

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Elektronikai és Kommunikációs Rendszerek Intézet
Műszertechnikai és Automatizálási Tanszék



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

FÜGGVÉNYGENERÁTOR MIKROVEZÉRLŐVEL

Szerző: **Bessenyei Attila András**
villamosmérnök MSc. szak, II. évf.

Konzulens: **Molnár Zsolt (MAT)**
egyetemi tanársegéd

Budapest, 2022.

TARTALOMJEGYZÉK

1.	BEVEZETŐ, TÉMAVÁLASZTÁS	3
2.	FELADAT ÉRTELMEZÉSE, ALKATRÉSZVÁLASZTÁS	4
3.	SPECIFIKÁCIÓ	8
4.	KIDOLGOZÁS	9
4.1.	Rendszerterv	9
4.2.	Kapcsolási rajz	11
4.3.	Egységek	13
4.3.1.	Tápellátás.....	13
4.3.2.	Vezérlőegység	15
4.3.3.	Perifériák csatlakozása	16
4.3.4.	WiFi modul (opcionális).....	17
4.3.5.	Jelgenerálás és formálás	18
4.3.5.1.	Alap jelalak előállítás	18
4.3.5.2.	Alap jelalak és MCU-ból érkező PWM jel kapcsoló	19
4.3.5.3.	Jelszint egységesítő előosztó	19
4.3.5.4.	DC-AC átalakító és kapcsoló	20
4.3.5.5.	Jelszint állítás	21
4.3.5.6.	Jelszint erősítés kapcsoló.....	21
4.3.5.7.	Offset állítás	22
4.3.5.8.	Kimeneti áramerősítő	23
4.3.5.9.	Kimeneti impedancia kapcsoló.....	24
4.4.	Program	25
4.4.1.	Fejlesztés	25
4.4.2.	Működés	26
4.5.	Egyéb megoldási módok	27
5.	A PROJEKT FEJLESZTÉSI ELŐZMÉNYEI	28
6.	KIVITELEZÉS.....	30
6.1.	Nyomtatott áramkör tervezés, kivitelezés	30
6.2.	Mechanikai munkák, készülék építés	33
6.3.	Belső elrendezés és kábelezés	37
6.4.	Az elkészült berendezés	38
7.	ÁRAMKÖR ÉLESZTÉS ÉS KEZDETI BEÁLLÍTÁSOK.....	39
8.	ÖNÉRTÉKELES.....	43

8.1. Elért eredmények.....	43
8.2. Továbbfejlesztési lehetőségek, módosítások.....	44
9. ÖSSZEFOGLALÓ	46
10. SUMMARY	47
11. RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK	48
12. IRODALOMJEGYZÉK.....	49

1. BEVEZETŐ, TÉMAVÁLASZTÁS

A berendezés építésére több dolog is motivált, de leginkább 2 fő oka van, hogy ezt választottam. Egyrészt a hobbit is az elektronikai tervezés és építés, emiatt többször úgy éreztem, hogy jól jönne egy jelgenerátor az alkotásaim során. Másrészt pedig még nem építettem olyan áramkört, ami ilyen komplexitású, és ahol fontos szerepe van az akár MHz tartományú jelekkel való tervezésnek, ezért is gondoltam, hogy jó lenne magam képezni ezen a téren és sokat tanulhatok egy ilyen projekt által. Ezeken kívül megemlíteném, hogy mindig is érdekelt a készülék fejlesztés, minden lépésével együtt, legyen szó a tervezés kezdeti szakaszáról, mechanikai munkálatokról, vagy akár a dizájnról. Úgy gondolom hozzám legközelebb a hardverfejlesztés áll, ezt a fázist élvezem legjobban. Mindent egybevetve végül belevágtam. Több éven és tantárgyon átívelő múltja van a fejlesztésnek, az első verzió még sok sebből vérzett, de a bemutatásra kerülő második verzióban már ki lett küszöbölve minden probléma és ez már egy jól átgondolt és tesztelt koncepció. Az eszköz lényege, hogy teljesen digitális vezérlésű, ezáltal megoldható a távoli vezérlés egy opcionális WiFi modullal, vagy akár az USB kapcsolat is egy USB-soros modul beépítésével.

A fejlesztés a Projektmunka I. tárgy alatt kezdődött, akkor fogalmazódtak meg bennem az egész koncepció alapjai. Folytattam a fejlesztést Projektmunka II. tárgy alatt, majd a Diplomamunka I. alatt szintén. Ezen tárgyak alatt a konzulensem Braun Ferenc volt, aki sokat segített a munkám során, ezért ezúton is szeretnék neki köszönetet nyilvánítani.

A következőkben tehát egy saját készítésű függvénygenerátor nulláról való fejlesztése, megépítése és működése kerül bemutatásra. Ezek mellett kitérek a jövőbeni továbbfejlesztés lehetőségeire is. A projekt otthoni körülmények között készült, egyéni igények mentén tervezett és a megépítés utáni saját használat céljával.

2. FELADAT ÉRTELMEZÉSE, ALKATRÉSZVÁLASZTÁS

Mivel a berendezés teljesen otthoni felhasználásra és kizárólagosan saját alkalmazásra tervezem, így ennek megfelelően kellett hozzáállni a fejlesztéshez és az azt megelőző folyamatokhoz, az előkészületekhez. Az alábbi szempontok alapján indultam el az úton:

- Alkatrészek kiválasztása, azok beszerezhetősége és ára
- Meglévő alkatrészek, avagy van-e bármi olyan a környezetemben, amit fel tudok használni a projektben
- Milyen anyagok állnak rendelkezésre, amikből tudok dolgozni
- Milyen lehetőségek vannak az alapanyagok megmunkálására

A fentiek mellett van egy olyan terület, amit nagyon fontos figyelembe venni függetlenül attól, hogy hova és kinek készül a készülék. A biztonság kérdése az, amiben nem lehet alább adni, itt minden esetben szükséges a maximális körütekintés és minden meglévő tudás alkalmazása, legyen szó otthoni vagy eladásra szánt termékről. Gondolok ezalatt a nagyfeszültségű részek kellő szigetelésére és a megfelelő védelmekre. Emellett fontosnak tartom azt is, hogy az alkatrészek ne a képességeik határán legyenek használva, vagyis legyen biztonsági tartalék is, legyenek kellően túlméretezve a kritikus részek.

A főbb tervezési szempontokat, a kiválasztott alkatrészeket és a döntéseim okát ismertetem az alábbi pontokban:

Műszerdoboz

A doboz nulláról való megépítésének ötletét hamar elvettem. Ez főként azért volt, mert kéznél volt egy korábbi projekthez használt üres doboz, amiről úgy láttam, hogy pont ideális lehet erre a feladatra. 17 cm széles, 13 cm mély és 5,5 cm magas a kiválasztott doboz, az anyaga pedig 2 mm vastag műanyag. 4 csavar fogja össze a felső és alsó részt, az elő és hátlap különálló, vezetősínbe illeszthető, ezáltal könnyű a megmunkálása és szerelése. Ez a két idom nem állt rendelkezésre, de találtam olyan alapanyagot, ami megegyezett az eredetivel.

NYÁK panel és egyéb komponensek mérete

Korábbi NYÁK rendelési tapasztalataim alapján tudtam, hogy gazdaságosan általában maximum 10x10 cm méretű panel gyártható. Ez volt tehát az egyik szempont. Másik szempont az volt, hogy a dobozban viszonylag kényelmesen elférjen és könnyen szerelhető legyen. A feladathoz alkalmas transzformátoroknak utánajárva figyelembe vettem, hogy mennyi hely marad nagyjából a dobozban a panelnek és az lett a végkövetkeztetés, hogy a legideálisabb, ha 10x8 cm alatt marad a panel, így ez lett a döntő határ méret.

Az áramköri komponensek méretével kapcsolatban az volt a fő cél, hogy lehetőség szerint SMD kivitelűek legyenek. Ennek több előnye is van a kis méret mellett, például a kisebb jelutaknak köszönhetően kisebb a kibocsátott zavar, vagyis EMC szempontból lényegesen jobb paraméterekkel rendelkező panelt lehet kivitelezni. Saját kezű beültetés miatt viszont meg kellett húzni egy határt és ez egyszerűbb alkatrészeknél a 0805 méret volt. Számomra ez a méret még könnyen kezelhető, ez alá nem szívesen mennék. IC-k esetében leginkább az volt a kikötésem, hogy BGA típusú ne legyen vagy olyan, ami hőlégfúvóval való munkát igényel.

Kezelőszervek, visszajelzők és csatlakozók

Könnyen használható és praktikus megoldásként az előlapon nyomógombos forgó enkóderre gondoltam. Emellett sima nyomógombokat is terveztem használni. Ezek mennyiségét a rendelkezésre álló hely és a praktikum figyelembevételével határoztam meg, de természetesen a vezérlőegység szabad I/O lábainak száma is limitáló tényező. Az állapotok visszajelzését nagyrészt a kijelzőn gondoltam elhelyezni, de a kimenet aktív jelzését mindenképp egy darab, a kimenet közelében elhelyezett LED-el szerettem volna megvalósítani. A kimenet csatlakozójaként szabványos BNC típusút terveztem és előlapi elhelyezéssel.

Mikrovezérlő

Több opció is felmerült, ezen a téren nem érkeztem határozott elképzelésekkel. Szóba jött például ESP32 vagy ATmega, de volt egy olyan vezérlő, amivel korábban sokat dolgoztam és sikerült mélyebben megismerni. Ez pedig az STM32 családba tartozó STM32F103CBT6^[9] típus volt. Tudtam mire képes, ezért összehasonlítottam a tudását a projektben felmerült igényekkel. Végeredményben megfelelőnek találtam és az ismertsége egy jóval könnyebb fejlesztési folyamatot tesz lehetővé, ezért ez lett a kiválasztott típus. Kis megjegyzésként hozzátenném, hogy nagyon nehéz beszerezni jelenleg minden ehhez hasonló chipet a piacon és ebből a típusból rendelkezem néhány darabbal, így ez is emellett szólt.

Fő jelgenerátor

Az alapjel előállításra elég sokféle módszer létezik. Egy olyan megoldásra gondoltam, ami minél jobban integrált, minél kisebb és egyszerűbb, de mégis megvalósítható vele a kellő tudás. A témában való kutatómunka után arra következtetésre jutottam, hogy az AD9833^[1] típusú programozható függvénygenerátor IC lesz a legkézenfekvőbb. Ezzel előállítható szinusz, négyszög és háromszög jel és képes elmenni akár 12,5 MHz-ig. Hátránya, hogy négyszögjel esetén jóval nagyobb a kimenő jel nagysága, mint szinusznál és háromszögnél, ráadásul a kitöltési tényező sem állítható. Figyelembevéve azt, hogy a választott mikrovezérlő nagyon jó négyszögjel generálási képességekkel bír és precízen állítható a kitöltési tényező is, úgy gondoltam nem probléma ez a hiányosság, találok rá megoldást.

Műveleti erősítő

Olyan alkatrész után kutattam, amivel MHz nagyságú jelek is jól kezelhetők, nem túl drága és viszonylag könnyen beszerezhető. Ez persze szubjektív, de végül a talált AD8065 és az OPA810^[5] közül az utóbbit választottam, ez megfelelt minden említett kritériumnak.

Digitális potenciométer

A digitális vezérlés megvalósítását úgy képzeltem el, hogy ahol hagyományos potenciométert használnék a kapcsolásban, ott ehelyett digitálisat fogok. Legalább 256 lépéses volt a cél. Sajnos a könnyű beszerezhetőség egyetlen alkalmas típusnál sem teljesült, így kicsit nehezebben és több várakozással, de sikerült olyat találni, amit alkalmasnak találtam. A kiválasztott végül az MCP41HV51^[6] sorozat lett.

Jelkapcsoló (multiplexer)

Szerencsére ilyen alkatrészt nem volt nehéz találni, nem is egy túl bonyolult áramkörü elemről van szó. Az NLASB3157^[3] típust választottam ott, ahol SPDT kellett. SPST alkalmazásban a DG448^[7] típus volt a befutó.

Kimenő áram buffer

Nem szerettem volna egy általános felhasználású műveleti erősítőre bízni a kimenet meghajtását, ezért utánanéztem létezik-e kimondottan erre a célra valamilyen IC. Létezik, mégpedig jelen alkalmazásban szerintem pont ideális választás lett a BUF634A^[8] típus. Ezzel elméletben elérhető ± 250 mA kimenő áram, ami elégségesnek mondható és rövidzárvédett is.

Kijelző

Esztétikus, jól olvasható és a korábbi projektjeimben használt megoldásoknál informatívabb kijelzési mód volt a fő cél. Korábban 2x16 soros, karakteres LCD kijelzőkkel dolgoztam leginkább. Nagyobb méret és karakteres helyett raszteres megjelenítés volt az irányvonal a keresés során. A kommunikációs protokoll és a képfriessítési ráta sem tartozott az elhanyagolható szempontok közé. Mindent egybevetve egy 160x128 felbontású RGB LCD-t választottam LED háttérvilágítással, ami SPI buszon képes kommunikálni.

Belső tápegység topológia

A veszteségek minimalizálása és a praktikum között egyensúlyozva úgy találtam legjobbnak, ha a jelek feldolgozását végző áramkörök tápjául szolgáló ± 12 V stabilizálását egyszerű lineáris stabilizátorokkal oldom meg, mivel itt nem keletkezik nagy veszteség. A 3,3 V előállítására már más megközelítést igényelt. A kis áramigény mellett nagy a feszültségkülönbség, így erre feladatra kapcsolóüzemű stabilizálás mellett döntöttem és azért, hogy ne terhelje feleslegesen a lineáris fokozatot, inkább a 15 Voltos stabilizálatlan feszültségvonal szolgál az egység bemeneteként. A hatásfok ezzel lényegesen javítható.

Távoli vezérlés megoldása

Fontos volt, hogy legyen lehetőség a készüléket távolról vezérelni és a főkapcsoló kivételével minden kezelőszerv állítható legyen ugyanúgy, mintha az előlapról módosítanánk a beállításokat. Főként ezért is volt szükség teljesen digitális vezérlésre. A mai kornak megfelelően egy WiFi modul opcionális csatlakoztathatósága volt a cél, de azt is szem előtt tartottam, hogy a modul helyett egy másik modullal USB kapcsolat is megoldható legyen igény esetén. Azt viszont elhatároztam, hogy vezérlési feladatot nem láthat el semmilyen opcionális modul, csak a távoli kapcsolat biztosítása lehet a feladata a moduloknak, hogy a beültetésük nélkül is teljes értékűen funkcionáljon az eszköz.

Transzformátor

Amint kezdett összeállni a komponensek mérete és a működéshez szükséges feszültség és áramerősség igény, elkezdtem transzformátor keresni. Első körben az itthon lévők között néztem szét, de nem találtam olyat, ami pont ideális lett volna a feladatra. Végül a vásárlás mellett döntöttem és a kinézett darab egy AVISOR 1122188 lett. Ez egy 230/2x12 V 12 VA típus, feszültségben ideális, teljesítményben pedig kellő tartalékkal rendelkezik és a dobozban is pont jól elfér minden egyéb mellett, nem utolsósorban pedig könnyű rögzíteni 2 csavarral.

