik egymást.

3.8.2 Teljesítmény MOSFET-ek

Egy éles ECU-ban ezeken az elemeken folyik át a motort hajtó összes áram, ráadásul, ezt az áramot másodpercenként 16-20 ezerszer kell be-ki kapcsolni. Az áram erőssége egy beépített ECU esetén teljes kormányrásegítés mellett egy kisebb autónál is elérheti a 80-100 A-t. Emellett figyelembe kell venni azt is, hogy ha egy valódi motort forgatunk, akkor a motortekercsek induktivitása miatt kikapcsoláskor a tápfeszültség 2-3 szorosa is megjelenhet az adott fázison egy rövid feszültségcsúcsként, ami szintén közvetlenül veszélyezteti a kapcsolóelektronikát.

Az előbb tárgyalt feszültségcsúcsok miatt a FET-eket úgy (is) védjük meg, hogy U_{DS} feszültségüket sokszorosán túlméretezzük, így a csúcsok nem tudják károsítani őket.

A következő fontos szempont a relatív nagy áramra méretezés. Itt nem csak az a fontos, hogy az adatlap szerinti áramterhelhetőség megfeleljen az általunk használni kívántnak. Mivel ezek az elektronikák egy viszonylag kicsi zárt térben helyezkednek el, nem helyezhetünk rájuk túl nagy hűtőfelületet vagy hűtőbordákat, ezért létfontosságú hogy a disszipációt minimalizáljuk. Ebben komoly szerepet játszik, hogy nagyon gyors kapcsolásokkal, nagyon lerövidítjük az átmeneti tartományt és így már a maradék disszipáció elhanyagolható. Emellett az is komoly szerepet játszik a hőterhelés csökkentésében, hogy amikor egy FET már teljesen kinyitott, minél alacsonyabb legyen a soros ohmos ellenállása ($R_{DS(on)}$). Ez minden FET esetében alapparaméter, amelyet a keresésnél figyelembe kell venni. Ha csak 40 A-es áramerősséggel és **2 m Ω** -os

ellenállással számolunk, akkor is 3,2 W-os disszipáció lép fel. Ilyen FET-ből helyezkedik el egy panelen 6 darab és ezek együttes hőjét elvezetni komoly feladat. Azért is fontos minél alacsonyabban tartani a disszipációt, mert olyan hirtelen jelentkezik, hogy a hűtés – bármilyen jó is legyen – nem tudja elég gyorsan elvezetni, ha meghalad egy bizonyos értéket.

Az én esetemben ez nem volt ennyire hangsúlyos, mivel a teljesítmény ellenállásokon maximálisan átfolyó áram nem haladhatja meg az 1 A-es áramerősséget, és induktív hatásoknak sem teszik ki a FET-eket. Ennek ellenére fontos volt minél alacsonyabban tartani a disszipációt mivel egy zárt szekrényben egymáshoz viszonylag közel több tesztártya is fog üzemelni és ezek egymást és a szekrényben található egyéb eszközöket fogják fűteni.

Mivel nem volt feltétel a nagy áramterhelhetőség, úgynevezett Dual-MOSFET-eket kerestem a kapcsoláshoz, amelyek lényege, hogy egy integrált áramkörön belül két FET található és ezzel helyet lehetett megtakarítani a panelen. Ennek pozitív folyamánya, hogy a FET-eket közelebb is lehetett helyezni a GDU-hoz és így csökkenthető a kettő között kialakuló reflexió.

Ugyan itt a valódi motor hiánya miatt a korábban tárgyalt feszültségcsúcsok kevésbé hangsúlyosak, a specifikáció megengedi a 12 V-nál nagyobb bemeneti feszültséget is ezért a keresésnél az U_{DS} feszültséget minimálisan 30 V-osnak választottam. A korábban tárgyalt minél alacsonyabb disszipáció érdekében az $R_{DS(on)}$ értékét 10 m Ω -ban maximáltam. Továbbá szempont volt, hogy a könnyű legyen a kézi beültetés, ezért igyekeztem olyan tokozást keresni, amely ezt elősegíti. Az első két paraméter alapján már elég jól leszűkíthető a kínálat, és ha a könnyű forraszthatóságot is hozzávesszük, akkor szinte nem is marad választási lehetőségünk.

Így esett a választás az NXP **BUK7K6R8-40E** [18] típusú termékére, amely minden szempontból megfelelt a fentebb leírtaknak. Főbb tulajdonságai:

- Folyamatos áramterhelhetőség: $I_D=40$ A
- Drain Source feszültség: $U_{DS}=40$ V
- Lábak száma: 8 darab
- Ellenállás (bekapcsolva): 5,8 m Ω
- Maximális hőmérséklet: 175°C

A paramétereknél elsőre furcsa lehet, hogy 40 A-es a megengedett áramerősség, de ennek olyan egyszerű oka van, hogy az előre meghatározott paraméterek maradéktalan teljesítése esetén nagyjából ez a minimális áramérték a keresési találatok között. Ezen paraméterek alapján jól látható, hogy bőségesen túl vannak méretezve az alkalmazáshoz képest a FET-ek, de mivel az alacsony darabszám miatt a projekt nem érzékeny a darabonként 600 forint körüli árat megéri a megbízható működés. Utolsóként az adatlap alapján ellenőriztem a kapcsolási és késleltetési időket és ezek is megfeleltek az alkalmazásnak.

Egy éles ECU-ban ezeken az elemeken folyik át a motort hajtó összes áram, ráadásul, ezt az áramot másodpercenként 16-20 ezerszer kell be-ki kapcsolni. Az áram erőssége egy beépített ECU esetén teljes kormányrágítás mellett egy kisebb autónál is elérheti a 80-100 A-t. Emellett figyelembe kell venni azt is, hogy ha egy valódi motort forgatunk, akkor a motortekercsek induktivitása miatt kikapcsoláskor a tápfeszültség 2-3 szorosa is megjelenhet az adott fázison egy rövid feszültségcsúcsként, ami szintén közvetlenül veszélyezteti a kapcsolóelektronikát.

Az előbb tárgyalt feszültségcsúcsok miatt a FET-eket úgy (is) védjük meg, hogy U_{DS} feszültségüket sokszorosán túlméretezzük, így a csúcsok nem tudják károsítani őket.

3.8.1 Puffer kondenzátor

Mivel az eszköz várhatóan egy körülbelül 2-3 méter hosszú tápkábelben keresztül fogja kapni a működéshez szükséges áramot és a panelen előfordulhatnak viszonylag nagy áramingadozások, célszerű volt egy nagy méretű kondenzátort elhelyezni, hogy ezeket a hirtelen áramigényeket kielégítse. Erre a célra egy elektrolit kondenzátort kerestem. Feltételként a minimum 25 V-os feszültséget, alacsony (100 m Ω nagyságrend) ESR-t, illetve 2000 μ F körüli kapacitást szabtam meg. Egy ilyen paraméterekkel bíró kondenzátor már általában 3-4 cm magas radiális kivezetések esetén, ezért az axiális kivezetések is bekerültek a paraméterek közé. A keresésnél látszott, hogy a feszültség növekedésével jelentősen nő a méret ezért a feszültséget fixen 25 V-osra választottam. Ezen paraméterek alapján már gyorsan sikerült kiválasztani a megfelelő típust, ami végül egy 2200 μ F kapacitású 30 mm hosszú és 15 mm átmérőjű Vishay gyártmány lett, amelynek az ESR értéke is megfelelő.

3.8.2 Védelmek

A FET-ek további védelme érdekében úgynevezett snubber kapcsolást alkalmaztam, amely a tranziensek során megjelenő feszültségcsúcsokat hivatottak elnyomni, csökkenteni. Jelen kapcsolásban ez egy, a Drain és Source lábak közé kapcsolt soros RC-tag. Itt fontos volt, hogy ezek az elemek a fizikai elrendezésben minél közelebb kerüljenek a FET-ekhez. Az alkatrészek kiválasztásánál továbbá fontos volt, hogy az ellenállások mérete megfelelő legyen a pillanatnyi nagy áramok által okozott disszipáció elvezetéséhez. Mivel ezek az alkatrészek közel helyezkednek el a FET-ekhez, fontos volt olyan kondenzátort választani, aminek a hőmérsékletfüggése alacsony, így a FET-ek által termelt hő nem befolyásolja lényegesen azok kapacitását. Erre a célra léteznek speciális dielektrikummal rendelkező kondenzátorok, amelyeknek lényegében nincs hőmérsékletfüggése a működési tartományban.

4 Nyomtatott áramkör

4.1 Rétegek

Egy panel tervezésénél fontos, hogy az aktuális alkalmazáshoz megfelelő rétegszámot és rétegelrendezést válasszunk. Ezen paraméterek meghatározásánál több befolyásoló tényezőt is figyelembe kell venni. Három fő szempont alapján már egészen jól megalapozott döntést hozhatunk. Az első, hogy a kapcsolás mennyire bonyolult, egységnyi felületen hány különálló kapcsolatot kell létrehozni, illetve mennyire bonyolult alkatrészeket használunk. Ilyenkor kell számításba venni, hogy az eszköz stabil működését mennyire befolyásolja a fizikai megvalósítás. Például szükséges-e a panel teljes felületén egy egységes GND réteg kialakítására, illetve esetünkben – mivel nem csak kis áramú jeleket használunk – a vezetékek terhelhetőségét is figyelembe kell venni áramvezetési, melegedési szempontból.

