

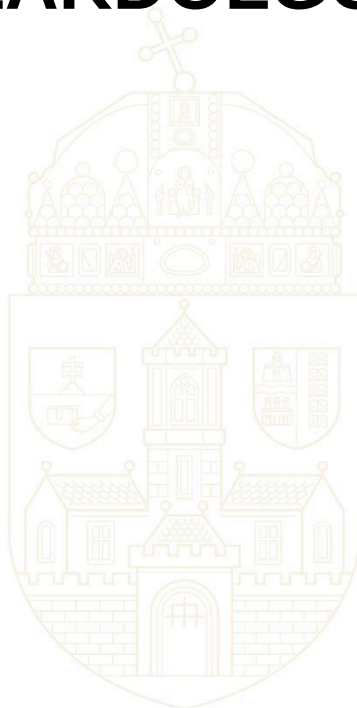


ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

KANDÓ KÁLMÁN VILLAMOSMÉRNÖKI KAR
ELEKTRONIKAI ÉS KOMMUNIKÁCIÓS RENDSZEREK INTÉZET
MŰSZERTECHNIKAI ÉS AUTOMATIZÁLÁSI TANSZÉK



SZAKDOLGOZAT



OE-KVK
2023.

Rózsa Balázs Henrik
T008385/FI12904/K



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Műszertechnikai és Automatizálási Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Rózsa Balázs Henrik

Szaktervezési száma: SZD2309040923421169

Törzskönyvi száma: T008385/F112904/K

Neptun kódja:

Szak: villamosmérnöki (magyar nyelven)

Specializáció: Műszer-automatika specializáció

A dolgozat címe: DDS elven működő függvénygenerátor megvalósítása mikrovezérlővel

A dolgozat címe angolul: Implementation of a function generator operating on the DDS principle with a microcontroller

A feladat részletezése: Készítsen DDS elven működő függvénygenerátort mikrovezérlővel, és tervezze meg a bemérését is!

Intézményi konzulens neve: Sándor Tamás

A kiadott téma elévülési határideje: 2025. 12. 31

Beadási határidő: 2023. 12. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2023. 10. 24.



Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom:

.....

belső konzulens

.....

külső konzulens



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

KANDÓ KÁLMÁN VILLAMOSMÉRNÖKI KAR
ELEKTRONIKAI ÉS KOMMUNIKÁCIÓS RENDSZEREK INTÉZET
MŰSZERTECHNIKAI ÉS AUTOMATIZÁLÁSI TANSZÉK



HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott hallgató kijelentem, hogy a szakdolgozat saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült szakdolgozatban található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Budapest, 2023.12.15



.....
hallgató aláírása

TARTALOM

1.	Bevezetés.....	6
2.	Specifikáció.....	7
3.	Hullámformák előállítási lehetőségei.....	8
3.1	Integrált analóg áramköri megoldások	9
4.	A DDS szintézis folyamata	10
5.	DDS céleszközök	12
6.	Néhány elérhető kereskedelmi alternatíva	14
7.	Az AD9833-as DDS generátor bemutatása.....	16
7.1	Serial Interface and Control Logic (Soros interfész)	17
7.2	Control register (Vezérlő regiszter)	17
7.3	FREQ0 és FREQ1 frekvencia regiszterek	17
7.4	PHASE0 és PHASE1 fázis regiszterek.....	18
7.5	A control register (vezérlő regiszter) bitjeinek jelentése és használata	19
8.	A függvénygenerátor logikai rendszerterve	22
9.	A függvénygenerátor fizikai rendszerterve	23
10.	A fő generátor.....	24
11.	A szűrő és előosztó fokozat.....	25
12.	Az előerősítő és szintillesztő fokozat	28
13.	Az amplitudó szabályzás	30
14.	A nagyjelű feszültség erősítő fokozat.....	31
15.	A kimeneti offset eltolást biztosító fokozat	33
16.	A kimeneti áramerősítő buffer fokozat.....	36
17.	A kimeneti impedancia választó fokozat.....	39
18.	A mikrovezérlő kiválasztása.....	40
19.	A tápegységek	42
20.	A kijelző és a kezelőszervek.....	45