NYÁK gyártás és beültetés kérdése

Azt már előre tudtam, hogy elég összetett és viszonylag sok alkatrészszámaúnak várható a panel, főleg SMD méretekkel. Emiatt az otthoni gyártást elvetettem. Igaz, hogy van tapasztalatom NYÁK gyártás terén, de úgy döntöttem a rendelés mellett teszem le a voksom. A beültetéssel kapcsolatban elgondolkodtam azon, hogy érdemes lehet ezt a folyamatot is leegyszerűsíteni és gépi beültetést kérni, legalább a komponensek nagyjára. Végül úgy ítélt meg, hogy egy darab panelnél és kézzel forrasztható elemeknél ez nem lenne túl kifizetődő, így maradtam a teljesen saját kezű beültetésnél.

Tesztelhetőség / bemérés kérdése

A készülék mivoltából adódóan sajnos nem lehet egyszerűen, bárhol könnyen hozzáférhető mérőműszerekkel tanulmányozni és megfigyelni a működését. Mindenképpen szükségeltetik egy oszcilloszkóp a munkafolyamatokhoz. Szerencsére ez adott volt, mivel birtokomba van egy Siglent SDS1202X-E típusú műszer. Ennek következtében bátran nekiláttam a fejlesztésnek és tudtam, hogy a leendő áramkör bármely pontján hatékonyan képes leszek mérni a jeleket. Enélkül biztosan nem vágtam volna bele a projektbe.

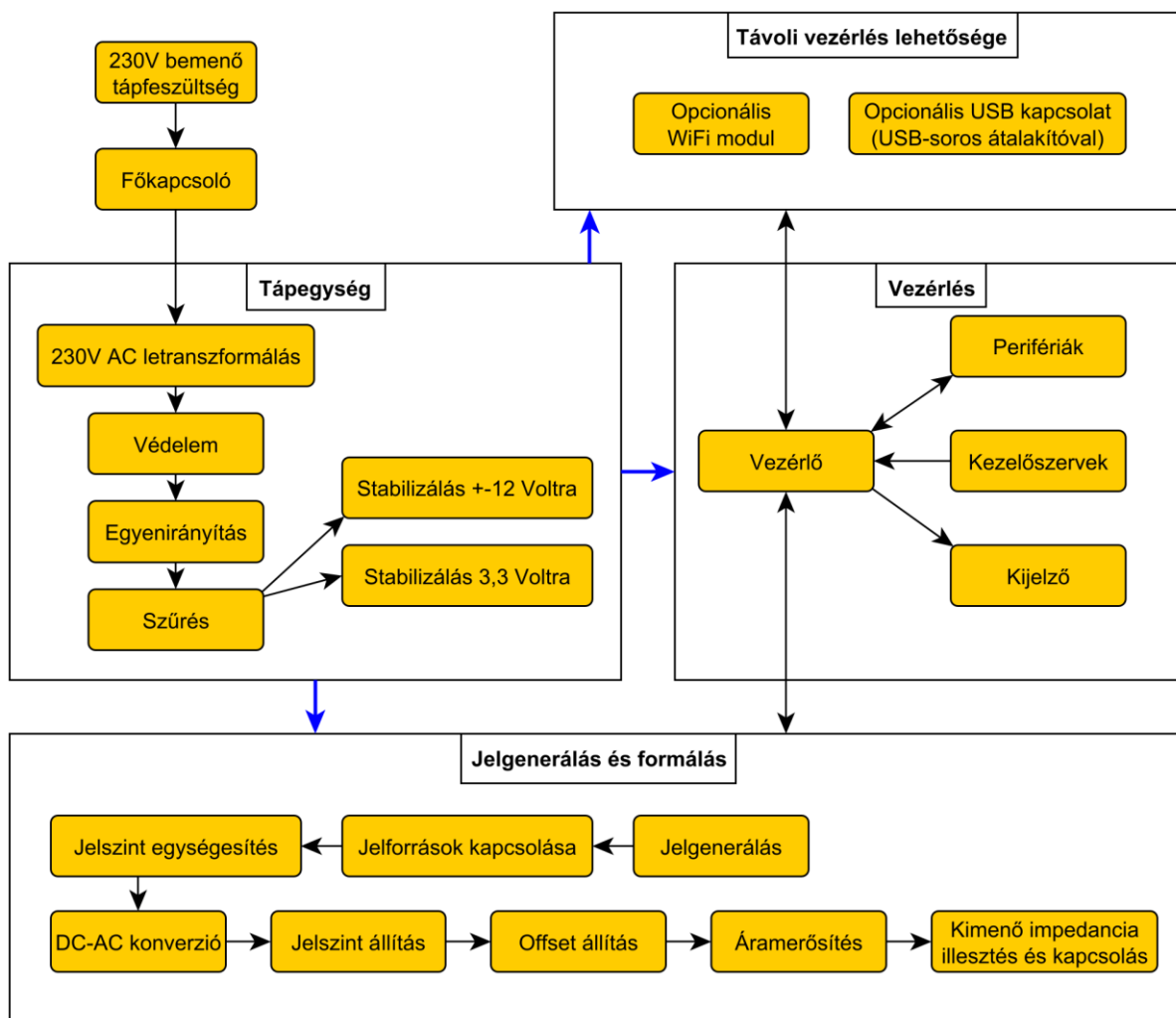
3. SPECIFIKÁCIÓ

Az alkatrészek kiválasztása után meghatároztam a specifikációt, vagyis, hogy a készülendő berendezés milyen műszaki paraméterekkel legyen felruházva, mikre legyen képes.

- A kimenő feszültség határai: ± 12 V.
- A jel nagysága így elméletben 24 V_{p-p} lehetne, de a digitális potenciométer 256 lépése miatt nem szándékoztam ekkora tartományt átfedni, ezért 12 V_{p-p} volt a cél.
- A kimenő áram legyen legalább ± 200 mA és rövidzár védett.
- Legalább 256 lépésben állítható offset és kimenő feszültség nagysága.
- Minimum kimenő frekvenciák szép jelalak mellett:
 - Szinusz — 2 MHz
 - Háromszög — 1 MHz
 - Négyyszög — 500 kHz
 - Négyyszög PWM — 250 kHz

4. KIDOLGOZÁS

4.1. Rendszerterv



4.1 ábra

Rendszer blokkvázlat

A fenti ábra bemutatja a főbb komponenseket a rendszerben és azt, hogy ezek milyen kapcsolatban állnak egymással. A következő pontokban egy rövid áttekintést nyújtok a blokkok funkciójáról és a köztük lévő kapcsolatokról. Az egyes blokkok és azok részletes működése a későbbiekben lesz részletezve.

Tápegység

Nélkülözhetetlen eleme minden olyan berendezésnek, ami nem közvetlenül hálózati tápfeszültségről működik. Jelen esetben 3,3 V és szimmetrikus 12 V DC szükséges az áramköri elemek működéséhez. Ez a rész ezen feszültségek stabil előállításáért felel.

Vezérlés

A készülék digitális vezérlésű lesz, így szükséges egy központi vezérlőegység, ami irányít. Ez kommunikál az előlapi kezelőszervekkel, visszajelzést ad állapotokról, működteti az LCD kijelzőt és kezel minden jelformálásban résztvevő komponenst is. Ezen fut a vezérlő szoftver is.

Jelgenerálás és formálás

A kimenő jelet elő kell állítani, majd különböző fokozatok szükségesek ahhoz, hogy a jel nagysága, offsetje, alakja állítható legyen, és kapcsolható is, ha több forrásból származik. Erősíteni és illeszteni is kell, hogy a kimenet terhelhető legyen és 50 Ω impedanciájú.

Távoli vezérlés lehetősége

A digitális vezérlésnek köszönhetően adódik a lehetőség, hogy távolról is vezérelhető legyen a berendezés, ne csak az előlapi kezelőszervekkel. Például megvalósítható egy WiFi modul vagy egy USB-soros modul segítségével. A berendezés enélkül is teljes funkcionalitással képes működni, ez a rész csupán egy illesztést valósíthat meg a külvilág felé, tehát vezérlési feladatot nem lát el. Egy esetleges bővítési opció a jövőre nézve.

4.2. Kapcsolási rajz

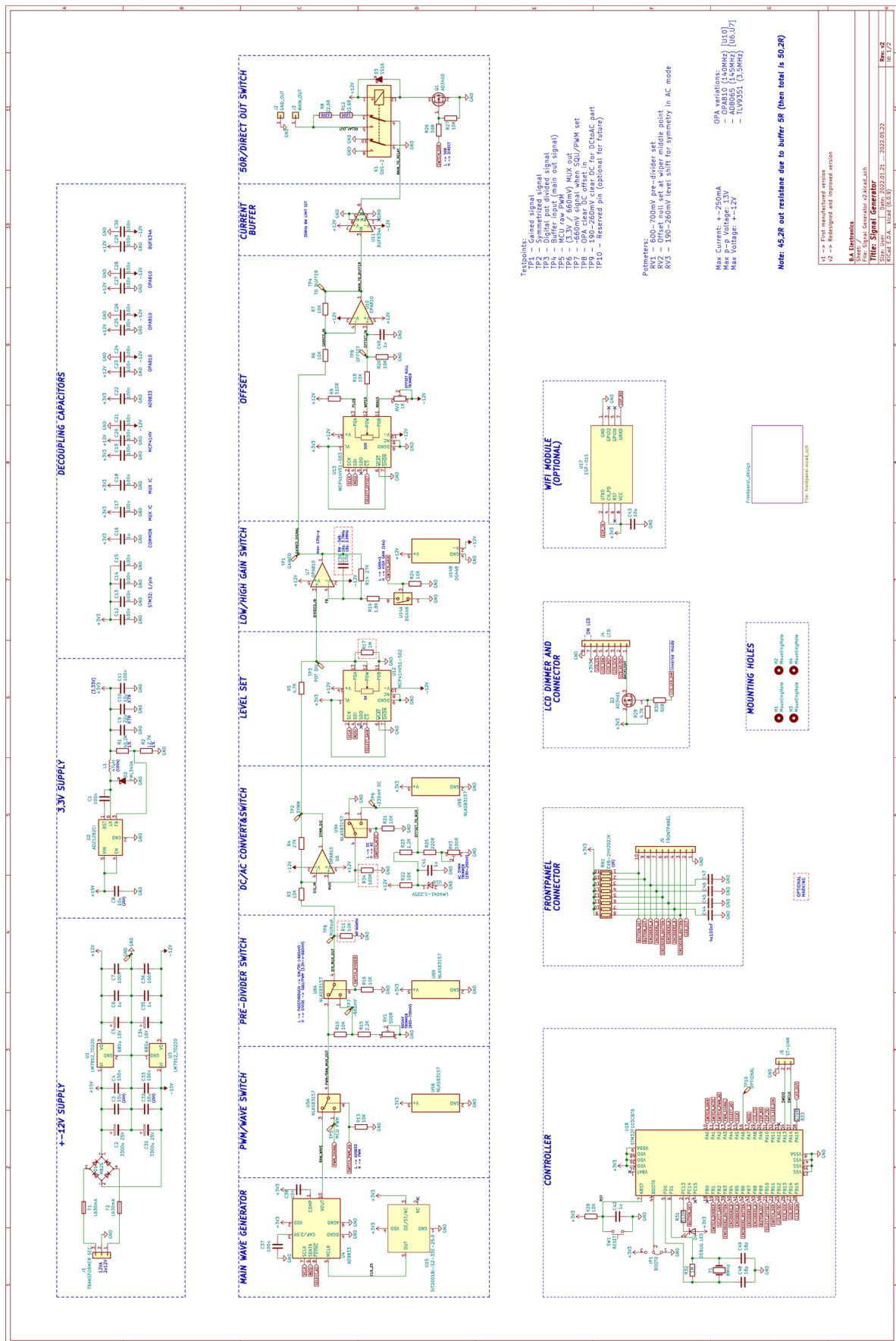
A tervezés előtt fontos szempont volt, hogy olyan programot használjak, amivel nem csak ezt a részét vagyok képes megcsinálni, hanem a projekt más részeiben is segítséget nyújt. Például a NYÁK tervezést is meg lehessen valósítani ugyanezzel a programmal. Hobbimból kifolyólag már sok kapcsolást és NYÁK panelt terveztem, a legtöbb esetben a KiCad nevű szoftvert használtam, több éves tapasztalatom van vele. Úgy döntöttem ez most sem lesz másképp, így a kapcsolási rajztól kezdve a BOM-on és a 3D renderképeken keresztül a NYÁK tervig mindenhez a KiCad 6.0-át használtam. Ez egy bárki által ingyenesen hozzáférhető és nyílt forráskódú szoftver, emellett meglehetősen nagy a szoftver mögötti közösség, akik rendszeresen fejlesztik és javítják a működését.

A nagyfeszültségű rész nincs ábrázolva, annak bekötése a következő: a bemeneti tápfeszültség (230 V) kábel az előlapi főkapcsolón keresztül sorosan kötve csatlakozik a transzformátor primer tekercsére.

A rendszer teljes kapcsolási rajza bemutatja az összes elektronikai alkatrész kapcsolatát a transzformátor szekunder kivezetésétől kezdve. A rajzon piros szaggatott kerettel vannak jelölve az opcionálisan beültetésre kerülő alkatrészek. Az, hogy végül be kell-e ültetni őket, a kezdeti tesztelések során derül ki.

Néhány jegyzetet is elhelyeztem a rajzon a bemérés és hibakeresés megkönnyítéséhez. Korábbi építési tapasztalatokból kiindulva tudtam, hogy jól fog jönni, ha elhelyezek ilyen jellegű összefoglaló információkat, hogy például a mérési tesztpontok mire jók, illetve, hogy az egyes potencióméterek mit állítanak. Ezek értelemszerűen a kapcsolásból is kiderülnek, de sokkal gyorsabb, ha nem kell keresgélni.

A teljes kapcsolás nehezen olvasható és áttekinthető jelen formában, ezért a következő fejezetekben minden itt szereplő egység részletesen bemutatásra kerül.

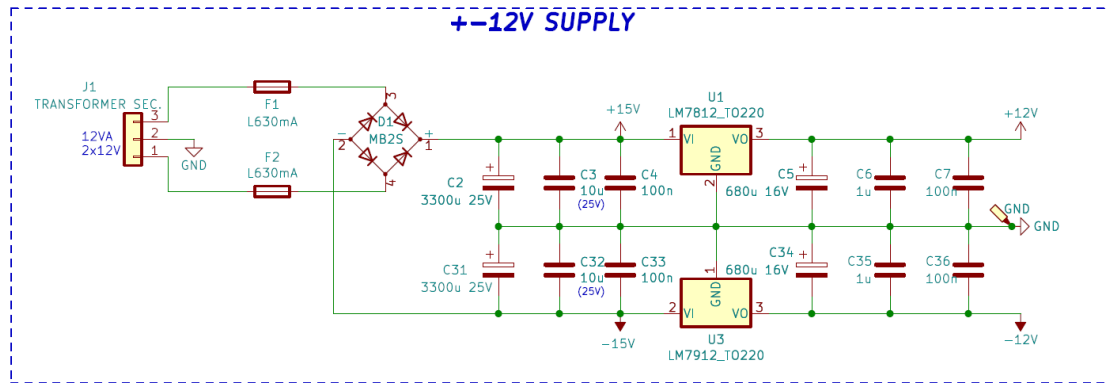


4.2 ábra
Teljes kapcsolási rajz

4.3. Egységek

4.3.1. Tápellátás

Fő $\pm 12V$ tápegység

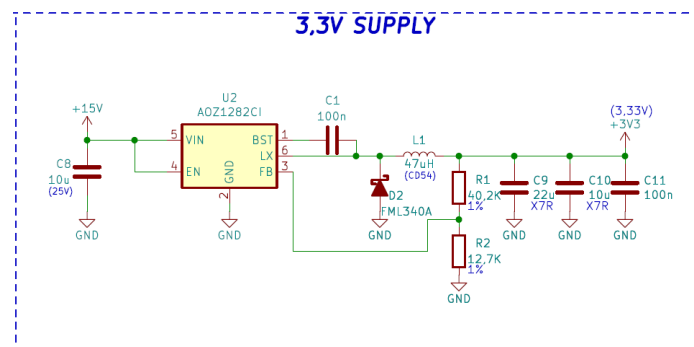


4.3 ábra

$\pm 12V$ tápegység

A berendezés főbb egységeinek tápellátását egy egyszerű felépítésű lineáris elven működő tápegység biztosítja. A transzformátor szekunder csatlakozója után mindkét ágon egy-egy biztosíték gondoskodik a túláram és rövidzár védelemről. Ezt követi egy egyenirányító diódahíd, utána pedig plusz és mínusz ágon is lineáris feszültség stabilizátor IC-k stabilizálják a feszültséget a megfelelő, szimmetrikus 12 Voltra. Természetesen megtalálhatóak a körben simító kondenzátorok is stabilizálás előtt és után egyaránt. Nagyobb méretű 3300 μF kapacitású elektrolit kondenzátorokat használtam a kisebb frekvenciák simítására és kisebb, 10 μF és 100 nF kapacitású MLCC típusokat a nagyfrekvenciás zavarok szűrésére.