Egy másik tényező lehet, hogy mennyire kritikus a tervezési idő. Egy bonyolultabb kapcsolás esetén, ha alacsonyabb rétegszámnál maradunk, akkor még hosszas és gondos tervezéssel sem biztos, hogy elérhetjük egy nagyobb rétegszámú verzió stabilitását és minőségét, a tervezési idő pedig többszöröse is lehet egy nagyobb rétegszámmal készülőhöz képest.

A harmadik fontos szempont az ár. Abban az esetben, ha a tervezett eszköz nagy darabszámban készül, érdemes a rétegszámot minél jobban leszorítani, mert ezzel jelentősen csökkenthetőek a gyártási költségek. Ugyanakkor egy kis darabszámban készülő eszköz esetén lehet, hogy fontosabb a mihamarabbi rendelkezésre állás, hogy például egy tesztet el lehessen kezdeni futtatni rajta.

4.2 Tervezési irányelvek

Eben a részben a panel megtervezésének folyamatát fogom részletesen bemutatni.

Itt az első lépés az volt, hogy a mérethez vonatkozó követelményeknek megfelelően beállítsam a munkaterületet. Ezt követően kijelöltem egy keretet, amin kívülre nem kerülhetett alkatrész vagy huzalozás. Ez a keret a panel függőleges helyzetét alapul véve, az alsó, felső és hátsó éltől 5-5 mm-re került, és azt a célt szolgálta, hogy amikor a panel bekerül a dobozba belüli rögzítő sínbe, semmilyen sérülés ne érhesse.

Az első oldalon más szempontokat kellett figyelembe venni. Itt a fő feladat az volt, hogy a csatlakozók, gombok és a visszajelző LED megfelelő mértékben legyen a panel szélén túllógatva. Ezt a túlnyúlást egy majdnem 1,5 mm vastagságú előlaphoz igazítottam, aminek síkjába ilyen módon a csatlakozók besimulnak, a gombok pedig kilógnak annyira, hogy kényelmesen elérhetőek legyenek. Itt arra is kellett figyelni, hogy elég hely maradjon a panel sarkainál az előlap rögzítésére szolgáló füleknek és furatoknak.

Amikor a megfelelő fizikai határok már megszülettek a tervezésre vonatkozó szabályok definiálása következett. Ezek segítségével ellenőrizhető, hogy a panelen nincsenek-e hibák, illetve beállíthatóak az alapértelmezett méretek. A tervezőprogram nagyon részletes szabálybeállítást tesz lehetővé, amelynek köszönhetően akár alkatrészenként vagy vonalanként meghatározhatunk tűréseket, alapértelmezéseket.

Itt az első feladat a teljes panelre vonatkozó globális alapértékek meghatározása volt, amelyet majd a szükséges esetekben finomítani lehet. Alapértelmezett mértékegységként millimétert választottam és a későbbiekben is mindig ebben adtam meg a szükséges méreteket. Az alapértelmezett huzalszélesség jelvezetékek esetében 0,25 mm lett mivel az összeköttetések nagy része sűrűn huzalozott területen volt és ez illeszkedett a két controller illetve szinte minden más alkatrész pad-jeinek szélességéhez. Az alapértelmezett via méretei: 0,3 mm-es furat és 0,25 mm-es maradékgyűrű lettek.

Ezekről a méretektől lényegesen csak a különböző tápfeszültségek és az Ethernet vezetékai tértek el. A tápfeszültség esetében a megfelelő áramvezetés érdekében lettek szélesebbek a vezetékek, illetve esetükben sok helyen lettek egész vezető felületek kialakítva. Ezek célja a FET-ek, a GDU és a 3,3 V-os feszültséget előállító DC-DC konverter esetében főleg a megfelelő hűtést szolgálták. A panel alsó és felső oldalán is megtalálható földpotenciálra kötött kitöltés célja, hogy valamennyi védelmet és árnyékolást adjon panel többi részének illetve a gyártásnál előnyös, mert kevesebb rézet kell leoldani a felületről.

Az Ethernet esetében a nagysebességű jelek miatt impedanciaillesztett jelvezetésre volt szükség. Itt a kész panel paramétereit is figyelembe véve a Saturn PCB Toolkit segítségével kalkulált vonalvastagságot és vonalak közötti helyet használtam. Az Altium-ban erre a célra van egy külön definiálható szabály, amelynek megfelelő konfigurálását követően egyszerre húzhatjuk a vezetékpárt, amelyre a beállított paramétereket a program automatikusan alkalmazza. Mivel jelen esetben a nagy frekvencia (200MHz) miatt a hullámhossz összemérhetővé vált a jelúttal, ezért fontos volt, hogy a jelpárhoz tartozó két vezeték hosszában ne legyen 1mm-nél nagyobb eltérés. Ez a két jelpár egyikénél nem jelentett gondot, viszont a másik párnál a rövidebb vezetékbe már be kellett iktatni egy rövid toldást. Ezeknél a jeleknél fontos, hogy minél kevesebb törés legyen a vezetékben, mert így alacsonyabb a reflexió kialakulásának valószínűsége. Ennek érdekében, ezen jelpárok vezetése a máshol használt általános 45 fokos törésekkel rendelkező egyenes helyett, folyamatosan ívelt vezetéssel lett megvalósítva. Az Ethernet csatlakozója és az XPort esetében nem csak az alsó és a felső rétegen, hanem a belső, táp és GND rétegen is kivágásokat készítettem annak érdekében, hogy a nagyfrekvenciás jelek által keltett zajok ne jussanak át ezekre a rétegekre.

Ugyan az SPI sebessége elmarad az Ethernet-étől, itt is fontos, hogy a lehető legkevesebb töréssel és oldalak közötti átvezetéssel legyen kivitelezve a hozzá tartozó vezetékezés. Ezért is élvezett a vezetékezés során prioritást a többi, lassúbb jellel szemben. A két controller közötti kapcsolatnál a relatív kis távolság miatt ez nem volt probléma, de mivel a digitális-analóg átalakító már elég távol került a TM4C kontrollertől, itt az órajel szórt zajának elnyomásának és a jelvezeték védelmének érdekében plusz GND vezetékek kerültek a jelvezeték közé és köré.

Mivel a panel tervezésénél a kezdettől fogva szempont volt, hogy átlátható és kézzel könnyen ültethető legyen, fontos volt, hogy minden alkatrészhez tartozzon megfelelő jelölő felirat és rajzjel. Ahhoz, hogy ezek a kontrollerek környékén lévő nagyobb alkatrészsűrűségű helyeken is olvashatóak legyenek és el is férjenek, a legkisebb, még olvasható méretet kellett választanom a feliratok esetén, így ezek 1mm magasak és 0.2mm vonalvastagságúak lettek. Az alkatrészekhez tartozó jelölések esetén törekedtem a minimális plusz méretre az alkatrész fizikai, külső méretéhez képest. Az olvasható, letisztult elrendezést az egyedi feliratokkal rendelkező tesztpontok is nehezítették. A tesztpontok elhelyezésénél figyelni kellett arra, hogy ne befolyásolják negatív irányba a jel elektromos tulajdonságait. Ahol lehetett ott a tesztpontokkal amúgy is szükséges viás átvezetéseket váltottam ki, hogy helyet spóroljak, illetve hogy minél kevesebb furatot kelljen készíteni. Az olyan jelek esetében ahol hosszabb jelút állt rendelkezésre, igyekeztem a tesztpontokat a kevésbé sűrű részekre elhelyezni.

A TM4C controllerhez tartozó 25 MHz-es kristály alatt külön kitöltött rétegeket hoztam létre és ezeket leválasztottam a nagyobb felületekről, hogy a kristály frekvenciája ne jelenjen meg zajként a többi rétegen. Az ezen a részen elhelyezett három via is ezt a célt szolgálja.

Amikor az elrendezés és a huzalozás elkészült, utolsó lépésként elhelyeztem a cég logóját és a panel rendeltetésére utaló nevet egy – a vezetékezés során kihasználatlanul hagyott – erre alkalmas felületre. Itt főleg esztétikai szempontok alapján jártam el. Ahhoz, hogy az eredmény szép legyen, fontos volt, hogy ne kerüljön semmilyen más vezeték vagy kitöltés azokra a helyekre, ahova a logó és felirat került. Mivel nem használtam ki a tervezés során a panel teljes felületét, megtehettem, hogy ezeket az elemeket az aranyozott rézfólián helyeztem el és nem csak egyszerű fehér szitanyomtatással kerültek fel a panel felszínére.

4.3 Háromdimenziós modell

A háromdimenziós megjelenítés, egy hasznos és fontos funkció, amely mind a panel megtervezése során mind pedig az ezt követő, illetve ezzel párhuzamosan zajló munkafolyamatokban komoly segítség lehet.

A tervezés során láthatjuk az alkatrészek egymáshoz képesti helyzetét, amely a layouton lévő footprinteket nézve nem mindig egyértelmű. Például, ha a panelen elhelyezünk egy kapcsolót láthatjuk, hogy a környező alkatrészek nem gátolják-e az elérését. Az is előfordulhat, hogy ugyan könnyen elérjük a nyomógombot, de azzal, hogy odanyúlunk valamilyen érzékeny alkatrészhez hozzáérve kárt tehetünk a kapcsolásban. Az ilyen eseteket könnyen elkerülhetjük, ha úgy látjuk magunk előtt a modellt, mintha már a kész eszközt tartanánk a kezünkben.

Sok elkészült panelhez készül valamilyen dobozolás vagy legalább egy előlap. Ezek megtervezésénél szintén komoly segítséget nyújthat a háromdimenziós modell megléte, ugyanis a modellt nem csak megnézni, hanem exportálni is lehet más programok számára. Az így kapott fájlokat valamilyen CAD programba beolvasva, leolvashatjuk a szükséges méreteket, ezzel megkönnyítve a tokozást vagy előlapot készítő gépész munkáját.

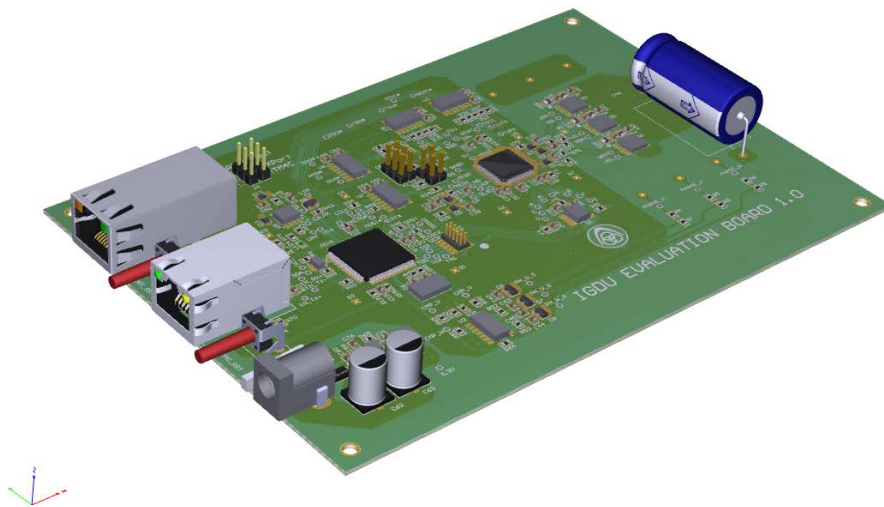
Ugyanez fordítva is működik, amennyiben adott méretű, formájú helyre kell elhelyezni a panelt, egy CAD programból importálhatjuk a doboz vagy a panel vázlatát és ez alapján generálhatjuk a panelt.

Egy pontos háromdimenziós modell mindezekre kitűnően alkalmas, de fontos, hogy a használt komponensek pontosan legyenek méretezve, amit ajánlott felhasználás előtt ellenőrizni. Szerencsére egyre több gyártó ad ki saját modelleket az általuk készített alkatrészekhez és ezeket le lehet tölteni a honlapjukról. Abban az esetben, ha így nem találjuk meg a keresett alkatrészt, még mindig ott vannak az egyre bővebb online gyűjtemények, mint például az általam is többször használt *3D ContentCentral* [19]. Itt szinte minden szükséges modellt megtaláltam. Mivel az ilyen oldalakra bárki szabadon tölthet fel modelleket, ezeket mindenképpen érdemes leellenőrizni, hogy tényleg egyeznek-e az általunk használni kívánt alkatrésszel.

A tervezés során a panel modellje nem csak megtekinthető, hanem szerkeszthető is, így például a feliratokat, amelyek az alkatrészekhez tartoznak könnyebb elrendezni, főleg ha egy nagyobb alkatrész-sűrűségű panelről van szó.

Abban az esetben is komoly segítség lehet ez a megjelenítési forma, ha az alkatrészek nem csak egymás mellett, hanem átfedésben, részben vagy egészben egymás felett helyezkednek el. Ilyen elrendezés például ebben az eszközben is található a tápfeszültség meglétét jelző LED-nél, ami fölé egy lightpipe van elhelyezve, amely a LED fényét 90°-ban megtörve kivezeti az előlap irányába a panel síkjából.

A háromdimenziós modell további előnye, hogy az eszközt ugyan kézbe nem foghatjuk de élethű képet kapunk a majdani kinézetéről. Ezt esetemben is jól szemlélteti a 8. és 9. ábra. Az Altium képes olyan pdf fájlt generálni, amelyben ez a modell több szögből, több nézetben is megjeleníthető. A függelék végén elhelyeztem egy ilyen interaktív oldalt is.



8. ábra. Az eszköz háromdimenziós modellje



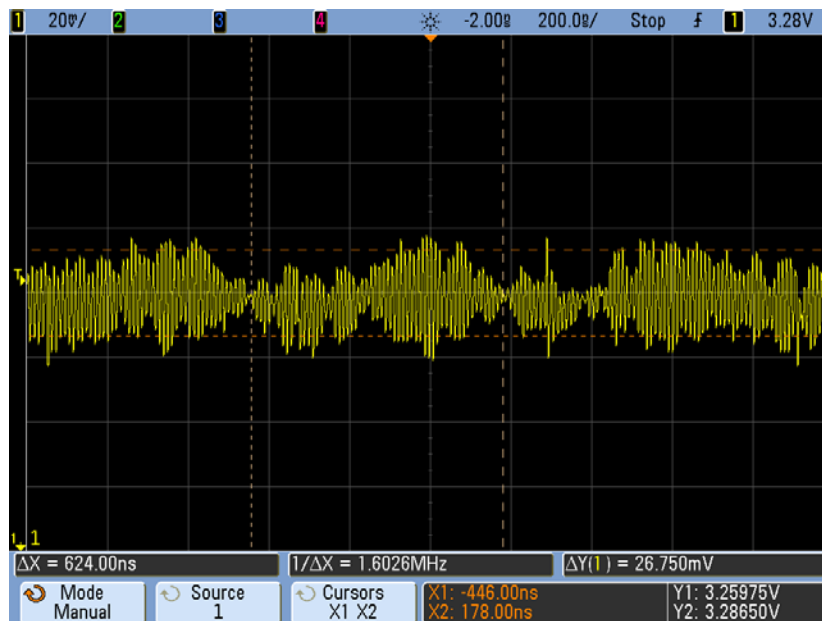
9. ábra. Az elkészített eszközről készült fénykép

5 Az eszköz élesztése

Az alkatrészek beültetése több lépésben zajlott, annak érdekében, hogy az esetleges hibákat egyszerűbb legyen megtalálni és kijavítani. Ezzel a módszerrel jelentősen le lehet rövidíteni az élesztés idejét egy prototípus panel esetében.

Első lépésként a tápáramkör elemeit ültettem be a panelra, hogy az első bekapcsolásnál lehessen látni, hogy megfelelően működik. Ez azért fontos, mert a tápegységre közvetlenül rá van kötve több, drága alkatrész is, amelyek túl nagy tápfeszültség vagy nem megfelelően szűrt, lengő tápfeszültség esetén tönkremehetnek.

Mivel az 5 V-os tápot az intelligens GDU stabilizátora állítja elő, ezzel a módszerrel csak a 3,3 V-os DC-DC átalakítós tápot tudtam letesztelni. Az első bekapcsolásnál először egy multiméterrel, majd ezt követően oszcilloszkóp segítségével is ellenőriztem a helyes működést. A mérés közben készített kép a 10. ábrán látható. Mivel minden mért érték a megadott határértéken belül volt, ezt a fázist befejezettek tekintettem.