Perifériákat kiszolgáló 3,3V tápegység

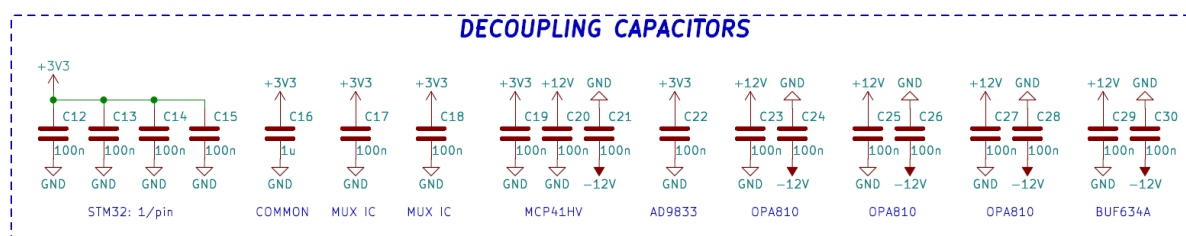


4.4 ábra

3,3V tápegység

A legtöbb periféria 3,3V tápfeszültséget igényel, mint például a mikrovezérlő, a jel előállító ASIC, de ilyenek az analóg kapcsolók és az LCD kijelző, persze emellett sok más egyéb IC is. Összességében nem keletkezik nagy áramigény a 3,3 V ágon, de mivel 12 vagy 15 Voltból kell előállítani, emiatt szignifikáns veszteség keletkezne, ha itt is lineáris stabilizátort használnék. A veszteségek minimalizálása érdekében kapcsolóüzemű stabilizátort használok. Egy Buck topológiájú AOZ1282CI^[2] IC-re alapul a kapcsolás, plusz az adatlapban^[2] javasolt körítés hozzá. Az egész berendezés hatásfokának növelésének érdekében 15 Voltról történik az átalakítás.

Tápvonal szűrések



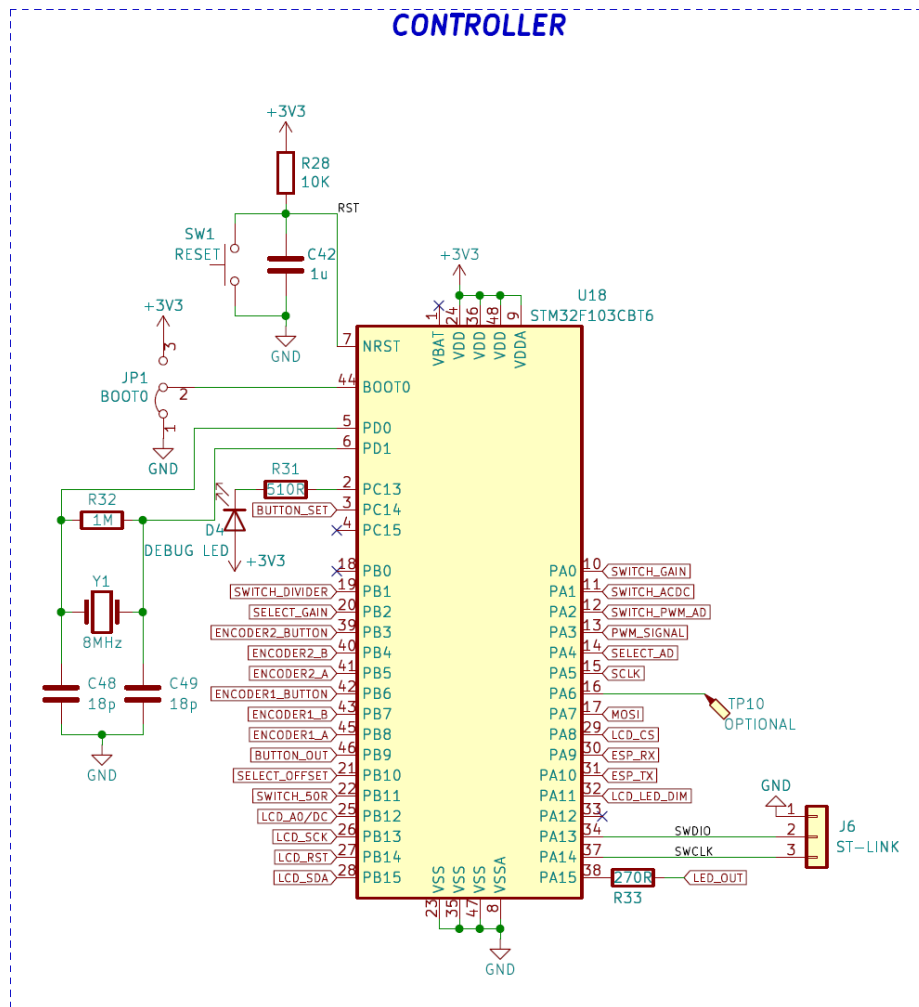
4.5 ábra

Tápvonal szűrések

A tápfeszültségek szűrését érdemes segíteni minden IC közvetlen közelében. Ennek szükségessége 2 okra vezethető vissza. Egyrészt maguk az adott IC-k az adatlapjuk szerint igénylik az ilyen jellegű szűrések elhelyezését. Másrészt pedig a NYÁK panelen lévő huzalozás miatt is érdemes. Értelmszerűen a tápvonalak vezetősávjainak is van ellenállása, kapacitása és induktivitása, ezért a működés során az adott egységek közvetlen táp lábain nem egy tökéletesen tiszta DC feszültség jelenik meg a működés során. Azonban a stabil és jó működéshez minél tisztább egyenfeszültségre van szükség és ezt segítik elő az adott IC-k közvetlen közelében elhelyezett kis értékű szűrőkondenzátorok.

Ezeket a tápfeszültség szűrési célú kondenzátorokat ebben a külön blokkban jelöltem, emiatt nem szerepelnek az adott modulok táp lábainál. Így könnyebben áttekinthető és a tervezés során is jól nyomon követhető volt, hogy biztos minden IC kap-e megfelelő szűrést. A kis áramok (mA) és nagy frekvenciák (kHz-MHz) miatt főként 100 nF nagyságú MLCC kondenzátorokat választottam szűrésnek.

4.3.2. Vezérlőegység



4.6 ábra

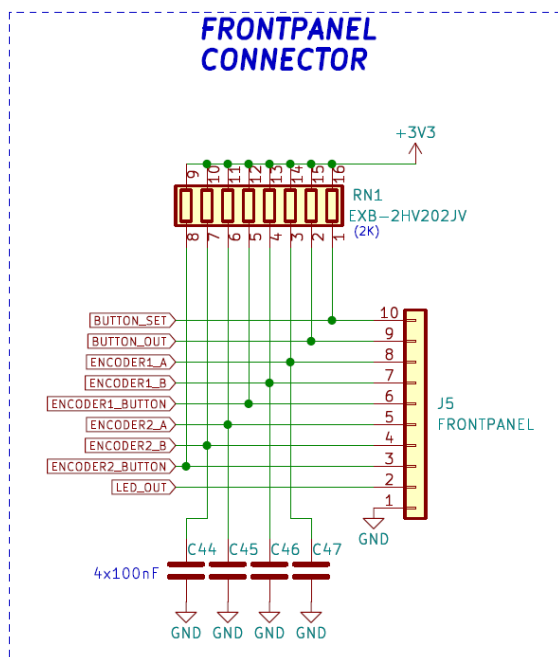
Vezérlőegység

A berendezést egy STM32F103CBT6^[9] típusú mikrokontroller vezérli. Ez kommunikál a perifériákkal, kezel minden kezelőszervet és ellát minden digitális vezérlési feladatot. Helyet kapott a panelen egy reset nyomógomb és egy LED is. Ezek a fejlesztés és hibakeresés fázisában nagy segítséget jelentenek. A TP10-es tesztpontra kivezetett lábnak jelenleg nincs funkciója a normál működés során. Korábbi tapasztalatokból kiindulva terveztem így, mivel később még jól jöhet ha van egy plusz I/O ami szabad felhasználású. A működéshez szükséges órajel egy külső 8 MHz értékű kvarc kristály segítségével állítódik elő, tehát külső órajelről megy az MCU. A processzor ennél magasabb frekvencián fut, a belső PLL áramkör miatt ez végül 72 MHz-re adódik.

A vezérlőn futó szoftver feltöltése egy ST-LINK^[4] programozó segédeszközzel lehetséges. Működés közben kell összekötni az eszközt az SWDIO, SWCLK és GND lábakkal. Ezután számítógépről programozható és a futás közbeni hibakeresés lehetősége is adott. Ez egy rendkívül hasznos funkció és nagyban megkönnyíti a fejlesztést, például a regiszterek vagy változók értéke hozzáférhető futásidőben, megállítható a program és lehet látni melyik sornál tart éppen vagy hol akadt el futás közben, esetleg melyik hibaállapotba ugrott be.

4.3.3. Perifériák csatlakozása

Előlapi csatlakozó és környezete

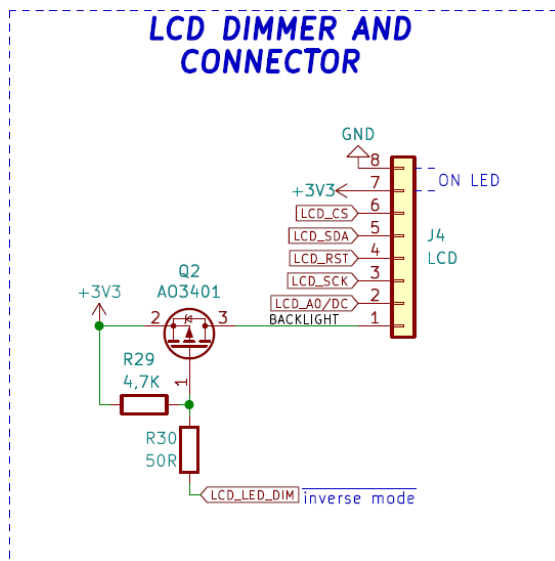


4.7 ábra

Előlapi csatlakozó

Az előlapi kezelőszervek mindegyike egy 10 pines JST csatlakozón keresztül köthető össze a panellel. Itt van jelölve a lábak külső felhúzóellenállása is. Igaz, hogy az MCU-ban is van beépített felhúzóellenállás, de ez a gyártási szórással is kalkulálva akár 50 k Ω nagyságú is lehet. A megfelelő zavarvédelemhez ez túl nagy, ezért külső 2 k Ω értékű ellenálláshálót alkalmaztam. Az előlapi forgó enkóderek prellmentesítését a 100 nF értékű kondenzátorok segítik.

LCD csatlakozó és fényerő szabályzó

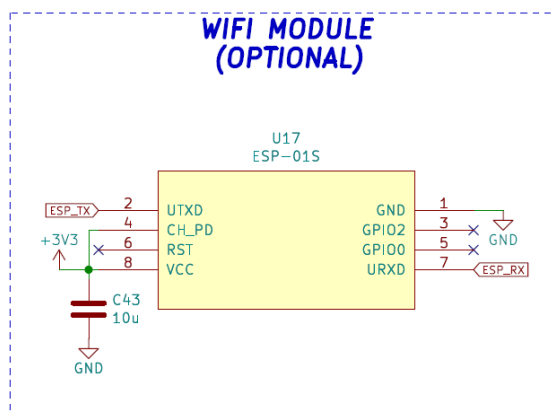


4.8 ábra

LCD csatlakozó

Az előlapi LCD kijelző bekötéséhez egy 8 pines, szintén JST típusú csatlakozót használtam. A kijelző háttérvilágítását egy beépített LED biztosítja, emiatt a fényerőszabályozás PWM módszerrel egyszerűen megoldható. Ezt a feladatot látja el a P-csatornás MOSFET. Ezen esetben viszont ügyelni kell rá, hogy inverz módon működik a vezérlés, tehát 100% kitöltésnél lesz 0% a fényerő, ezt jeleztem is. A bekapcsolt állapotot jelző előlapi LED is erről a csatlakozóról kap megáplálást.

4.3.4. WiFi modul (opcionális)



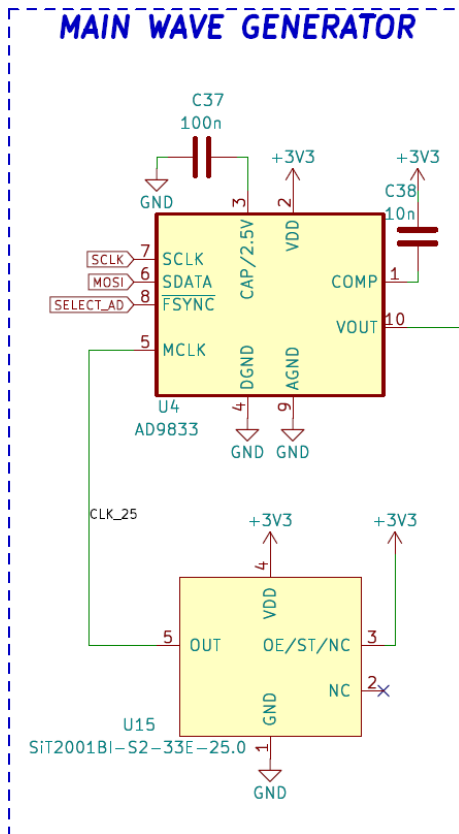
4.9 ábra

Optionális WiFi modul

Az eszköz alapvetően az előlapi kezelőszervekkel működtethető, de a teljesen digitális vezérlésnek köszönhetően lehetőség nyílik távolról is vezérelni. A WiFi-ről való irányítás, például egy weblapon keresztül, minden további nélkül lehetséges egy ESP-01S^[10] típusú modul csatlakoztatásával. Ez bármikor implementálható a jövőben.