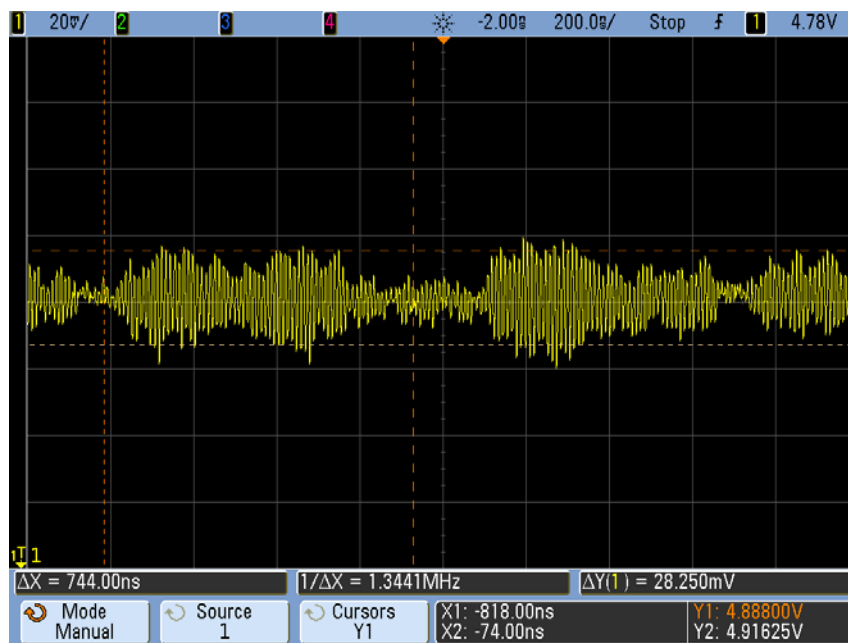


10. ábra. 3,3 V-os tápfeszültség ellenőrzése oszcilloszkóppal

Ezt követően beültettem a két kontrollert és minden más kiegészítő áramkört, amely a 3,3 V-os tápfeszültséget használja, és az összes többi passzív alkatrészt is. Ezt követően a következő indításnál már fel tudtam programozni a processzorokat. Először a TM4C controllerhez csatlakoztattam a debugger-t, amellyel sikerült kapcsolatot

létesíteni a számítógép és a kontroller között, majd letöltöttem a kontrollerbe az általam már előre megírt tesztprogramot, amely egy alapszintű ethernet kommunikációt tett lehetővé. A letöltést követően a megfelelő regiszterekből kiolvasható az eszköz MAC címe, amely alapján azonosítható a hálózaton. Amikor az csatlakozik a hálózatra, DHCP szervertől kér IP címet. Amikor a kapcsolat létrejött, a kapott címet automatikusan kiírja a debug konzolon és így a tesztelési fázisban könnyen kapcsolódhatunk hozzá a MAC cím ismerete/használata nélkül is. Ezt követően egy egyszerű konzolos programmal karakteres parancsokat küldve, be- illetve kikapcsolhatjuk a panelen elhelyezett négy darab debug célokra elhelyezett LED-et

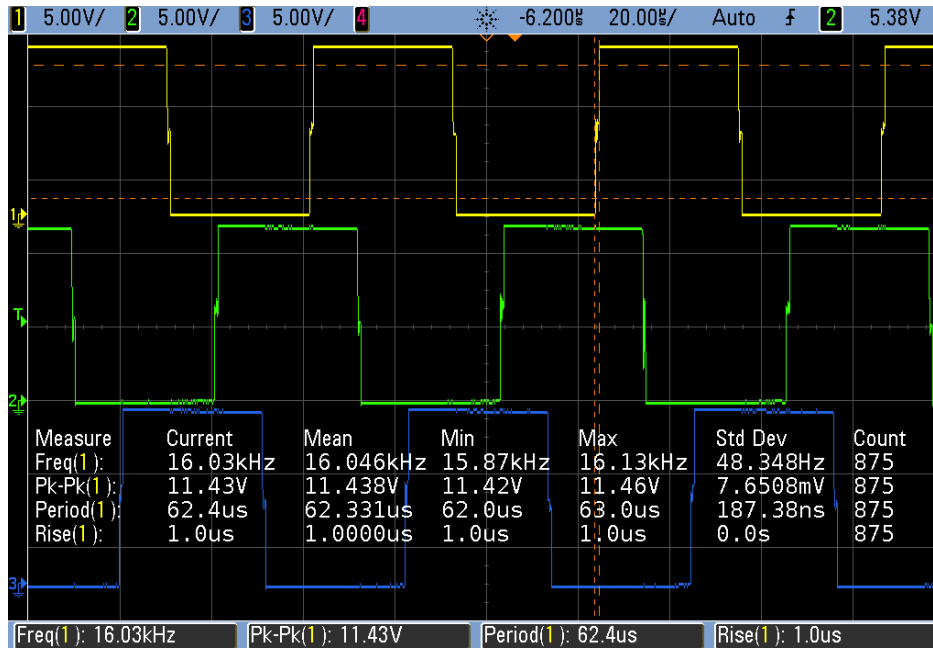
Következő lépésként az intelligens GDU-ra is letöltöttem egy tesztprogramot. Ennek működését oszcilloszkóppal ellenőriztem. Ezután leellenőriztem az 5 V-os stabilizátor kimenetét is, és miután ezt is rendben találtam, következhetett a beültetés következő lépése. Az 5 V-os tápfeszültség oszcilloszkópos bemérése a 11. ábrán látható.



11. ábra. 5 V-os tápfeszültség ellenőrzése oszcilloszkóppal

Felkerültek az 5 V-os tápot használó elemek is, illetve a GDU kimeneteire a teljesítmény FET-ek. Ezt követően újra oszcilloszkópos mérést végeztem. Az intelligens GDU-ra korábban feltöltött teszt kód alapértelmezésben a három fázisnak megfelelően három, egymáshoz képest 120°-kal eltolt 50%-os kitöltési tényezőjű jelet ad ki. A FET-ek beültetését követően ezt már le tudtam ellenőrizni. A mérés sikeres volt, az

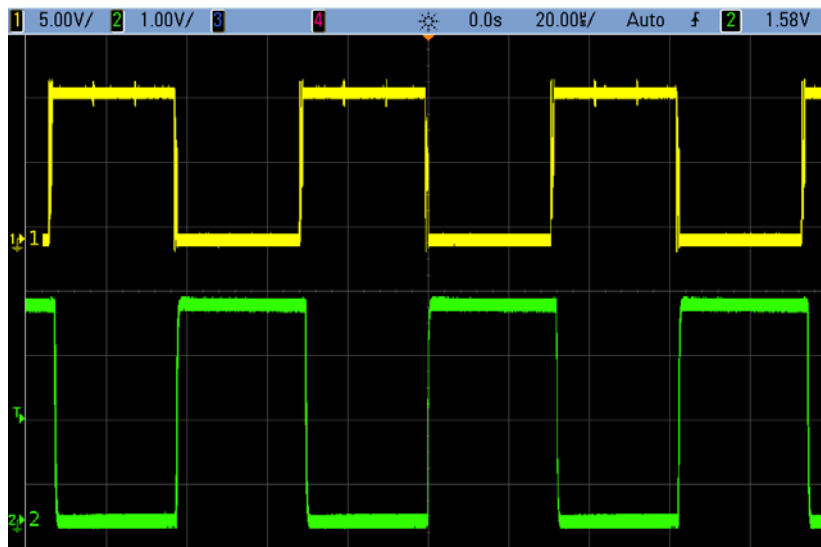
oszcilloszkópon az elvárt jelalakokat és időzítéseket mértem, amint az a 12. ábrán is látható.



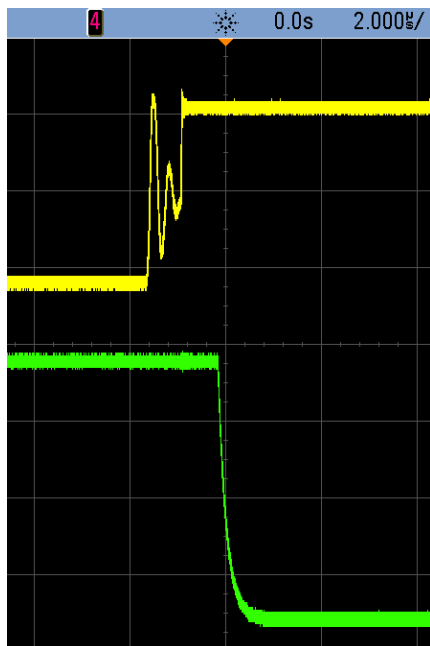
12. ábra. PWM kimenetek ellenőrzése oszcilloszkóppal

Utolsó lépésként a teljesítmény ellenállásokat ültettem be. Az ezt követő bekapcsoláskor ellenőriztem az áramfelvételt, és egy erre alkalmas multiméterrel megmértem a kritikus alkatrészek (teljesítmény ellenállások, FET-ek, GDU, DC-DC) hőmérsékletét. Minden elem az elvárásoknak megfelelően működött, és a hőmérsékletek sem növekedtek az elvárt értékek fölé.

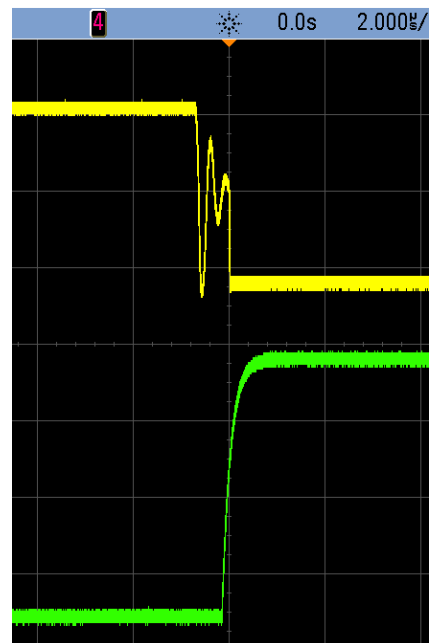
Ezt követően még ellenőriztem a komparátorok működését, illetve a hiszterézis helyes beállítását is. Ebben az esetben is mindent rendben találtam, a jelváltások körüli lengést sikerült kompenzálni. A komparátorok be és kimeneti jelei a 13. ábrán láthatóak. Ezekből a jelekből külön kiemelve a fel-és lefutó élek a 14. és 15. ábrán láthatóak.



13. ábra. 1. jel: U fázishoz tartozó PWM jel; 2. jel: komparátor kimenet



14. ábra. Felfutó él kinagyítva



15. ábra. Lefutó él kinagyítva

6 Konklúzió és kitekintés

A tesztrendszer létrehozásához elsőként megismertem a tesztelni kívánt mikrokontrollert. Ehhez részletesen áttanulmányoztam a controller adatlapját és már meglévő alkalmazásait, illetve az ezzel a controllerrel szerelt fejlesztőkártyákat. Ezt követően elkészítettem a tesztkörnyezet logikai rendszertervét, és az arra vonatkozó követelményrendszert. Ezek alapján már el tudtam készíteni a rendszer blokkvázlatát. A blokkvázlat és a kidolgozott követelményrendszer alapján kiválasztottam a leginkább megfelelő alkatrészeket. Ezt követően elkészítettem az alkatrészek adatlapjai alapján a megfelelő alkatrészkönyvtárakat a kapcsolási rajzhoz és a paneltervhez. A könyvtárak felhasználásával elkészítettem a kapcsolási rajzot, majd a nyomtatott áramkör tervét.

Amikor a panel elkészült, saját kezűleg beültettem az alkatrészeket miközben szakaszosan elvégeztem az eszköz élesztését is. Először csak a tápáramkört ültettem be. Amikor megbizonyosodtam annak helyes működéséről, következhetek a kontrollerek. Itt már tesztprogramok segítségével ellenőriztem a teljesítményelektronika helyes vezérlését. Amikor ezt is rendben találtam befejeztem a beültetést és még egyszer ellenőriztem a működést. A sikeres élesztést követően funkcionálisan leteszteltem a rendszert néhány egyszerűbb teszt kód segítségével.

Az eszköz tesztelése pozitív eredménnyel zárult, ezáltal kiderült, hogy a megépített hardver alkalmas a magasabb szintű feladatok elvégzésére is. Ehhez az implementált motorszimulációs kódot le kell tölteni a szimulációt végző mikrokontrollerbe, ki kell alakítani a megfelelő kommunikációt a tesztrendszer távoli eléréséhez, és létre kell hozni a két controller közötti kapcsolatot.

Mivel ez a típusú tesztelés nem csak ennél a konkrét motorvezérlő egységnél előnyös, a jövőben a rendszert át lehet tervezni egy kicsit szabadabban felhasználható, univerzális tesztrendszerre, amelyen nem lenne fixen beültetve a tesztelt controller. Helyette a tesztkártyára kerülhet valamilyen szabványos csatlakozó, aminek segítségével minden szükséges jelet és tápvezetékét át lehet vezetni egy kiegészítő panelre, amin csak a tesztelt kontrollert és a hozzá szorosan kapcsolódó elemeket kell elhelyezni.

Irodalomjegyzék

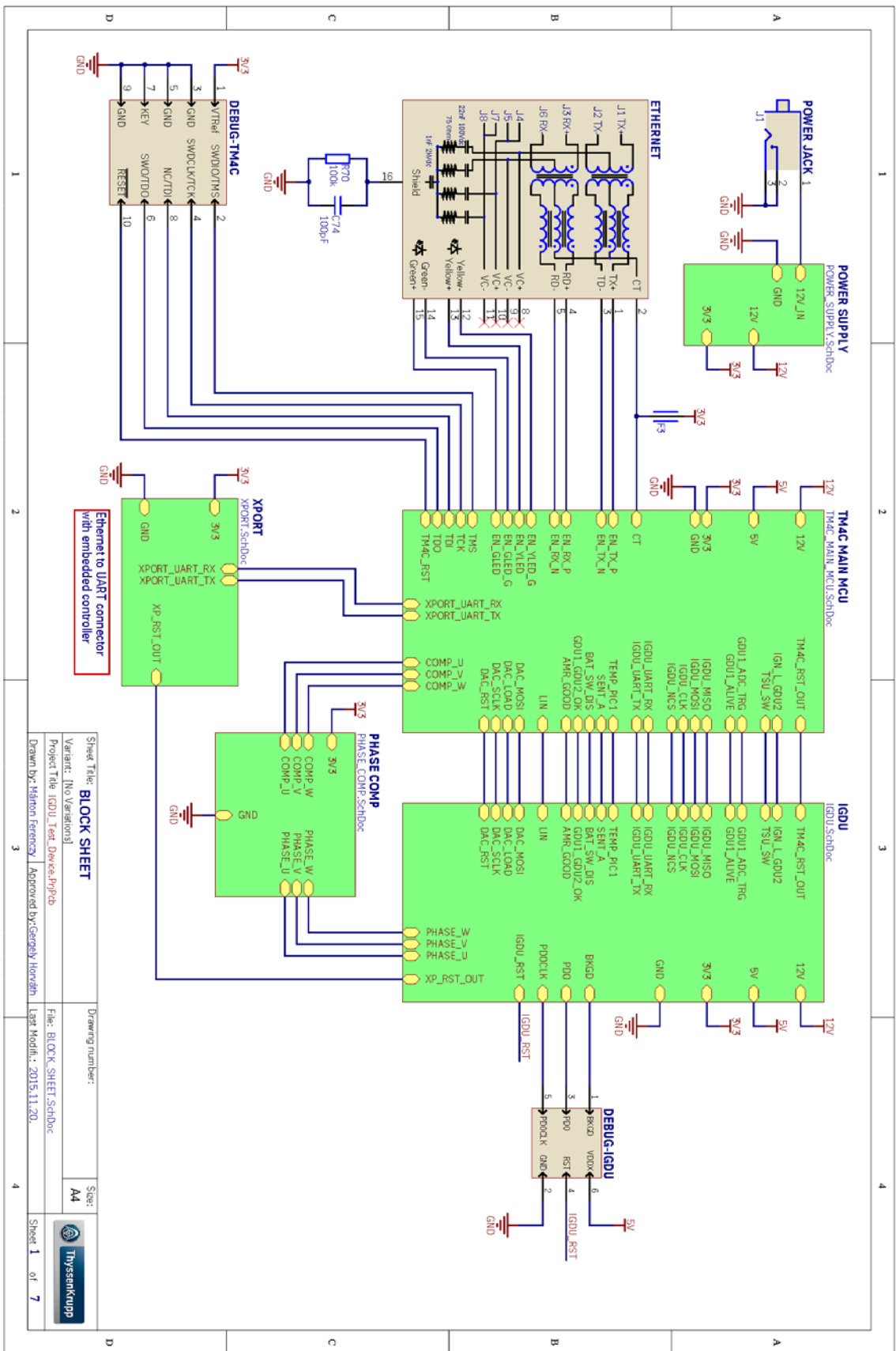
- [1] C. Gencer and M. Gedikpinar, 2006. Modeling and Simulation of BLDCM Using MATLAB/SIMULINK. *Journal of Applied Sciences*, 6: 688-691.
<http://scialert.net/abstract/?doi=jas.2006.688.691>
- [2] Lantronix XPort B11 Rev. J (2013),
<http://www.lantronix.com/products/xport/>
- [3] Bosch Media Service: Bosch raises efficiency of small electric motors (2011. 09. 13.)
<http://www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=5297&locale=en>
- [4] Freescale S912ZVML12F1MKH intelligens GDU Rev. 2.2 (2015)
<http://www.freescale.com/products/more-processors/16-bit-mcus/s12-magni-mixed-signal-mcusmagniv/s12zvm-mixed-signal-mcu-for-automotive-industrial-motor-control-applications:S12ZVM>
- [5] LIN Consortium LIN Specification Package Rev. 2.2A (2010)
- [6] Texas Instruments TM4C129ENCPDTI3 Mikrokontroller Rev. B (2014)
<http://www.ti.com/product/tm4c129encpdt>
- [7] Texas Instruments TI RTOS 2.14 User's Guide (2015 October)
<http://processors.wiki.ti.com/index.php/TI-RTOS>
- [8] ARM Cortex M szériás mikrokontrollerek
<https://www.arm.com/products/processors/cortex-m/index.php>
- [9] Wikipédia: Ethernet MAC cím leírás
https://en.wikipedia.org/wiki/MAC_address
- [10] Microchip 24AA02E48 EEPROM Rev. F (2015)
<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?product=24AA02E48>
- [11] Texas Instruments TPIC1021 LIN transceiver Rev. D (2015)
<http://www.ti.com/product/tpic1021>
- [12] Linear Technology LTC2600 Rev. E (2010)
<http://www.linear.com/product/LTC2600>
- [13] Texas Instruments TXB0104 szintillesztő áramkör Rev. G (2014)
<http://www.ti.com/product/txb0104>
- [14] Microchip MCP6564 komparátor Rev. C (2013)
<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?product=MCP6564>
- [15] Lumberg DC Jack csatlakozó
http://www.lumberg.com/main/common/produkt_fs.asp?lang=eng&produktname=1613_21&wg=016&cat=4&newWin=1