4.3.5. Jelgenerálás és formálás

4.3.5.1. Alap jelalak előállítás



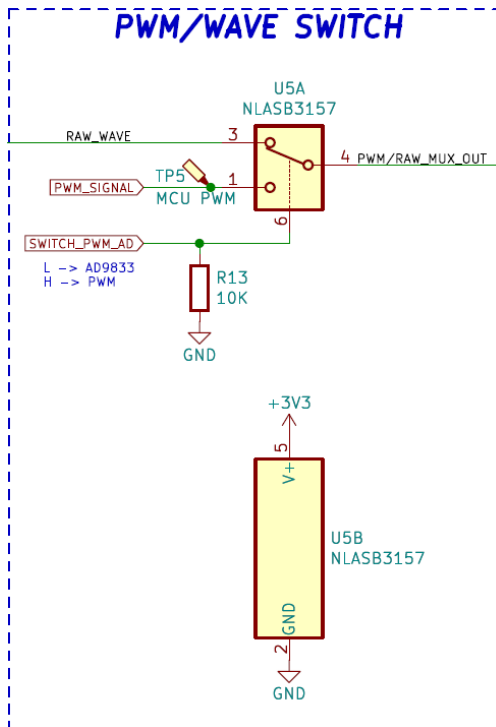
4.10 ábra

Alap jelalak előállítás

A legtöbb nyers jelalak előállítását egy AD9833^[1] típusú programozható hullámforma generátor IC végzi, természetesen MCU vezérléssel. Szinuszos, négyszög és háromszög alakú jelek állíthatók elő vele 0 és 12,5 MHz között, akár 0,1 Hz felbontással. Ez még nem a teljes berendezés képessége, csupán az IC elméleti határa. A DDS típusú működésből adódóan szép és tiszta, felharmonikusoktól mentes kimenő jel előállítására képes. Az egyszerűség mellett ez is a pozitív tulajdonságok közé sorolható és nem elhanyagolható előny más megoldásokkal szemben.

A megfelelő működéshez szükségeltetik egy külső, stabil és konstans referencia frekvenciaforrás is. Erre a feladatra egy 25 MHz nagyságú referencia IC-t választottam. Az SiT2001B típus lett a kiválasztott, ami ± 20 ppm pontossággal képes előállítani 25 MHz frekvenciájú jelet bármiféle egyéb külső alkatrész nélkül.

4.3.5.2. Alap jelalak és MCU-ból érkező PWM jel kapcsoló



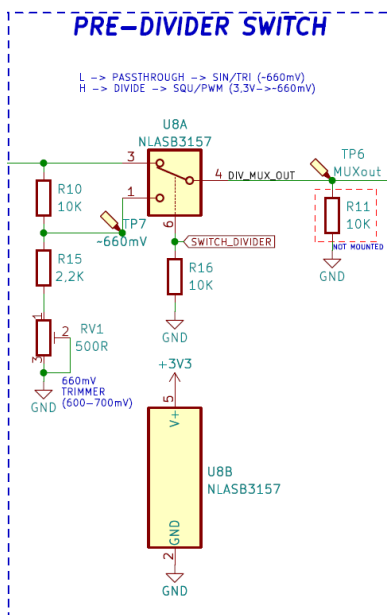
4.11 ábra

Alapjel / PWM kapcsoló

Ahhoz, hogy négyszögjel esetén a kitöltési tényező állítható legyen, másik jelforrás szükséges, mivel az AD9833^[1] csak szimmetrikus (50% kitöltésű) jelet tud kiadni. Ezt a feladatot a mikrokontroller fogja elvégezni. Igaz, hogy ezzel veszítünk a frekvencia lépésköz részletességéből, de még így is meglehetősen nagy tartományt lefedve képes PWM jelet kiadni és a kitöltési tényező nagy pontossággal beállítható.

A jelforrás kiválasztását egy NLASB3157^[3] típusú analóg kapcsoló végzi, ez kapcsol az AD9833^[1] és az MCU által előállított PWM jel között.

4.3.5.3. Jelszint egységesítő előosztó

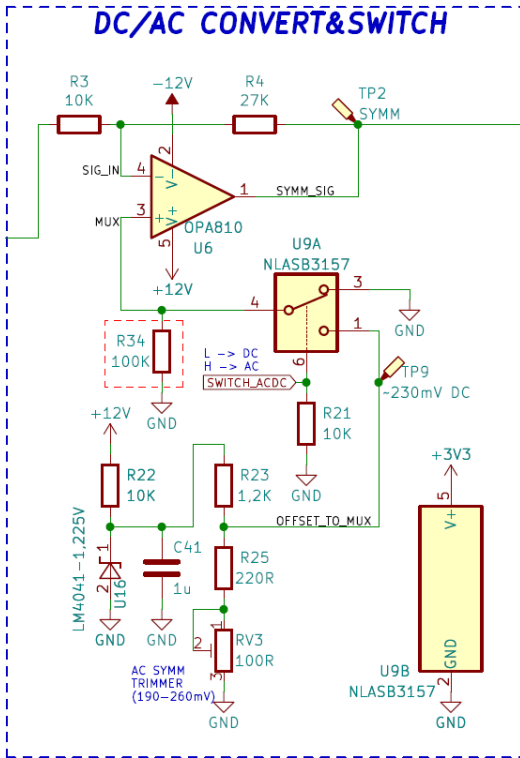


4.12 ábra

Előosztó és kapcsolója

Az ezt megelőző fejezetből már kiderült, hogy 2 felől érkezik az előállított alapjel. A jel nagysága eltérő a jelalaktól és forrástól függően, ezért egy feszültségosztóra van szükség. Szinuszos és háromszög jel 660 mV nagyságú, míg a négyszög és PWM jel 3,3 V nagyságú. A cél, hogy mindig egységes nagyságú jel haladjon tovább és ehhez csupán annyit kell tenni, hogy a nagyobb amplitúdójú jel esetén egy osztón keresztül kell vezetni, ami a kisebb nagyságú jellel megegyező szintre osztja le a nagyobbat. Az osztási arány pontos beállításához egy trimmer potenciométerrel finoman be lehet állítani egységesre a kezdeti bemérés során. A jel kapcsolását most is egy NLASB3157^[3] típusú IC végzi.

4.3.5.4. DC-AC átalakító és kapcsoló



4.13 ábra

DC-AC átalakító és kapcsoló

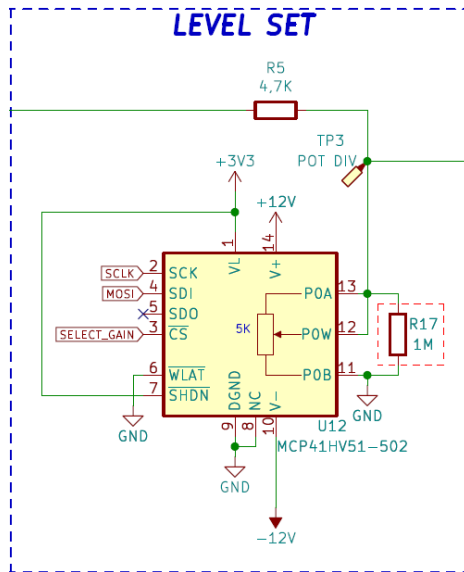
A szinteltolás úgy valósul meg, hogy egy 1,225 Voltos LM4041 referencia IC kimenete van egy precízen állítható osztón keresztül leosztva és bekötve az erősítő neminvertáló lábára.

A kapcsolhatóságot itt is egy NLASB3157^[3] típusú IC végzi. A korábban említett kimeneti terhelés biztosításában segít az R34 jelű ellenállás.

- GND-t kapcsolva a neminvertáló lábra, csak minimális (2,7x) erősítés történik és szinteltolás nélkül megy tovább a jel.
- A referenciaszükségletet rákapcsolva pedig eltolódik a jel annyira, hogy a GND-hez képest immáron szimmetrikus lesz. A szimmetria pontos beállítására van az RV3 trimmer potenciométer. A kezdeti oszcilloszkópos bemérés során beállítandó.

Egészen idáig DC jelekről volt szó, de a berendezésnek tudnia kell AC jelet is kiadni és ebben fog segíteni ez a fokozat. Az invertáló konfigurációban bekötött műveleti erősítő rész szinteltolást és egy minimális erősítést is elvégez, mindemellett értelemszerűen fázist is fordít. A kapcsolhatóság itt is megoldott, hogy DC vagy a GND-hez képest szimmetrikus AC jel haladjon tovább.

4.3.5.5. Jelszint állítás

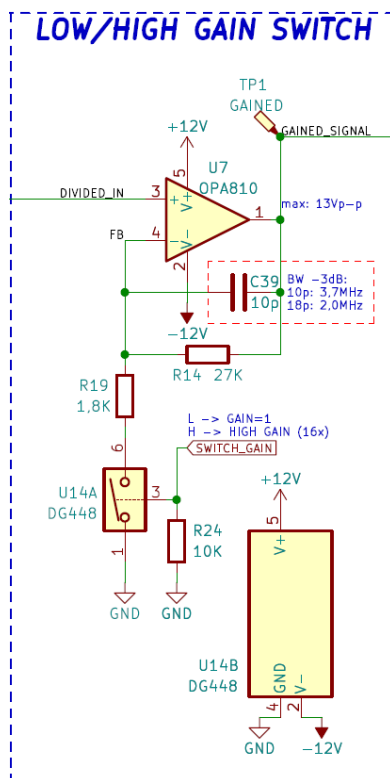


4.14 ábra

Jelszint állítás

A jelszint nagyságának beállításához első körben egy MCP41HV51^[6] típusú 5 k Ω -os digitális potenciométert alkalmazok. Az itt látható feszültségosztó konfiguráció előnye, hogy kevésbé hajlamos a gerjedésre mintha például egy műveleti erősítő visszacsatolásába lenne beépítve (ahogyan az előző verzióban is volt, de sok gond volt vele). Így végeredményben az ~1,6 V nagyságú beérkező jelből tovább tud haladni 50-830 mV közötti jel, amit 256 lépésben lehet állítani.

4.3.5.6. Jelszint erősítés kapcsoló



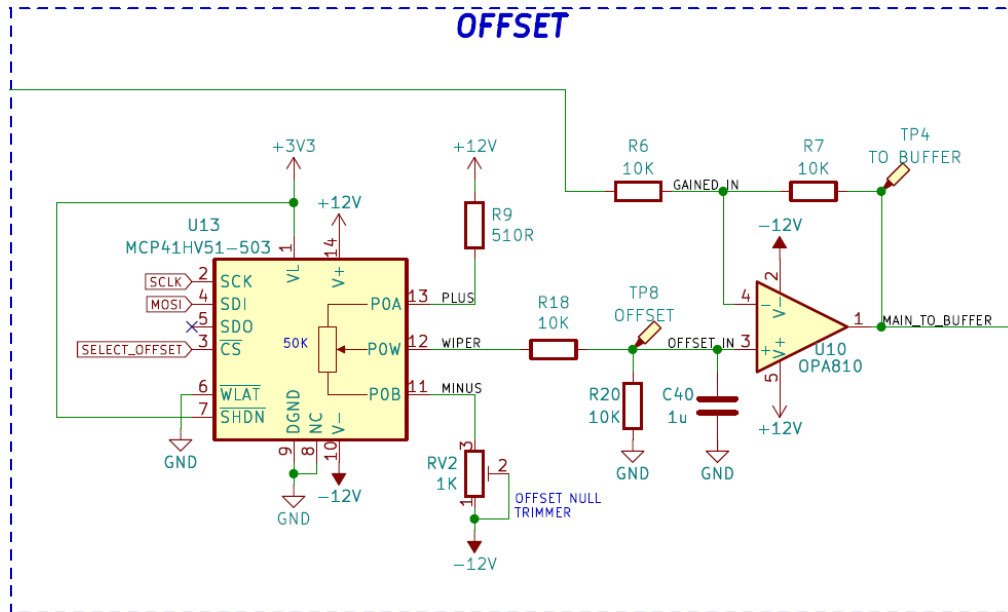
4.15 ábra

Jelszint erősítés kapcsoló

Az áramkör építése során cél volt, hogy kisebb és nagyobb kimenő jelek is szépen beállíthatóak legyenek. Ez a fokozat ebben segít. Egy DG448^[7] típusú analóg kapcsolóval lehet kapcsolni a 2 áteresztési mód között (Gain=1 / Gain=16).

- Egyik esetben a kapcsoló nem húzza le a GND-re az R19-et, ekkor egy sima egyszeres erősítésű követőfokozatként működik (G=1), vagyis a balról érkező 50-830 mV jel módosítás nélkül tovább halad.
- Másik esetben, amikor a kapcsoló lehúzza GND-re az R19 alsó lábát, akkor egy neminvertáló erősítőként funkcionál 16x erősítéssel. Ezáltal az előző fokozat függvényében 0,8-13 V közötti jel fog tovább haladni.

4.3.5.7. Offset állítás



4.16 ábra

Offset állítás

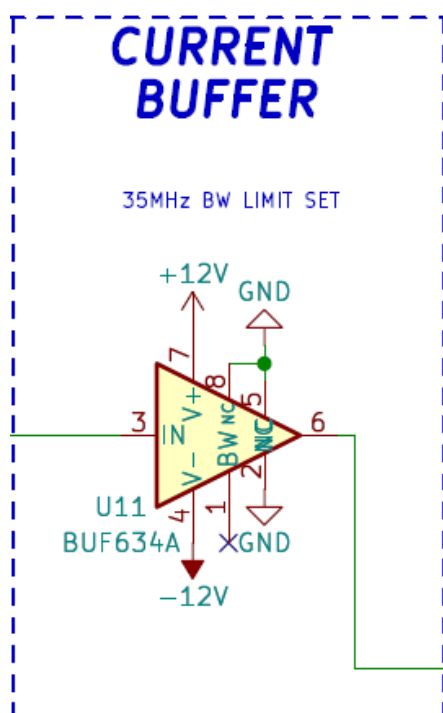
DC és szimmetrikus AC jeleken kívül fontos, hogy eltolható legyen pozitív és negatív irányba is a kimenő jel, azaz offsetelhető legyen. Ez a rész ezt a képességet adja hozzá a jel útjához.

A munka javát egy OPA810^[5] típusú invertáló kapcsolású műveleti erősítő fokozat végzi, aminek a neminvertáló lábára adott feszültséggel állítható a jel offsetje. A C40 jelű 1 μ F kapacitású MLCC kondenzátor az eltoláshoz szükséges referenciafeszültség simításáért felel, hogy a lehető legstabilabb és zajmentesebb DC feszültséget kapjon a műveleti erősítő a neminvertáló lábán. A jelváltozás sebességét is némileg csökkenti, ezáltal nem tud nagyon gyorsan, ugrásszerűen változni az ide jutó feszültség.

Kiemelném, hogy a jelfolyamban itt van másodjára használva invertáló kapcsolás, több nem is lesz, ezért a két invertálás következtében végeredményben a fő kimeneten fázishelyesen jelenik meg a jel.

Az MCP41HV51^[6] típusú 50 k Ω nagyságú digitális potenciométer állítja elő a szükséges feszültséget, ami az eltoláshoz kell. Az IC kivezetéseinek a saját ellenállása kis értékben ugyan, de változó lehet a gyártási szórás miatt, ezért a potenciométer középállásakor nem biztos, hogy 0 V lesz a kimenő feszültség. Ezt nyilván lehet valamennyire korrigálni szoftveresen, de 256 lépés áll rendelkezésre a teljes tartományban, ami nem túl sok, ezért elfordulhat olyan eset, hogy nem lehet beállítani pontosan a középértéket és emiatt sosem lesz offset nélküli kimenet. Fontos, hogy biztosítható legyen a jel offset nélküli tovább haladása, ezért az RV2 trimmerrel a bemérés során szépen be lehet állítani pontosan 0 V offsetet a potenciométer középállásánál. Az R9 és RV2 által alkotott finomhangolási opció miatt ugyan nem lehetséges teljes tartományban (± 12 V) állítani az offsetet, de ez nem is volt követelmény a tervezés során, ezért nem okoz gondot.