- [16] Dialight lightpipe
<http://www.dialight.com/Product/Details/445026/5151105F>
- [17] Linear Technology LT3973-3.3 Rev. B (2015)
<http://www.linear.com/product/LT3973>
- [18] NXP BUK6K6R8-40E teljesítmény MOSFET (2013)
http://www.nxp.com/products/mosfets/automotive_mosfets/BUK7K6R8-40E.html
- [19] 3D Content Central: online modell gyűjtemény
<http://www.3dcontentcentral.com/>

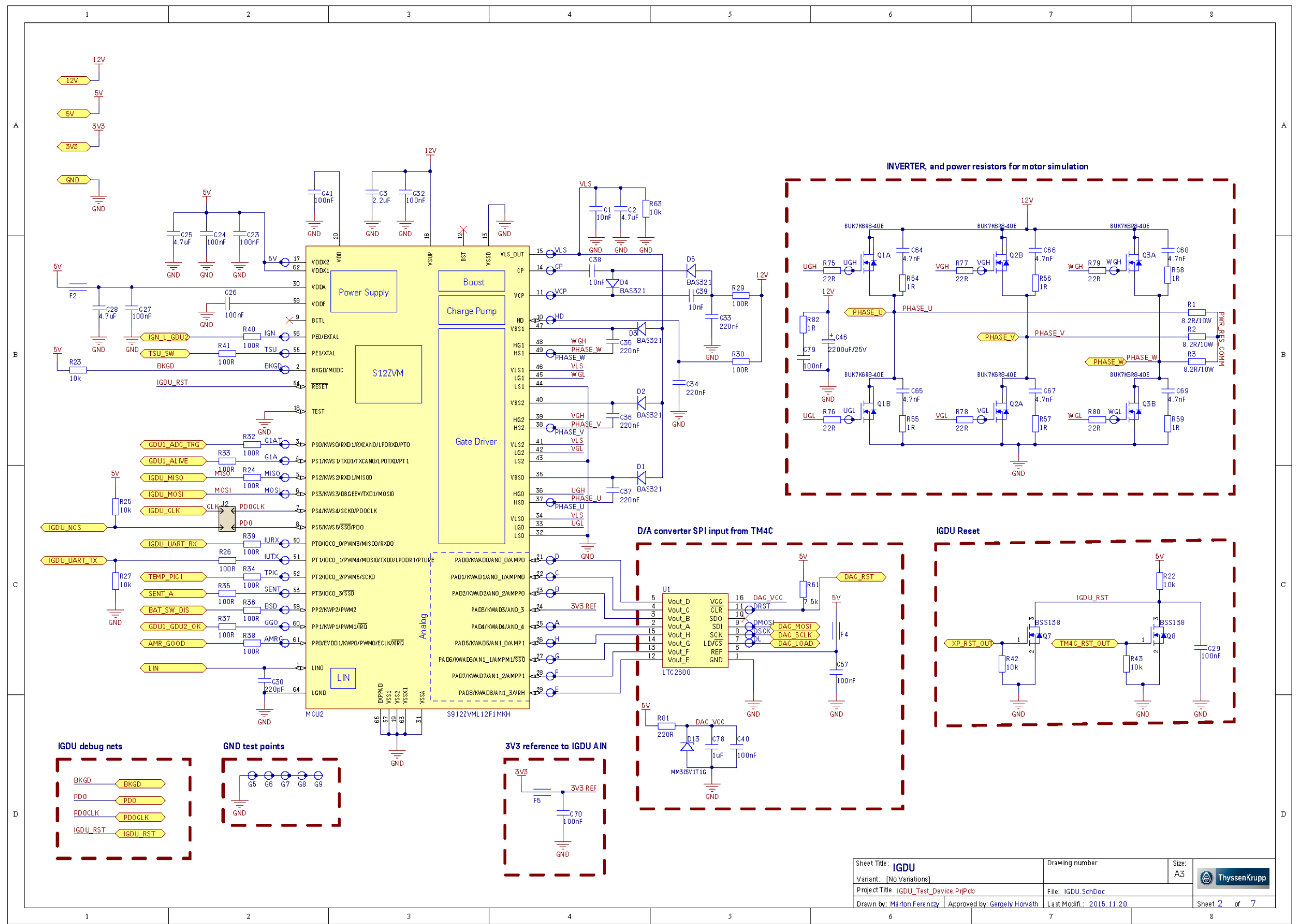
Ábrajegyzék

1. ábra. A teszrendszer használatának sematikus folyamatábrája	10
2. ábra. Rögzítő doboz illusztráció	12
3. ábra. Az eszköz blokkvázlata.....	15
4. ábra. Félgrafikus konfigurációs felület	20
5. ábra. Az XPort belső felépítése.....	28
6. ábra. Komparátor invertáló kapcsolása.....	31
7. ábra. Hiszterézis szemléltető állapotátmeneti ábra.....	31
8. ábra. Az eszköz háromdimenziós modellje	46
9. ábra. Az elkészített eszközről készült fénykép	47
10. ábra. 3,3 V-os tápfeszültség ellenőrzése oszcilloszkóppal	48
11. ábra. 5 V-os tápfeszültség ellenőrzése oszcilloszkóppal	49
12. ábra. PWM kimenetek ellenőrzése oszcilloszkóppal.....	50
13. ábra. 1. jel: U fázishoz tartozó PWM jel; 2. jel: komparátor kimenet	51
14. ábra. Felfutó él kinagyítva	51
15. ábra. Lefutó él kinagyítva	51
16. ábra. Block sheet.....	57
17. ábra. Intelligens GDU és környezete	58
18. ábra. TM4C kontroller és környezete	59
19. ábra. TM4C kontroller tápja és egyéb kiegészítő áramkörei	60
20. ábra. Komparátor áramkörök.....	61
21. ábra. XPort	62
22. ábra. Táp bemenet és DC-DC konverter.....	63