4.3.5.8. Kimeneti áramerősítő

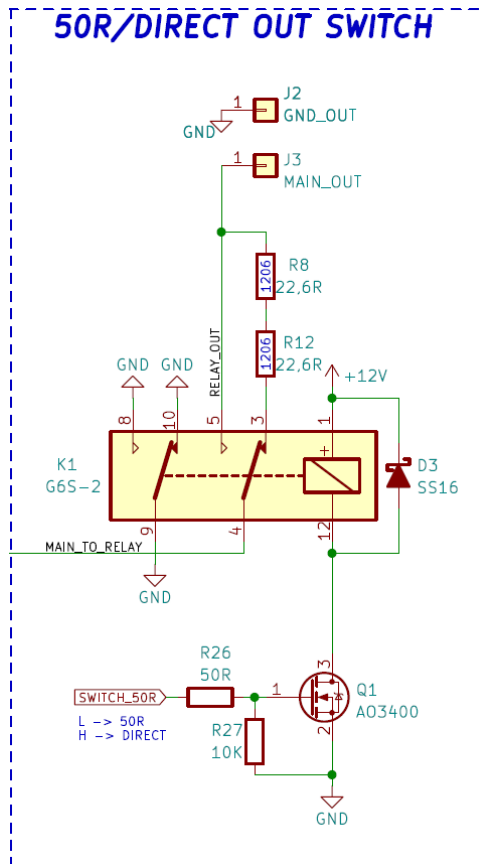


4.17 ábra

Kimeneti áramerősítő

Az előző fokozatból jövő OPA810^[5] kimenetét egyenesen kivezetni a külvilágba nem tartottam jó ötletnek. A kimenőárama elérheti akár a 75 mA-t is, de az SOT23 tok miatt és mivel alapvetően nem meghajtásra való, nem mernék rá biztonsággal kötni 10-20 mA-nél nagyobb terhelést. De mivel a kimenet terhelhetősége is szempont volt a tervezés során, ezért áramerősítés gyanánt a kimondottan erre a célra való BUF634A^[8] típusú IC-t választottam. Ezzel elérhető elméletben akár ± 250 mA kimenőáram is. 210 MHz sávszélességre is képes ugyan, de jelen alkalmazásban ez nem indokolt, ezért 35 MHz sávszélesség korlátozó módban használom.

4.3.5.9. Kimeneti impedancia kapcsoló



4.18 ábra

Kimeneti impedancia kapcsoló

A külvilágba kivezetés történhet direkt módon úgy, hogy a BUF634A^[8] kimenete közvetlen csatlakozik a kimenő csatlakozóra vagy úgy, hogy impedancia illesztés gyanánt sorba kapcsolódik egy olyan értékű ellenállás, amivel a szabványos 50 Ω kimeneti impedanciát megkapjuk. Egészen pontosan 50,2 Ω -ra adódik a kimenő impedancia a BUF634A^[8] 5 Ω kimeneti impedanciája és a 2db sorba kötött 22,6 Ω ellenállás miatt. Az egész kapcsolásban 0805 méretű SMD ellenállásokkal terveztem, de az itt látható R8 és R12 kivételt képeznek. A kimenő áram ezeken keresztül folyik, ami ezen ellenállások melegedéséhez vezet, ezért indokolt az 1206 méret használata.

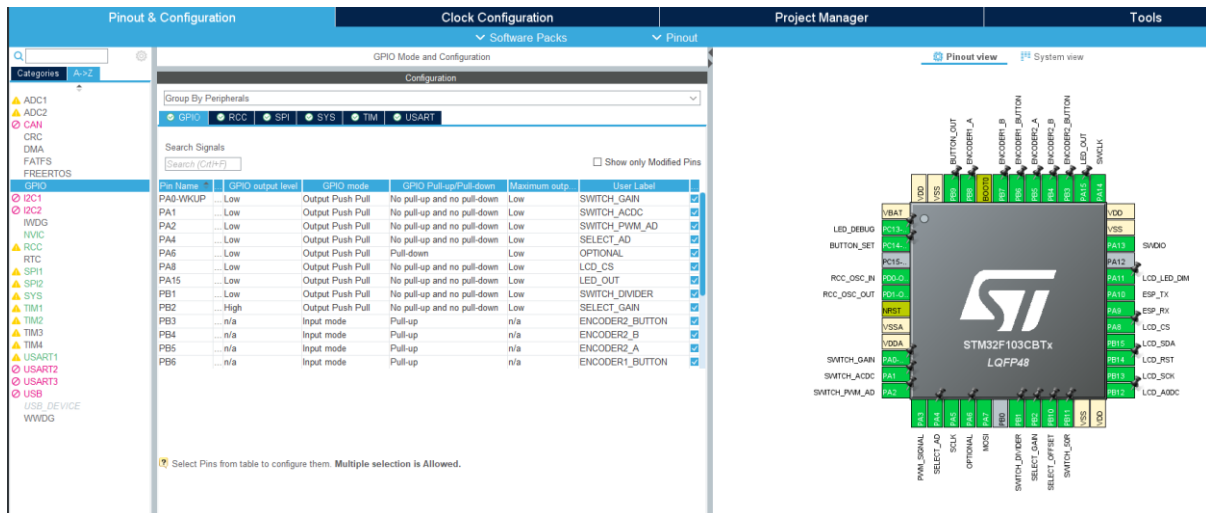
Az itt tovább haladó jel esetében már érdemi terhelés is jelentkezhethet, amit az analóg kapcsoló IC-k nem viselnek el, ezért egy G6S^[11] típusú 2 A terhelhetőségű kimondottan jelkapcsolásra tervezett relé végzi el az átkapcsolást. A relé meghajtása egy N-MOSFET-tel történik, ami az R26 jelű ellenálláson keresztül kapcsolódik az MCU-hoz. A FET-et egy SS16 típusú schottky dióda védi a kikapcsoláskor keletkező ellenirányú feszültséglökéstől.

Két áramkörös a relé, de csak egy kör van használva. Annak érdekében, hogy a kihasználatlan kör ne szedjen össze véletlenül se zavarokat a külvilágból, a pólusai GND-re vannak kötve.

4.4. Program

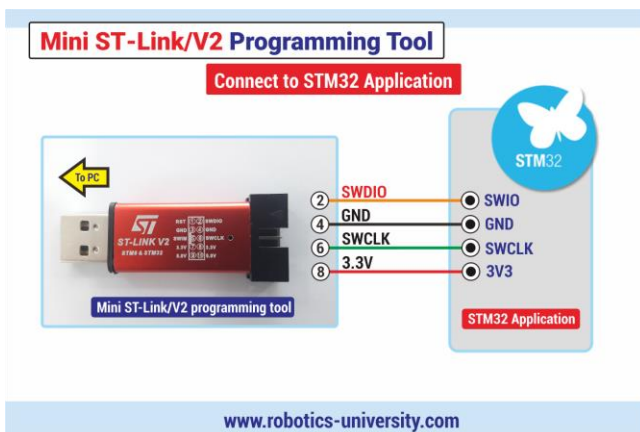
4.4.1. Fejlesztés

Az STM32F103CBT6^[9] mikrokontrolleren futó szoftver fejlesztése STM32CubeIDE 1.8.0 programban történt. A gyártó által biztosított HAL könyvtárakat használtam és C nyelven írtam a kódot. Ahol lehetett, ott a beépített konfigurátort igénybe vettem, például a perifériák beállítását ezen keresztül végeztem, ahogy az órajel elosztást is.



4.19 ábra

MCU lábkiosztás konfigurációja STM32CubeIDE-ben



4.20 ábra

Programozó bekötése^[4]

A megírt szoftver feltöltésére, a Mini ST-LINK^[4] V2 nevű eszközt használtam. Ez PC-vel összeköthető USB kábellel, majd pedig a GND, SWDIO, SWCLK lábakat elég bekötni. A készülék bekapcsolt állapot mellett programozható, így nem igényel külső tápfeszültséget.

4.4.2. Működés

A készülék biztonsági okokból mindig deaktivált kimenettel indul. A bekapcsolás után a képernyőn 1,5 másodpercig látható a szoftver verziószáma és kiadási dátuma, majd megjelenik a főképernyő (7.7 ábrán megfigyelhető). Itt lehet látni szekciókra bontva a következőket:

- A kimenet direktbe van kapcsolva vagy pedig 50 Ω illesztéssel
- Kimenő jel hullámformája
- Offset beállítás százalékosan és sávos jelzéssel
- Jel nagyságának (erősítésének) beállítása százalékosan és sávos jelzéssel
- Kimenő jel frekvenciája

A forgó enkóderekkel lehet navigálni a főképernyőn és a menüben, állítani a kívánt értékeket és befelé lépkedni a menükben. A „Back” vagyis a vissza jelzésű nyomógommbal lehet visszább lépni egyet, illetve többszöri megnyomással újra a főképernyőre jutni.

A baloldali enkóder megnyomásával az aktuálisan beállítandó érték lépésköze állítható, forgatásával pedig az érték módosítása lehetséges mindkét irányba.

A jobboldali enkóderrel az almenübe lehet belépni és navigálni. Az almenük lehetőséget biztosítanak arra, hogy a főképernyőn nem megjelenő beállításokat is elérjük. A következő funkciókat lehet módosítani a menürendszerbe belépve:

- DC / AC kimeneti mód közti váltás
- Offset 0-hoz tartozó 0...255 közötti érték módosítása (kalibrálás)
- GUI színeinek variálása
- Kijelző fényerejének módosítása

Az aktuális beállításokat egy rutin összehasonlítja az egy perccel korábbi állapothoz képest és ha változást talál, akkor elmenti a belső memóriába. Ezzel a módszerrel oldottam meg az automatikus mentést az írási műveletek minimalizálása érdekében. Ez értelemszerűen azt is jelenti, hogy ha a kikapcsolás előtti 1 percben módosulnak a beállítások, akkor elvesznek.

4.5. Egyéb megoldási módok

A rendszer tervezése közben többször felmerült bennem, hogy vajon a legideálisabb módszert választom-e az adott feladat megoldására. Sok más elektronikai projekthez hasonlóan itt is sokféle megvalósítás lehetséges. Úgy gondolom, érdemes megnézni milyen egyéb módok lehetségesek egy-egy rész megvalósítására, hogyan lehetne más megközelítést alkalmazni.

Kijelző

A lehetőségek száma igen széles, a hétszegmenses kijelzőktől kezdve a karakteres LCD-n keresztül az OLED verziókig sokféle megoldás lehetséges, mindezek igen változatos méretben és képaránnyal. Kérdés mennyire lehet praktikus egy nagyobb vagy más jellegű megjelenítő alkalmazása. A kisebb az kevésbé informatív, a nagyobbat pedig nehezebben lehet kezelni, akár fizikai, akár szoftveres oldalról közelítjük meg, de tény, hogy könnyebben olvasható.

Vezérlőegység

Ezen a téren is inkább a nagyobb tudásúak felé tekintenék. Lehetne olyan megoldást használni, ami gyárilag képes WiFi kapcsolatra, ezzel a máris nem lenne szükség külső modulra a távoli vezérléshez. Ez annyiból is jobb lehet, hogy ezek a vezérlők általában alacsonyabb frekvencián üzemelnek, nagyobb a számítási kapacitásuk, vagyis gyorsabbak.

Alapjel előállítás

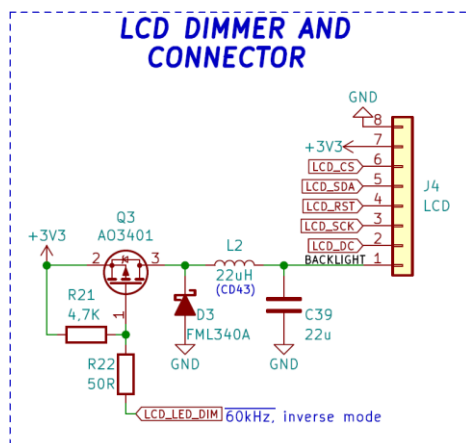
Több irány elképzelhető, lehet diszkrét elemekkel vagy akár nagysebességű DAC felé elmenni. Utóbbi megoldás nagyon jó, de rendkívül gyors vezérlőegység kell hozzá, legjobb ha többmagos processzorral rendelkezik, hogy az egyik mag csak erre legyen dedikálva. Ez növeli a komplexitást, a költségeket és persze a fejlesztési időt.

Jelformálás

Léteznek közvetlen digitális vezérlésű műveleti erősítők, amikkel egy kicsit más módon lehetne formálni a jelet, sőt némely mikrovezérlők tartalmaznak beépített perifériaként ilyen. Ezen felül több fokozatot is lehet használni a jelútban a nagyobb felbontás és precizitás növelés érdekében. Kevesebb fokozattal is megoldható lehet, de akkor szoftveres trükkökkel kell kiküszöbölni a felmerülő nehézségeket.

5. A PROJEKT FEJLESZTÉSI ELŐZMÉNYEI

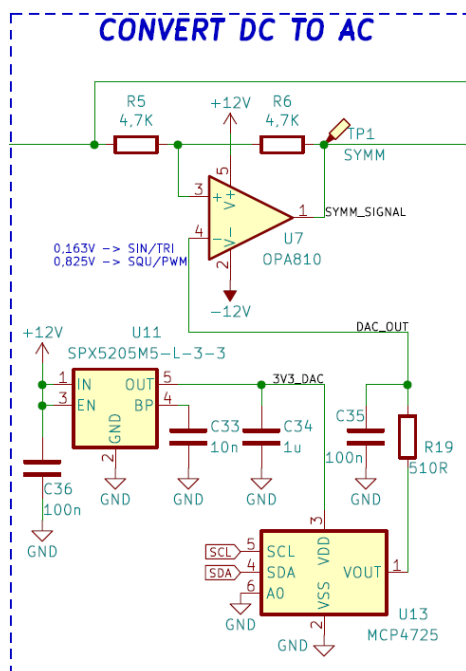
Mivel a bemutatásra kerülő egy továbbfejlesztett verzió, így meg kellett előznie egy korábbi. Erről fogok a továbbiakban egy kis betekintést adni, hogy az ezt megelőző legelső verziójú kapcsolás mikben tért el és milyen problémákba ütköztem.



5.1 ábra

Korábbi LCD csatlakozás

Az LCD fényerejének a vezérlésére feleslegesen túl lett bonyolítva. Egy komplett Buck topológiájú kapcsolóüzemű tápegységet terveztem, hogy a fényerő minden beállítás mellett biztosan egyenletes legyen. Aztán rájöttem, hogy kellően magas frekvenciával meghajtva a FET-et, nem fog látszani szemmel, nincs szükség diódára és LC szűrőre.

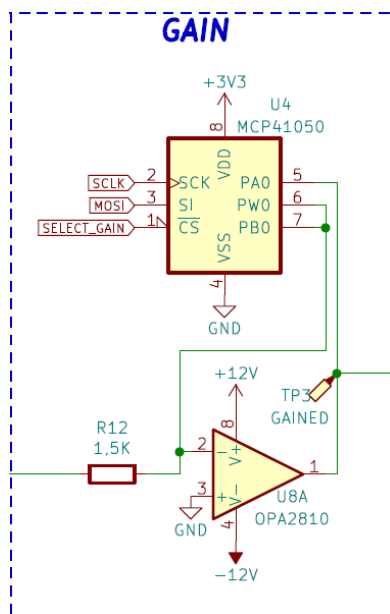


5.2 ábra

Korábbi DC-AC eltolás megoldása

A DC-AC átalakító részt így oldottam meg, a referencia feszültséget egy DAC szolgáltatja, a DAC stabil működését pedig egy LDO stabilizátor és RC szűrők segítették. Nem volt rossz ötlet, de némileg egyszerűbb és jobb megoldásnak gondolom az újabb kapcsolásban korábban tárgyalt megoldást.