Függelék

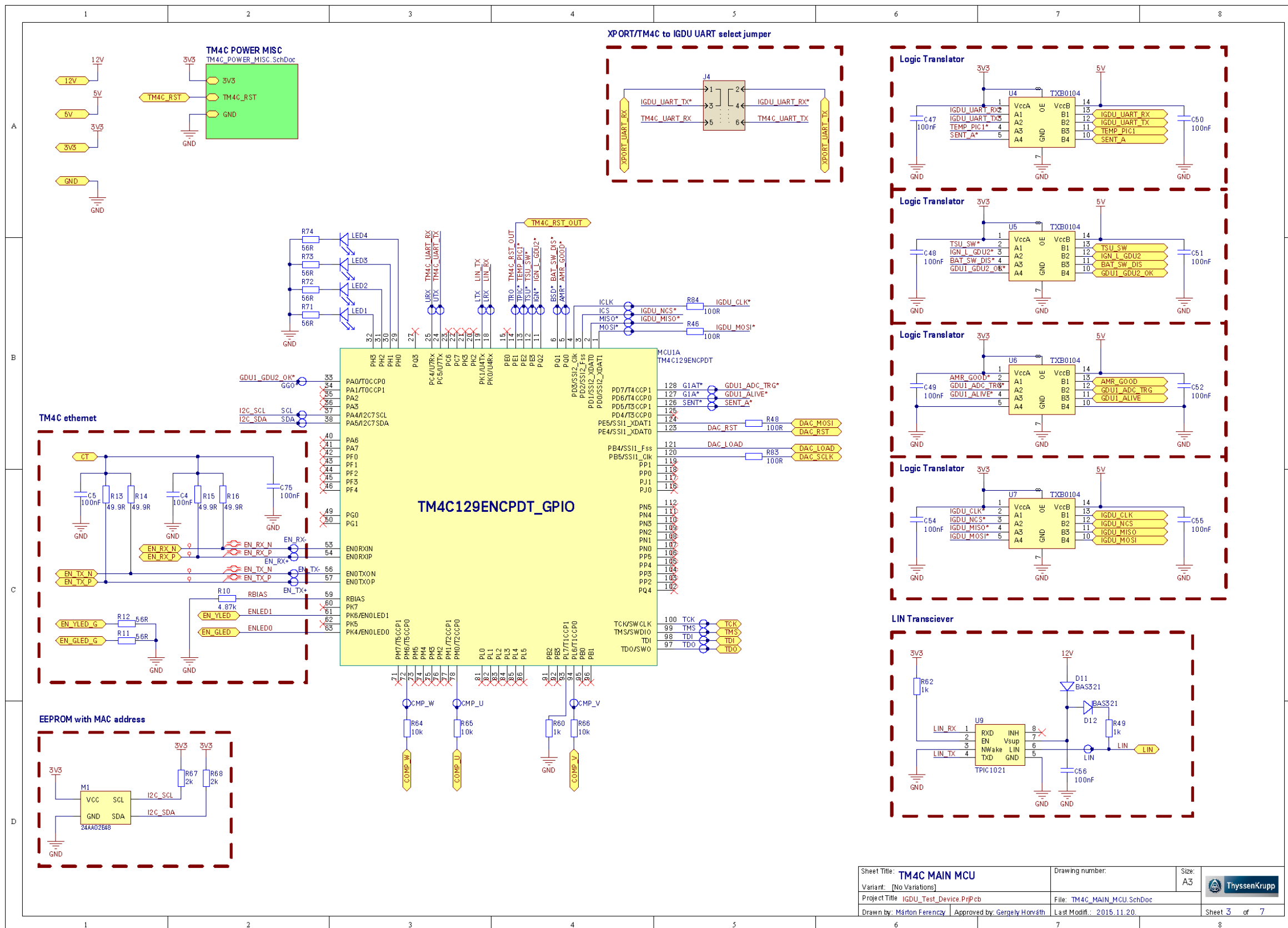


16. ábra. Block sheet



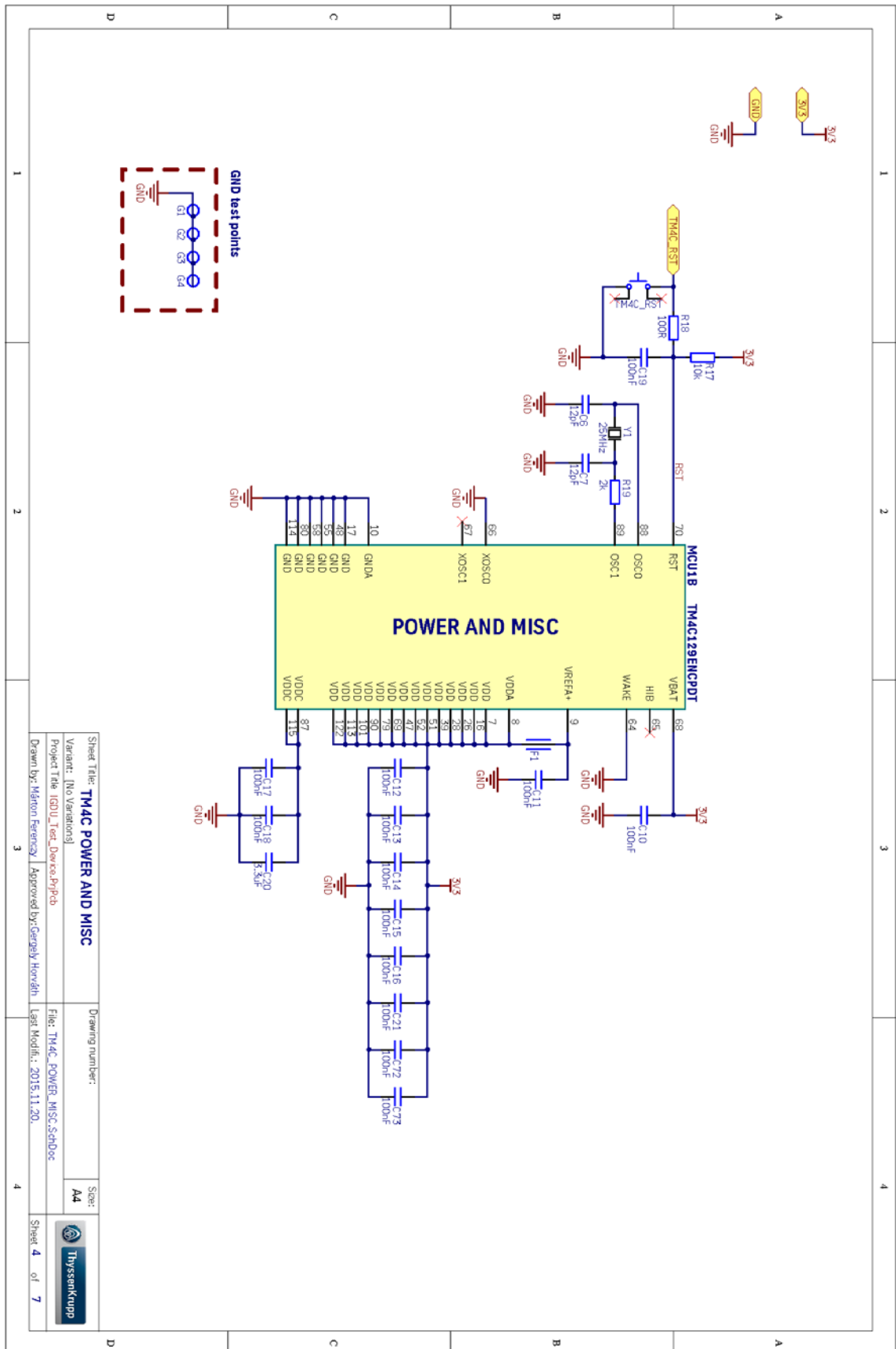
Sheet Title: IGDU	Drawing number:	Size: A3	
Variant: [No Variations]	File: IGDU_SchDoc	Sheet 2 of 7	
Project Title: IGDU_Test_Device.PrjPcb	Last Modifi.: 2015.11.20.		
Drawn by: Márton Ferenczy	Approved by: Gergely Horváth		

17. ábra. Intelligens GDU és környezete
58

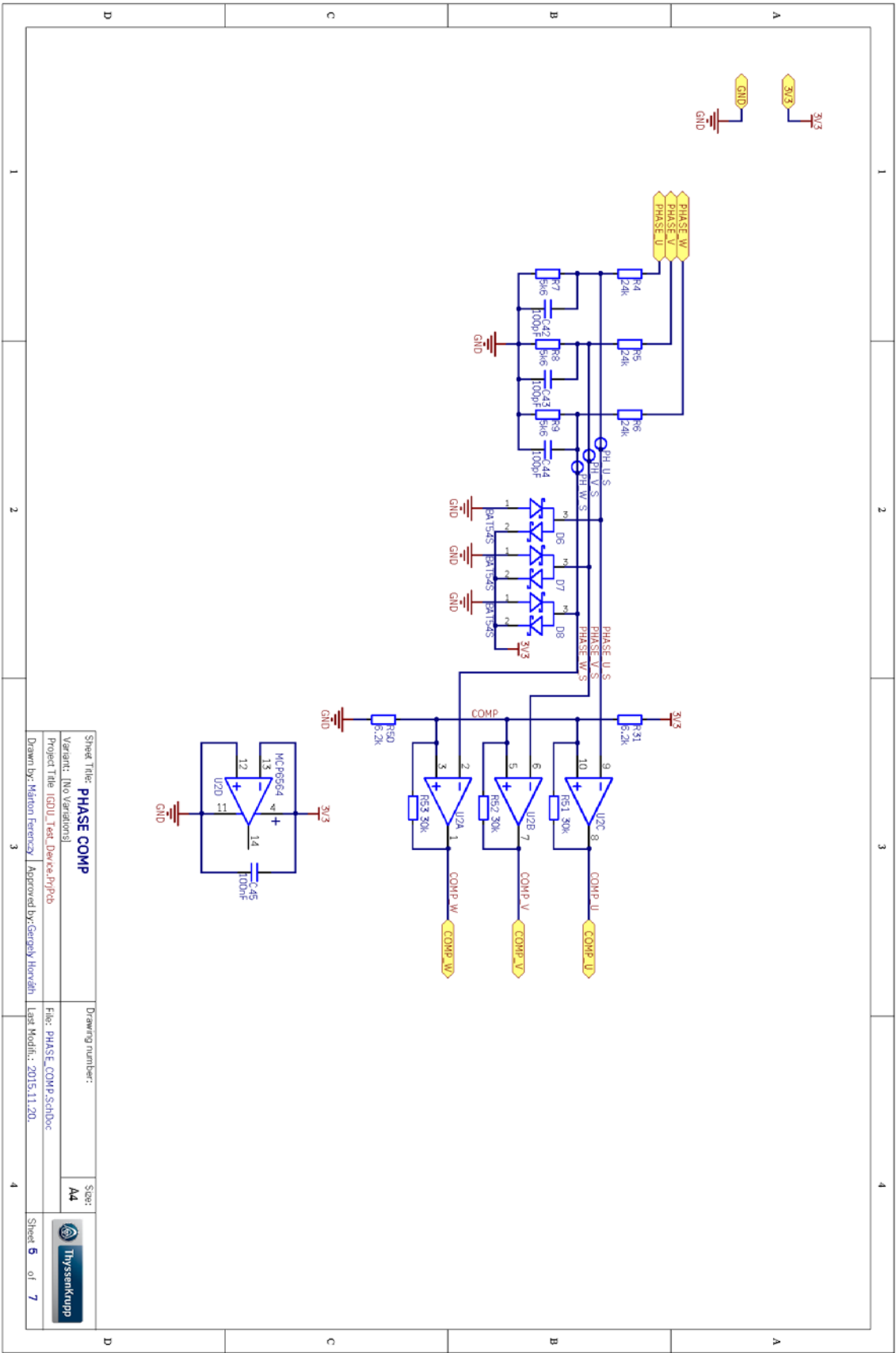


Sheet Title: TM4C MAIN MCU	Drawing number:	Size: A3	
Variant: [No Variations]	File: TM4C_MAIN_MCU.SchDoc		
Project Title: IGDU_Test_Device.PrjPcb	Last Modif.: 2015.11.20		
Drawn by: Márton Ferenczy Approved by: Gergely Horváth		Sheet 3 of 7	

18. ábra. TM4C kontrollér és környezete

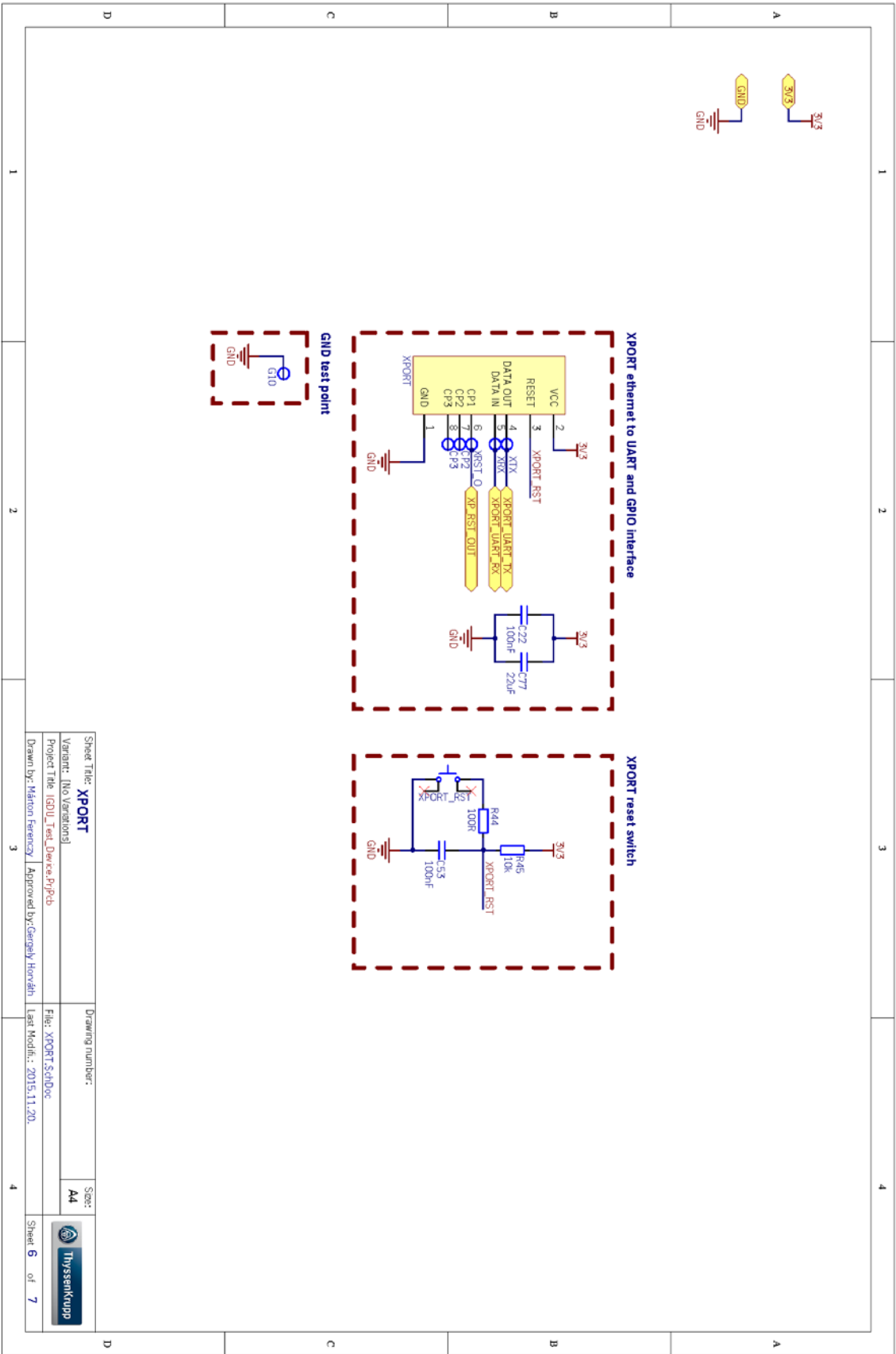


19. ábra. TM4C kontrollor tápja és egyéb kiegészítő áramkörei

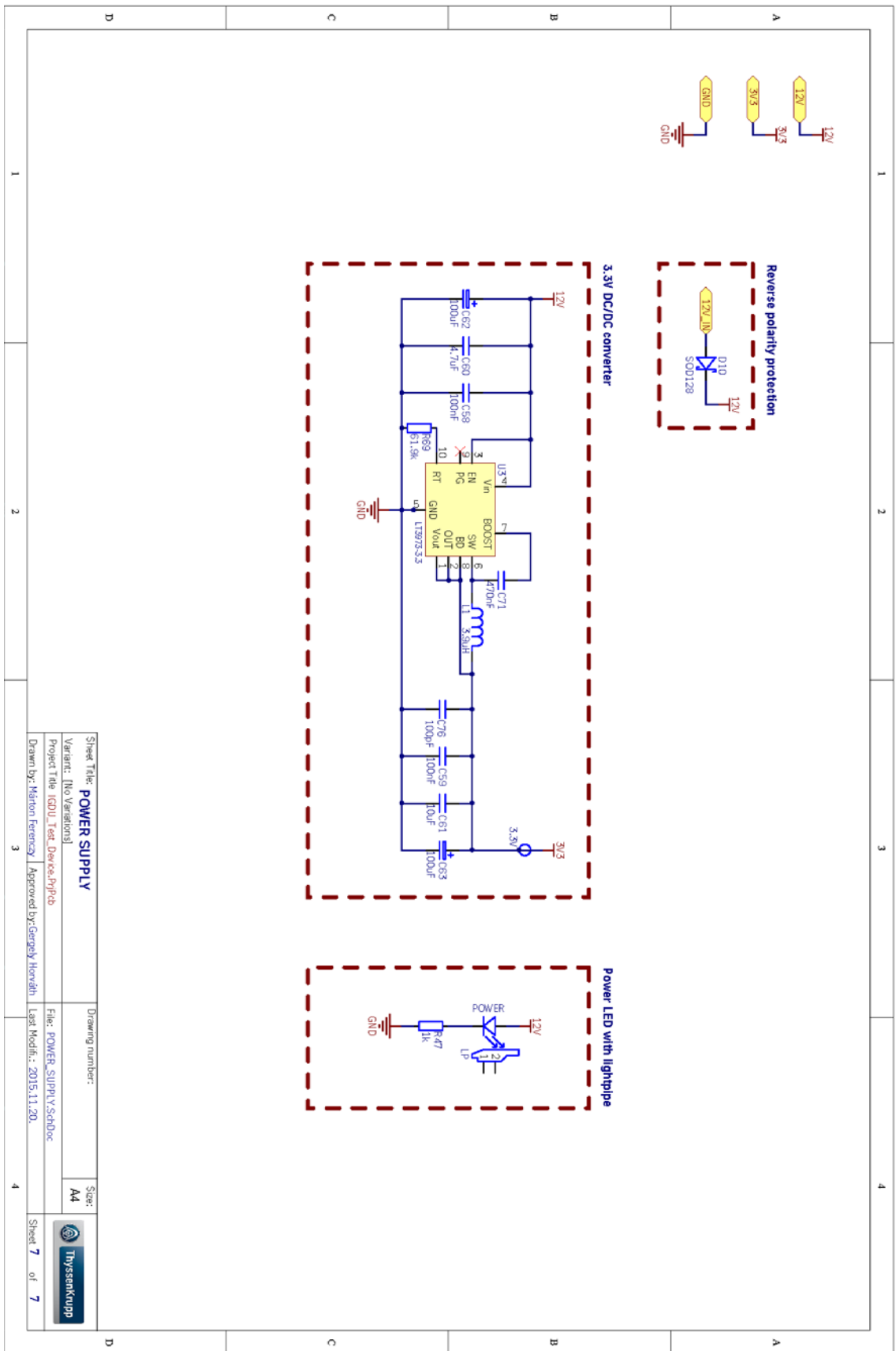


Sheet Title: PHASE COMP	Drawing number:
Variant: [No Variations]	Scale: A4
Project Title: [GDUU_Test_Devica.DyPcb]	File: PHASE_COMP.SchDoc
Drawn by: Márton Ferenczy	Approved by: György Horváth
Last Modifi.: 2015.11.20.	Sheet 5 of 7

20. ábra. Komparátor áramkörök



21. ábra. XPort



Sheet Title: POWER SUPPLY	Drawing number:	Scale:
Variant: [No Variations]		A4
Project Title [GDU_Test_Device]Pcb	File: POWER_SUPPLY.SchDoc	
Drawn by: Márton Ferenczy	Approved by: Szepely Horvath	Sheet 7 of 7
	Last Modif.: 2015.11.20.	

22. ábra. Táp bemenet és DC-DC konverter