Mint látható külön megy tovább a DC és az AC jel. Ezek kapcsolására relét használtam, ami jó megoldás, de felesleges. Sokkal egyszerűbb multiplexert használni, kb. századakkora méretben megoldható ugyanaz a feladat.



5.3 ábra

Korábbi jelszint állítás megoldása

A jel erősítés beállítására teljesen más megoldást használtam. Ezzel a résszel volt a legtöbb komplikáció. A műveleti erősítő visszacsatolásában lévő egyik ellenállás helyett egy az egyben bekötöttem a digitális potenciométert, ráadásul a visszacsatolás gerjedést megakadályozó párhuzamos kondenzátort sem tartalmazott. Meglehetősen gerjedt ez a rész, izzott az IC, ráadásul ez olyan típus volt, ami 2db OPA810^[5]-et tartalmazott. Utólag ezt sem gondolom jó ötletnek, immáron jobb megoldásnak tartom, ha külön vannak szeparálva az erősítők, külön tokozásban.

A gerjedés fő oka az volt, hogy sokkal lassabb működésű a digitális potenciométer, ezért nagyobb frekvenciák esetén csillapítás híján úgy viselkedett mintha ott sem lett volna, ilyenkor az erősítő gyakorlatilag nem látott visszacsatolást és emiatt oszcillált.

Kimeneti áram buffert sem használtam, úgy véltem elég lehet a műveleti erősítő kimenetét egyenesen kivezetni. Jobban megvizsgálva a képességeit rájöttem, hogy nem a legjobb ötlet, mindemellett nem elégséges a kimenő árama, emiatt nem valósult meg a kívánt előzetes cél.

Tanulva a fent említett problémákból, a fejlesztés során különös figyelmet fordítottam az erősítést beállító részre, továbbá a megfelelő digitális potenciométer kiválasztására és hogy olyan módon alkalmazzam, ami stabil működést eredményez.

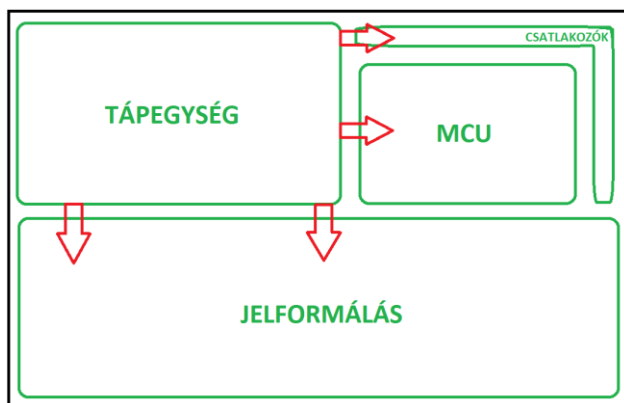
6. KIVITELEZÉS

6.1. Nyomtatott áramkör tervezés, kivitelezés

A NYÁK megtervezése a már korábban említett sokrétű KiCad programmal történt. Ez a program képes BOM lista létrehozására is, ami beültetésnél nagy segítség. Az elkészült gerber fájlok megtekintésére is használható, emellett tartalmaz egy elég hasznos kalkulátor csomag funkciót, amiben megtalálható pár elektronikai és fizikai méretező segéd. Az elérhető 3D modellektől függően meg lehet tekinteni, hogy miként fog kinézni a terv a fizikai valóságban, de azt is, hogy például a feliratok hogyan mutatnak majd rajta. A hardver fizikai tervezése során több szempont szerint haladtam, próbáltam figyelembe venni minél több dolgot a pannellel és az alkatrészek elhelyezésével kapcsolatban.

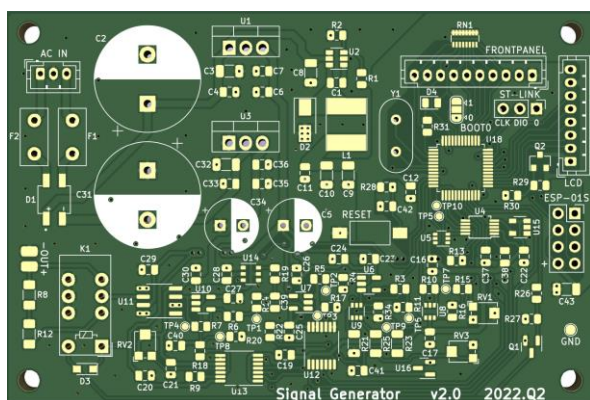
A főbb tervezési szempontok a következők voltak:

- 2 oldalú legyen a terv
- 4 sarokba 4 furat kialakítás a rögzítéshez
- Lehetőleg minden alkatrész a felső rétegre kerüljön
- A kiválasztott dobozban kényelmesen elférjen a többi periféria mellett
- Könnyen, de stabilan rögzíthető legyen
- Minél kevesebb különálló csatlakozás legyen, csak amennyi szükséges
- Az opcionális WiFi modulnak legyen kialakított helye és jó orientációja
- A tápegység, a vezérlés és a jelformálás rész legyen elválasztva amennyire lehet
- A panel előlaphoz közeli széle körül legyen az előlapi és LCD csatlakozója
- Különös figyelem az áramhurkokra, minél több GND felület, főleg a jel útja körül
- A panel alsó rétege legyen teliföld, amit minél kevesebb vezetősáv szakít meg
- A disszipáló alkatrészeknek biztosítva legyen a megfelelő hűtés
- Tesztpontok kialakítása az építés, bemérés és későbbi javítás megkönnyítéséhez

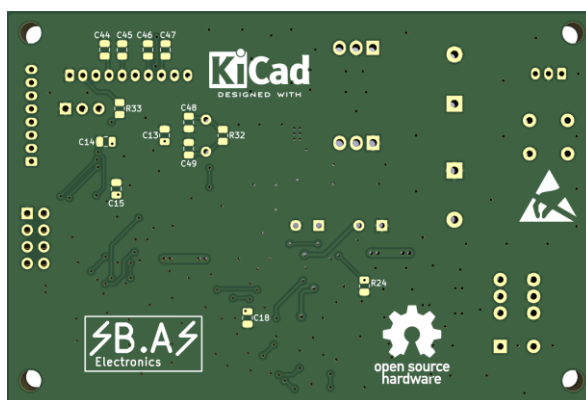


6.1 ábra
Modulok elrendezési terve

A szempontokat figyelembevéve először megszületett egy kezdeti elrendezés terv, hogy blokk szinten mi hol helyezkedjen el és hogyan alakuljanak a jel és áramirányok. Ezt követően készítettem el magát a NYÁK tervet.



6.2 ábra
NYÁK terv felülnézet



6.3 ábra
NYÁK terv alulnézet

Jól látható a terven, hogy meglehetősen sok, látszólag funkció nélküli átvezetőfurat van a terven. Ennek oka, hogy a GND minél egységesebb legyen mindkét oldalon. Így csökkenthető a GND potenciálkülönbség a panelen, ez pedig fontos szempont volt a tervezés során.

A panel alsó oldalára csak minimális mennyiségű vezetősáv és alkatrész került, végül sikerült elérni azt, hogy majdnem minden a felső oldalra kerüljön. A vezetősávokon átfolyó áramerősségeket is figyelembe vettem, a tápvonalakat vastagabbra terveztem és lehetőség szerint minél csillagpontosabb kialakításra törekedtem.

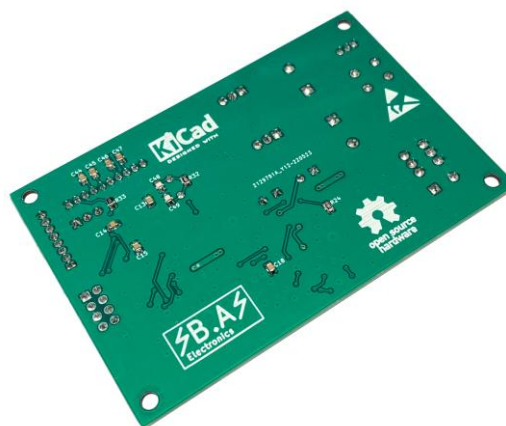
A tervezés legelején, már az ötlet megfogalmazásakor tudtam, hogy ennek a projektnek a NYÁK-ját otthoni körülmények között biztosan nem tudnám megcsinálni. Hobbimból kifolyólag nem áll tőlem távol a NYÁK gyártás, de ez már nem az a szint, amit kényelmes lenne elkészíteni. Gyors, minőségi és költséghatékony megoldásra volt szükség. Első körben magyarországi NYÁK gyártók ajánlatait néztem át. A lehetőségek feltérképezése után arra jutottam, hogy minden tekintetben jobban járok, ha egy külföldi (kínai) gyártótól rendelem meg a panelt. Így is tettem, a korábban már bevált JLCPCB-től rendeltem meg a panelt.

Amint megérkezett a panel és az összes szükséges alkatrészt is sikerült beszereznem, elkezdtem a beültetést. Egy forrasztóállomás segítségével saját kezűleg ültettem be minden alkatrészt, hőlégfúvót nem használtam, emiatt nem volt a legegyszerűbb az STM32^[9] mikrovezérlő beültetése és az egyéb kis lábtávolságú IC-kkel való munka, de úgy gondolom a végeredmény összességében szépre és hibamentesre sikerült.



6.4 ábra

Beültetett panel felülnézetből



6.5 ábra

Beültetett panel alulnézetből

Beültetés után természetesen megtisztítottam a panelt a forrasztási folyamatok során rajta marad folyasztozszer maradványoktól. Nem lett volna muszáj, mivel olyan fajtát használtam, ami rajta maradhat. Ennek ellenére úgy gondolom érdemes megtisztítani, nem csak az esztétika miatt, de a nem kívánt kapacitások is megszüntethetőek ezáltal.

6.2. Mechanikai munkák, készülék építés

A berendezés építése során többféle mechanikai munkát kellett elvégezni. A korábban e téren szerzett tapasztalatom miatt ez nem jelentett problémát, de persze a szép, részletes és igényes munkához mindig nagy odafigyelés és precizitás szükséges. A következőkben kifejttem, hogy milyen anyagok lettek kiválasztva és ezek miként lettek megmunkálva.

Előlap és hátlap szerelése

Előlap és hátlap alapanyagnak egyaránt egy 1,5 mm vastag, nem túl kemény műanyag lapot választottam, ami korábban táblaként funkcionált. Ez azért volt jó választás, mert könnyű volt megmunkálni és szeretek vele dolgozni, jobban, mint a fémekkel. A dobozhoz új korában értelem szerűen tartozott egy gyári műanyag elő és hátlap, de egy korábbi projekt szintén ebben a dobozban kapott helyet, emiatt azok meg lettek munkálva régebben és nem tudtam volna újból felhasználni, pláne nem esztétikusan.

A lapok kivágását, kifűrésát és minden egyéb mechanikai munkát magam végeztem. A munkafolyamat végén az esztétika, vagyis a későbbi festés minél szebb fedése érdekében először lecsiszoltam a felületeket, majd alaposan megtisztítottam. Ezután lefestettem matt fekete spray festékkel mindegyik lap minden oldalát. A jobb fedés és strapabíróság jegyében a „látható” oldalakat 2 rétegben. Ezek után kezdődhetett a beszerelés és az előlapon elhelyezkedő elemek bekábelezése.

LCD szerelése

Az LCD panel illesztése volt talán a legnehezebb feladat az előlap szerelésében. Maga a megjelenítő rész körül van egy 2mm vastag fekete keret, utána pedig fényes fehér műanyag keret. Úgy kellett pozicionálni, hogy ez a külső fehér keret pont ne látszódjon, viszont a mellette lévő feketéből minél több, hogy a betekintési szög megfelelő legyen, vagyis a doboz vastagsága miatti beljebb helyezés ne takarjon el megjelenítési felületet.

Nyomógombok illesztése

A két darab nyomógomb beszerelésénél különösképpen ügyelni kellett arra, hogy könnyen megnyomható legyen, ne akadjon a túl szoros ragasztás vagy túl szűk furat miatt.

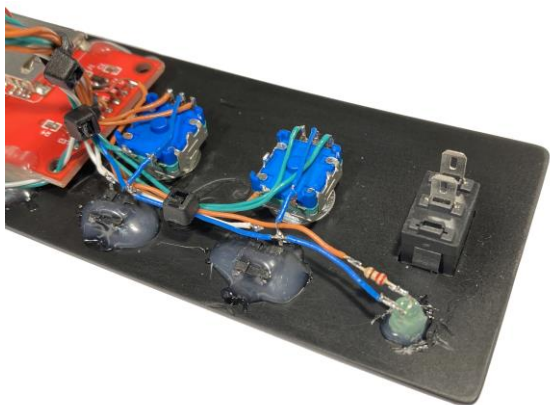
LED-ek illesztése

3 mm átmérőjű, lapos végű LED-eket használtam, ezek illesztésénél leginkább azt kellett figyelembe venni, hogy a lehető legjobban szintben legyen az elülső oldallal.



6.6 ábra

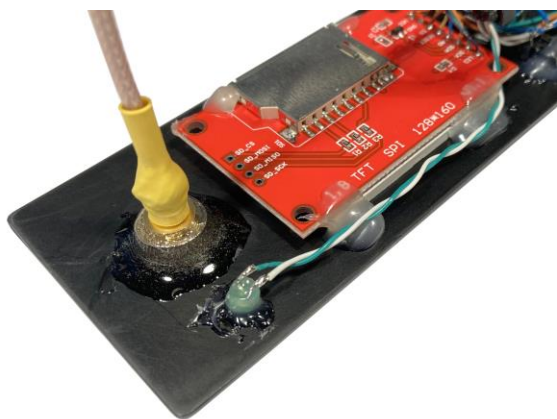
Előlap beszerelése utáni állapot



6.7 ábra

Rögzítési és kábelezési megoldások

Amit csak lehetett azt csavarozással vagy pattintással rögzítettem. Amit nem lehetett, az ragasztva lett. A legtöbb ragasztási műveletet melegragasztóval oldottam meg, természetesen ügyelve arra, hogy csak ott használjam, ahol nem keletkezik érdemi hőmennyiség, nehogy újból meglágyuljon működés közben.



6.8 ábra

BNC csatlakozó és LCD rögzítése

Az előlapi BNC csatlakozót nem akarta fogni túlzottan a melegragasztó, emellett ez a legnagyobb fizikai terhelésnek kitett csatlakozó, így végül kétkomponensű ragasztóval rögzítettem.



6.9 ábra

Tápkábel bevezetése a hátlapon

A hátlapon csupán egyetlen furat van, ez pedig a bemeneti tápfeszültség (230 V) kábel átvezetésére szolgál. A kábel rögzítése fontos, ezt egy önszorító kábelátvezetővel oldottam meg. Használata egyszerű, csak rá kell nyomni erősen két oldalról a kábelre és bepattintani. A tartása erős, nem tud mozogni vagy kicsúszni.

NYÁK panel rögzítése



6.10 ábra

Panel rögzítő távtartók



6.11 ábra

Rögzítés anyacsavarral

A rögzítésre egyszerű fém távtartókat használtam. A panel 4 sarkán kialakított 3 mm átmérőjű furatokba jól illeszkednek a tartókon lévő M3 csavarszáruk. A beszerelés és kiszerelés egyszerűen történik, csavaranyák segítségével. Mivel a panel nincs kitéve nagy mechanikai és hőterhelésnek, így a távtartókat melegragasztóval rögzítettem.

Transzformátor rögzítése

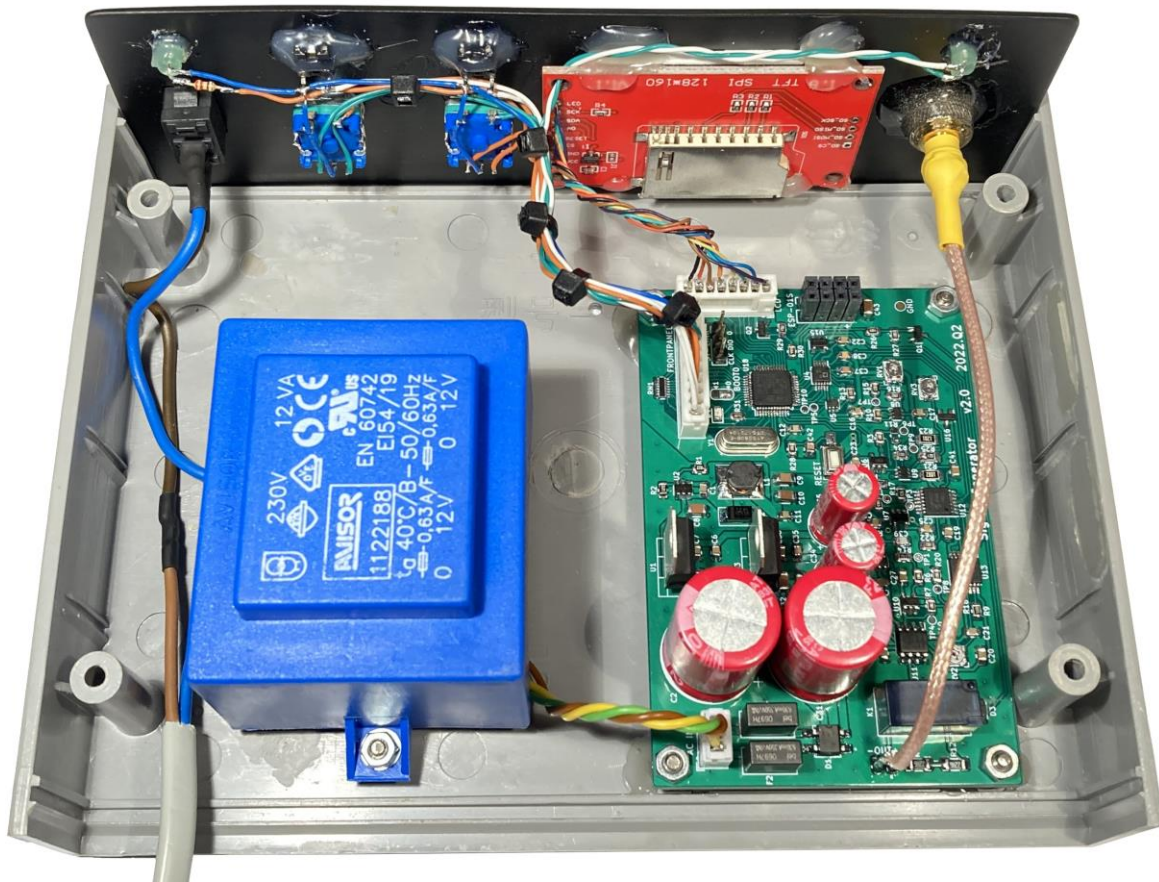


6.12 ábra

Transzformátor rögzítés kellékei

A transzformátor képviseli a legnagyobb súlyt a dobozban, ennek a rögzítése a legfontosabb feladatok egyike. A rögzítésére bár ugyanolyan fém M3 menetű távtartót használtam, mint a panel esetében, itt már ragasztás helyett átmenőcsavarral oldottam meg a stabilitás érdekében.

6.3. Belső elrendezés és kábelezés



6.13 ábra

Belső elrendezés és kábelezés

A komponensek rögzítése után következett a kábelezés. Az előlapi kezelőszervek (a főkapcsoló kivételével) már korábban bekábelezésre kerültek, így a beillesztés után lehetett csatlakoztatni a két csatlakozót. A transzformátor szintén ilyen módon kapcsolódik a panelhez.

Ami kivételt képez és forrasztva lett, az a BNC csatlakozóra menő koaxiális kábel, vagyis a kimenő jel. Itt egy erre a célra kialakított kábelt használtam, ami $50\ \Omega$ impedanciájú.

A 230 V nagyfeszültségű vonalon szintén forrasztást alkalmaztam. A bejövő tápfeszültség, a transzformátor és a főkapcsoló is forrasztva van vastag szigetelésű $0,75\ \text{mm}^2$ keresztmetszetű vezetékkel. A berendezés kettős szigetelésű, teljesen műanyag a doboz, ezáltal nem szükséges a földelés és elég volt egy kettős szigetelésű kábelt alkalmazni a 230 V hálózati csatlakozáshoz. A nagyfeszültségű részeknél zsugorcsovel szigeteltem minden lehetséges pontot, ennek köszönhetően nincs olyan pont a dobozban, ahol szabad kézzel érinthető lenne a 230 V.

6.4. Az elkészült berendezés

Végül felkerültek a felirat címkék és a forgatógombok is, ezzel elnyerte végső formáját. A címkék egy vékony öntapadós matt lapra lettek kinyomtatva.



6.14 ábra

A berendezés eleje



6.15 ábra

A berendezés hátulja

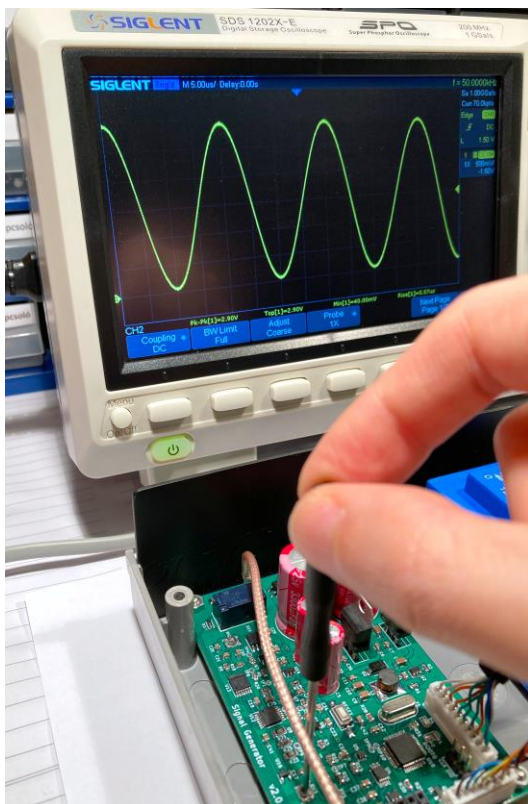
7. ÁRAMKÖR ÉLESZTÉS ÉS KEZDETI BEÁLLÍTÁSOK

A legelső indítás előtt, nulladik lépés gyanánt érdemes végig mérni multiméterrel a tápfeszültségek vonalát, hogy nincs-e valahol zárlat. Előfordulhat gyárilag hibás vagy beforrasztásnál meghibásodott alkatrész, de ilyen kis méreteknél van esély forrasztás közben keletkezett véletlen zárlatra is. Most is így tettem, végig mértem és mindent rendben találtam.

Első lépésként csak pozitív tápfeszültséget adtam rá, amit labortápegységgel lassan növeltem a névleges értékig, figyeltem az áramfelvételt, közben pedig mértem a 12 V és 3,3 V vonalakat, hogy működnek-e a stabilizátorok. Itt is minden stimmelt.

Következő lépés a mikrovezérlő programozása volt. Ezt egy egyszerű LED villogtató programmal ellenőriztem. Sikerült a feltöltés és villogott a LED is, így ez a rész is működik.

Ezután szimmetrikus megtáplálás mellett figyeltem az áramfelvételt és a melegedést, de szerencsére nem találtam semmi rendellenességet. Tegyük hozzá, ilyen azért ritkán van első indításnál, először el sem hittem, hogy semmi rendellenesség nem mutatkozik.

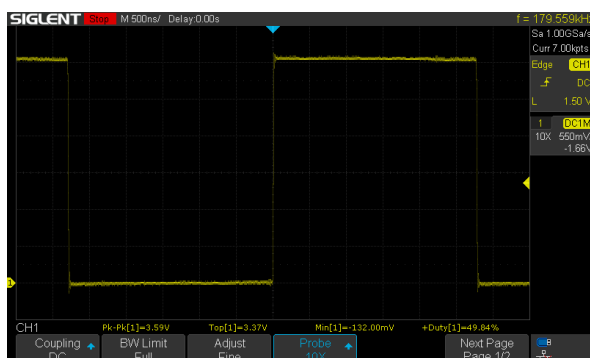


7.1 ábra

Kezdeti finomhangolás

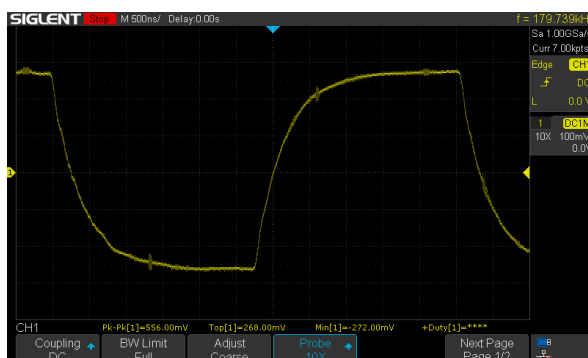
Ezután beállítottam egy jelet és végig mértem a jel útjában lévő tesztpontokat oszcilloszkóppal. Ahol kellett, ott korrigáltam a trimmer potenciométerek segítségével. Végül a kimeneten megjelenő jelalakot figyeltem és mértem. Különböző jelalakokat állítottam be, különböző frekvenciáknál vizsgáltam a beállításokat és ahol szükségesnek ítéltam, ott finomhangolásokat végeztem. A kapcsolási rajzon elhelyezett tesztpontok szöveges összefoglalója, a részletes jelölések és értelmezések nagy segítséget jelentettek a bemérés során.

Bemérés és megfigyelések eredménye



7.2 ábra

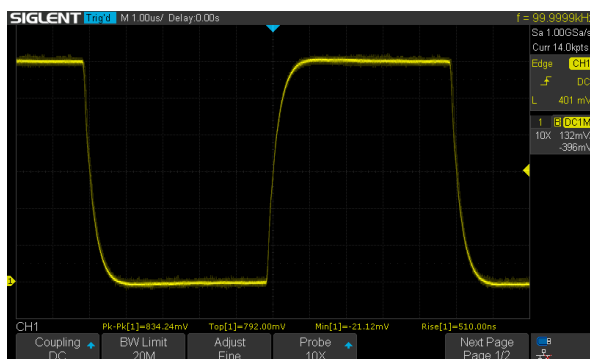
TP5 – 180 kHz négyyszögjel



7.3 ábra

TP3– 180 kHz négyyszögjel

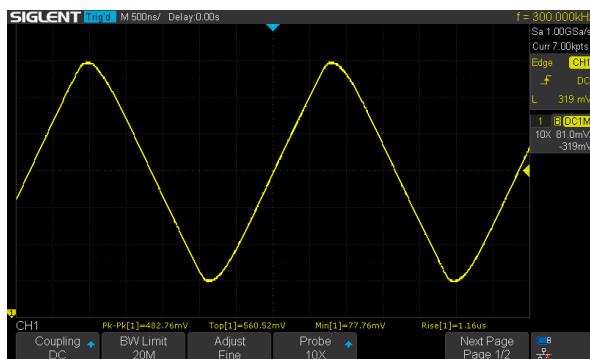
A bemérés során amikor végig mértem a jel útját a tesztpontok mentén, arra lettem figyelmes, hogy az MCU által kiadott tökéletes négyyszögjel ~ 100 kHz feletti frekvencián a TP3-ig eljutva eléggé nem hasonlít a kiinduló jelre. A digitális potenciométerből felépített feszültségosztó tag csökkenti a felfutási időt, ez jól látszik a 7.2 és 7.3 ábra közti különbségen. Szinuszejel esetén nem volt eltérés, több MHz esetén is szép volt a jel.



7.4 ábra

TP3 – 100 kHz négyyszögjel

Végül úgy ítéltam meg, hogy 100 kHz legyen a határ, aminél még elfogadható a kinézet. Korlát nincs beállítva rá, tehát a kezelőszervekkel be lehet állítani nagyobb frekvenciát is, de ott már nem garantált, hogy valóban négyyszög formája lesz.



7.5 ábra

TP3 – 300 kHz háromszögjel

Ez a hatás háromszög jelnél is megfigyelhető, bár ott valamivel magasabb frekvencián. A 7.5-ös ábrán az látható, hogy 300 kHz-nél már nem szép csúcsos a jel, kissé lekerekített. Itt 200 kHz-nél húztam meg a határt, ahol még szépnek mondható.

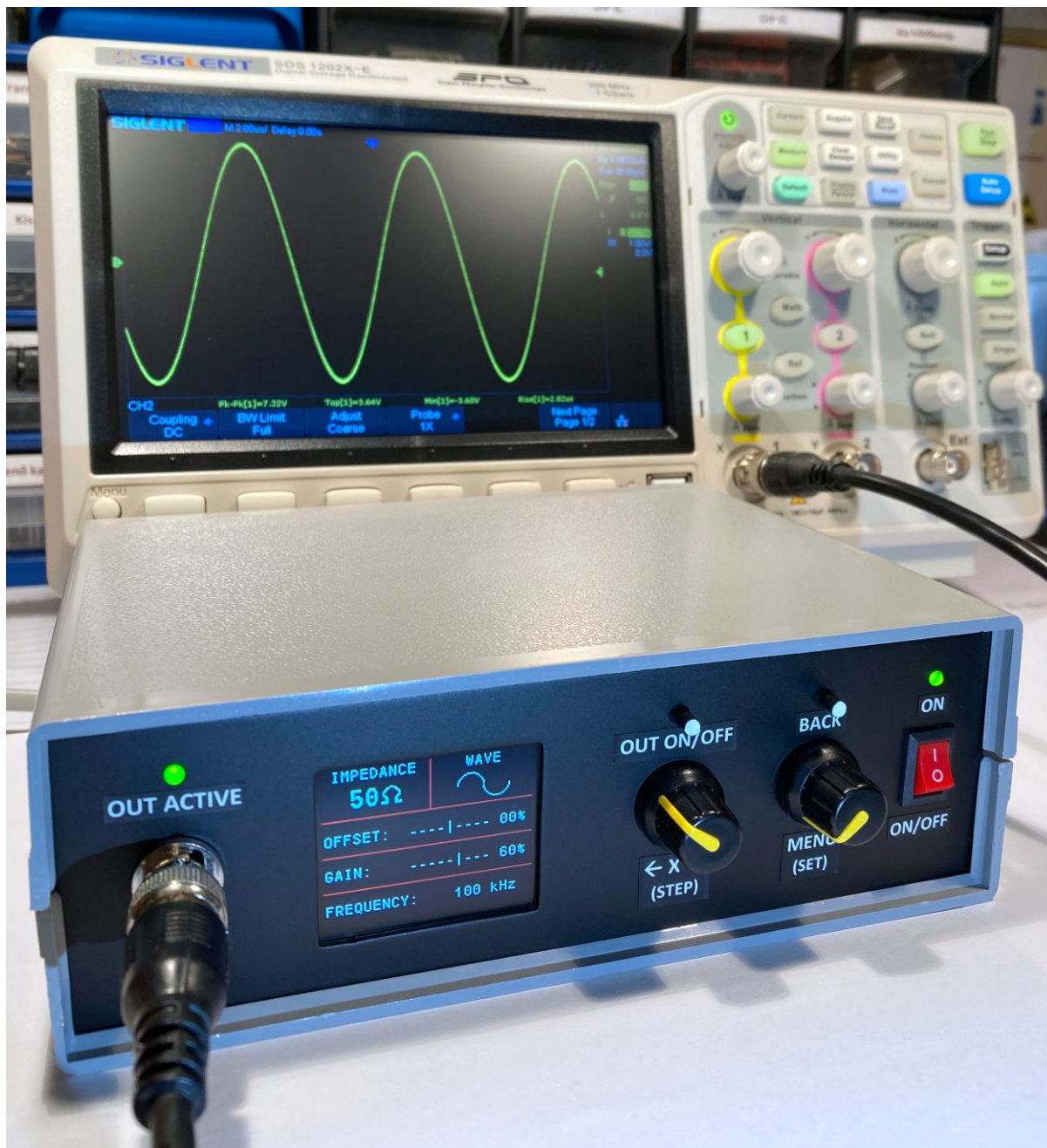
A kialakult végső specifikációk

A fentebb ismertetett okok miatt be kellett látnom, hogy a végeredmény némileg alulmarad képességeket tekintve a kezdeti célokhoz képest. A digitális potenciométer képességeiből és alkalmazástechnikájából adódóan a kimenő jel felfutási ideje korlátozott, ez pedig a háromszög és négyszög jelek felső határfrekvenciáját lejjebb tolja a vártaknál. A kialakult végső specifikációk tehát kicsit módosultak a célokhoz képest, de összességében elégedett vagyok, mivel ezt leszámítva minden más várakozásaimat teljesíti a műszer. Az alábbi táblázatban láthatóak a végső specifikációk:

Tulajdonság	Érték	Mértékegység
Hálózati tápfeszültség :	230	AC V
Felvett teljesítmény max. :	15	W
Védelmek :	túláram, rövidzár	
Kimeneti áram max. :	±250	DC mA
Kimeneti feszültség max. :	13	V _{p-p}
Kimeneti feszültség alsó és felső limit :	±12	V
Offset állítás lépésköz :	256	lépés
Kimenő jel nagyság állítási lépésköz :		
0-0,8V között	256	lépés
0,8-13V között	256	lépés
Kimenő impedancia :	50	Ω
Felfutási idő :	500	ns
Frekvencia maximum :		
szinuszjel	2	MHz
háromszögjel	200	kHz
négyszögjel	100	kHz
Kijelző :	160x128	px

7.6 ábra
Specifikáció

Az elkészült és bemért, beállított berendezés működés közben



7.7 ábra
A berendezés működés közben

8. ÖNÉRTÉKELÉS

8.1. Elért eredmények

Úgy gondolom az egész projekt alatt rengeteg tapasztalattal gazdagodtam. Új területekbe nyertem betekintést és szereztem ismereteket. Ezeken felül természetesen a már eddig ismert módok, megoldások és eszközök területén is sikerült gazdagítani a meglévő ismereteim.

Egy komplex berendezés tervezését és kivitelezését sikerült véghez vinnem és ez jó érzés. Csináltam korábban hasonló bonyolultságú projekteket, de kétség sem fér hozzá, hogy eddig ez a volt a legbonyolultabb és leghosszabb ideig tartó fejlesztési folyamat.

Eleinte elindultam egy gondolat mentén, hogy jól jönne egy jelgenerátor. Ezt követően elkezdtem felmérni a lehetséges megvalósítási módokat. Végül belevágtam és úgy gondoltam a kitartás meg fogja hozni az eredményét. Úgy érzem így is lett, elértem a célokat.

Persze egy program, egy eszköz vagy bárminemű fejlesztés sosem lesz kész 100 százalékosan. Mindig szükség van egy pont kijelölésére, miután késznek nyilvánítható, de valójában az átadás vagy elkészülés pillanatában mindig vannak apróbb hiányosságok vagy rejtett hibák, de ez természetes. Célokat, hogy javítsak a szoftveren, legyen szebb és praktikusabb az LCD-n megjelenő felhasználói felület. Emellett szeretném idővel a WiFi modult is implementáljam a berendezésbe, hogy egy weboldal vagy alkalmazás segítségével távolról is vezérelhető legyen az eszköz.

8.2. Továbbfejlesztési lehetőségek, módosítások

A berendezés fejlesztése és használata közben eredő tapasztaltakból, a működésből és mérési eredményekből arra a következtetésre jutottam, hogy több területen is lehetne módosítani, illetve javítani a működést. Pontokba szedve ismertetem a meglátásaim, észrevételeim és a lehetséges jövőbeni teendőket. Ezek persze csak opciók, ezen pontok megvalósítása nélkül is minden további nélkül jól működik a készülék.

Másik doboz

A képekből látszik, hogy a belső térben van még szabad hely bőven. Ez a belső hőmérséklet szempontjából jó hír. Amennyiben más szemszögből nézzük a dolgot, akkor a sok szabad hely azt is jelenti, hogy elférne a projekt egy kisebb dobozban is. Ezzel még kompaktabb lehetne a készülék, kisebb helyet foglalna.

Előlap szebb feliratozása

Szerintem egyszerű és jó megoldás a mostani, de lehetne fokozni az esztétikát is, mint minden mást. Ha több kis címke helyett egy nagy, teljes előlap méretű címke lenne ragasztva (ami nyilván nyomdai géppel ki lenne vágva a megfelelő helyeken) akkor jóval egységesebb és mutatósabb lehetne a megjelenés.

MCU programozó lábak kivezetése

Jelen formában a szoftver frissítéséhez le kell venni a doboz felső burkolatát, hogy hozzáférhető legyen a programozó csatlakozó. Ez nem túl praktikus, de vegyük figyelembe, hogy alapvetően nem cél a szoftver gyakori cseréje, sőt az a jobb minél kevesebbszer kell.

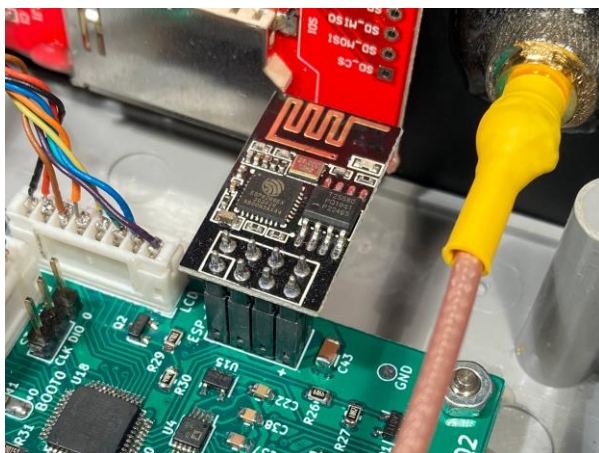
GUI fejlesztés

A grafikus felhasználói felület kialakítására kevés időt szántam a projekt többi részéhez képest. Ez valamennyire észlelhető is, úgy érzem érdemes lehet fejleszteni a menürendszert.

Hővédelem

Jelenleg az IC-k beépített áramkorlátozása és hővédelme az, ami védelmet jelent a túlmelegedés ellen. Ennél sokkal elegánsabb és profibb megoldás lenne egy vagy több hőszenzor elhelyezése, ezzel növelhető lenne a biztonság egy esetleges túlmelegedés esetén.

WiFi modul csatlakoztatása és implementálása



8.1 ábra

ESP-01S^[10] modul behelyezve

A panelen helyet kapott egy csatlakozó, amire rá lehet helyezni egy ESP-01S^[10] típusú modult. Ez még önmagában nem jogosítja fel semmi extrára a működést, ahhoz szoftveresen is implementálni kell. A megfelelő szoftveres kiegészítés megírása után lehetőség nyílik a távvezérlésre.

A modul orientációját tudatosan választottam meg. Mivel a végén egy 2,4 GHz frekvenciájú antenna van, nem árt minél távolabb helyezni a jel útjától, hogy a lehető legkevesebb áthallás és zavar keletkezzen. Emiatt van a szélén és áll kifelé antennával.

Más kapcsolástechnika a nagyobb felfutási idők érdekében

A felfutási idő korlátozottsága miatt négyszögjel esetén nem érdemes 100 kHz fölé menni, mert túl lassú lesz a fel és lefutás, nem lesz szép a jel. A fő limitáló tényező a digitális potenciométer. Ennek a más kapcsolásban történő bekötése javulást hozhat ezen a téren, de ez sok kísérletezést és mérést jelent. Ennek ellenére érdemes lehet foglalkozni a témával, sőt tervezek is, mivel az a háromszög jel szépségére is hatással lenne és akár többszáz kHz-el feljebb lehetne menni, ami azért nem lenne rossz.

Kapcsolóüzemű tápegység transzformátor helyett

A nagy és nehéz transzformátor helyett lehet alkalmazni kapcsolóüzemű tápegységet, ezzel jelentősen csökkenne a berendezés súlya. A fizikai mérete is jóval kisebb lenne, ezzel együtt már különösen megfontolandó lehet egy kisebb doboz használata. Hátránya is lenne, különösen EMI terén. Jól el kellene szigetelni a sokkal több kibocsátott zavar miatt, illetve a szűrésre is nagyobb figyelmet kell fordítani egy SMPS használata esetén.

9. ÖSSZEFOGLALÓ

Az egész ott kezdődött, sokszor felmerül az alkotásaim és kísérletezésem során, hogy jól jönne egy egyszerű kis kompakt, de mégis viszonylag nagy tudású jelgenerátor. A projekt eleinte csak kísérletezéssel, lehetséges alkatrészek utáni kutatómunkával indult, majd szépen lassan kezdett összeállni a kép, hogy hogyan képzelnék el egy saját készítésű jelgenerátort. Próbapanelen kísérleteztem, szimulációkat készítettem, majd egyre inkább kezdett összeállni a terv. Párhuzamosan készült a kapcsolási rajz, a fizikai alkatrészek és méretek kitalálása. Amikor már megvolt az alap koncepció és ki tudtam próbálni például a jelgenerátor IC-t vagy mondjuk az LCD kijelzőt a mikrovezérlővel, akkor már elkezdtem a szoftver írását is. Szép lassan elkészült egy első verziós panel, majd a tanulmányozása és az oszcilloszkópos mérések után kiderült, hogy pár hiba sajnos belecsúszott a NYÁK tervbe, de például a kapcsolat is tartalmazott elvi hibákat is, illetve némely alkatrészek nem alkalmasak arra amire szerettem volna, néhol pedig úgy éreztem túl lett bonyolítva egy-egy egység megvalósítása. Viszont a perifériák kezelésére és azok megismerésére nagyon jó volt, de legfőképpen tanulásra és a szakmai tudásom fejlődésére. A hibákat felismerve és kijavítva megterveztem a módosított verziót. A panel összeépítése és mérése után örömmel tapasztaltam, hogy végre 99%-ban úgy működik ahogy kell és ahogyan azt megálmodtam. Elvégeztem a hátralévő mechanikai munkálatokat, bővítettem a szoftver tudását és végül elkészült a fentebb bemutatott mű. Elégedett vagyok az eredménnyel, végre van egy jól használható, esztétikus, kompakt jelgenerátorom, aminek hasznát fogom venni a jövőbeni fejlesztéseimben és kísérletezéseim során. Több éven átívelő volt a fejlesztés, nagyon sok kutatás, fejlesztés és persze kitartó munka kellett hozzá, hogy elkészüljön és jól működjön, de úgy gondolom megérte.

10. SUMMARY

At the beginning, I often think in my creations and experiments that a simple, small compact, but still relatively powerful signal generator would be good. At first the project started with experimentation, researching possible components, and then slowly began to materialize of how I would imagine a homemade signal generator. I took experimentations, made simulations and then the plan started to realizing. In parallel, I was working on the circuit diagram, figuring out the physical components and dimensions. When I had the basic concept and could try out, for example, the signal generator IC or the LCD with the microcontroller, I started writing the software. Slowly I made a first version of the panel, and after studying it and measuring it with the oscilloscope, I found that some mistakes in the PCB design, but also, for example, the circuitry contained some errors in principle, some parts were not suitable for what I wanted, and some parts I felt were too complicated to implement. However, it was very good for handling and learning about the peripherals, but most of all for learning and improving my professional skills. I designed a revised version after identifying and correcting the mistakes. After assembling and measuring the panel, I was pleased to find that it finally works 99% of the time as it should and as I had envisioned. I completed the remaining mechanical work, expanded the software knowledge and finally finished the work shown above. I'm satisfied with the result, I finally have a usable, aesthetic, compact signal generator that I will use in my future developments and experiments. It has taken several years of development, a lot of research and development and of course a lot of persistent work to works well, but it is definitely worth it.

11. RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

BOM	–	Bill Of Material
IC	–	Integrated Circuit
ASIC	–	Application Specific Integrated Circuit
NYÁK	–	Nyomtatott Áramkör
PCB	–	Printed Circuit Board
LCD	–	Liquid Crystal Display
MCU	–	Microcontroller Unit
USB	–	Universal Serial Bus
OLED	–	Organic Light Emitting Diode
WiFi	–	Wireless Ethernet Compatibility Alliance (communication standard)
DAC	–	Digital-Analog Converter
GUI	–	Graphical User Interface
LED	–	Light Emitting Diode
TP	–	Test Point
SMD	–	Surface Mount Device
SPI	–	Serial Peripheral Interface
EMC	–	Electromagnetic Compatibility
PWM	–	Pulse Width Modulation
MLCC	–	Multilayer Ceramic Capacitor
PLL	–	Phase-Locked Loop
DDS	–	Direct Digital Synthesis
SOC	–	System On Chip
EMI	–	Electromagnetic Interference
ADC	–	Analog-Digital Converter
HAL	–	Hardware Abstraction Layer
BGA	–	Ball Grid Array

12. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9833.pdf>
2022.01.20
- [2] http://www.aosmd.com/res/data_sheets/AOZ1282CI.pdf 2022.02.14
- [3] <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/nlasb3157-d.pdf> 2022.02.06
- [4] <https://www.robotics-university.com/2016/05/mini-st-linkv2-programming-tool-for-stm8-and-stm32.html> 2022.02.17
- [5] <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa810.pdf> 2022.06.13
- [6] <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005207B.pdf> 2022.05.24
- [7] <https://www.vishay.com/docs/73854/dg447.pdf> 2022.05.01
- [8] <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/buf634a.pdf> 2022.05.01
- [9] <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103cb.html> 2022.04.20
- [10] <https://www.microchip.ua/wireless/esp01.pdf> 2022.09.25
- [11] https://components.omron.com/eu-en/datasheet_pdf/K093-E1.pdf 2022.03.09
- [12] <http://www.falstad.com/circuit/circuitjs.html> 2022.04.04
- [13] <https://www.ti.com/lit/an/snoa621c/snoa621c.pdf> 2022.04.08
- [14] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/28080533an106.pdf> 2022.04.08
- [15] <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103c8.html> 2022.02.01
- [16] Dr. Bársony András - Csopaki Katalin - Molnár Ferenc - Elektronikus Áramkörök II/B.
- [17] Molnár Ferenc – Zsom Gyula - Elektronikus Áramkörök II/A.
- [18] Molnár Ferenc – Zsom Gyula - Elektronikus Áramkörök II/A. 2. Kötet
- [19] Molnár Ferenc – Zsom Gyula - Elektronikus Áramkörök Példatár I.
- [20] Molnár Ferenc – Zsom Gyula - Elektronikus Áramkörök Példatár II.