21.	A függvénygenerátor bemérése	46
22.	Összefoglalás	51
23.	Summary.....	52
24.	Irodalomjegyzék	53

1. BEVEZETÉS

A hullámformák és vizsgálójelk előállítása, illetve az ezekkel történő mérés az elektronikai alkalmazások, és fejlesztések esetében ma már nélkülözhetetlen eljárás. A méréseinket a legtöbb esetben valamilyen vizsgálójellel végezzük, amelyet mi állítunk elő generátorok segítségével. Az analóg áramkörök frekvenciatartománybeli viselkedését legtöbbször szinuszos vizsgálójellel, tranziens átvitelét pedig négyszög jellel vizsgáljuk, továbbá a digitális áramköröket meghajtó jel is négyszögjel. A háromszögjelek szűrők karakterisztikájának meghatározásában hasznos jel emellett gyakran alkalmazzák mérőműszerek kalibrálására, illetve pontosságuk ellenőrzésére. Azokat a generátorokat, amelyek ezeket az alap hullámformákat képesek előállítani hullámforma generátoroknak nevezzük.

A hullámforma generátor nélkülözhetetlen építőeleme a ma már minden korszerű laboratóriumban megtalálható függvénygenerátornak. Függvénygenerátorra azonban nem csak egy jól felszerelt laborban lehet szükség, hanem otthoni fejlesztések mérések esetén is. Az egyszerűbb áramkörök nem feltétlenül igényelnek a bemérésükhöz, illetve vizsgálatukhoz függvénygenerátor által előállított vizsgáló jeleket, de előbb utóbb minden elektronikával foglalkozó személy eljut egy olyan szintre, ahol nem kerülhető meg ezen berendezés alkalmazása. Ebbe a szituációba kerültem én is, és elhatároztam, hogy beszerzek egy függvénygenerátort az otthoni méréseimhez. Sajnos a kereskedelemben kapható függvénygenerátorok számomra drágának bizonyultak és gyakran olyan funkciókkal találkoztam, amelyeket az otthoni méréseimhez fölöslegesnek tartottam. Találtam olyan eszközöket is, ahol pedig komoly hiányosságokat véltem felfedezni. Ezért úgy döntöttem, hogy tervezek és építek egy a saját igényeimnek megfelelő függvénygenerátort. A téma bemutatásra került az Óbudai egyetem 58. Tudományos Diákköri Konferenciáján is.

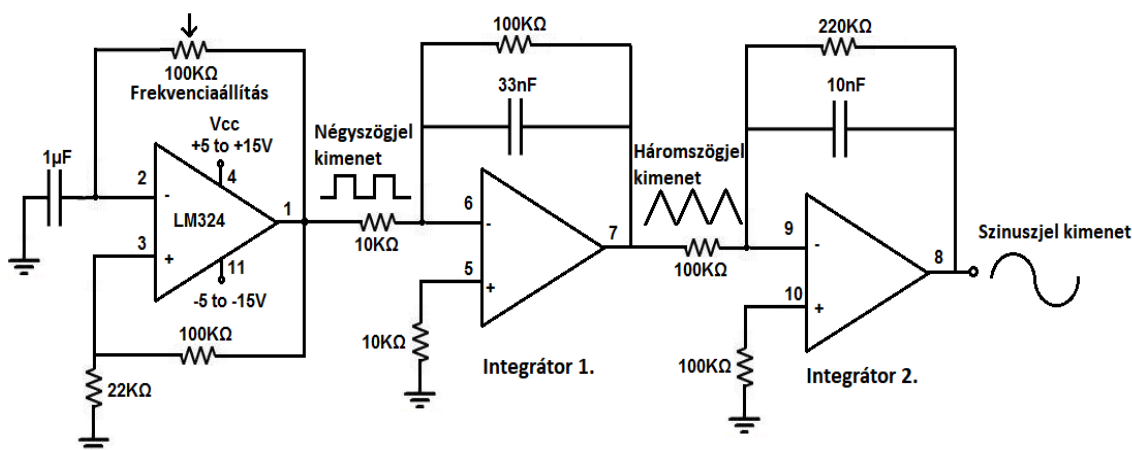
A szakdolgozatomban először specifikálom a követelményeket a megvalósítani kívánt függvénygenerátorral szemben, majd néhány gyakorlatban is alkalmazott hullámforma előállítási módszert mutatok be. Tárgyalásra kerül az AD9833-as DDS alapú precíziós hullámforma generátor felépítésének és működésének vizsgálata is. Végezetül bemutatásra kerül az általam tervezett áramkör felépítése, és az egyes áramköri részek működése is. A kapcsolások fizikai megvalósításának tervét és lépéseit is bemutatom, képekkel is illusztrálom.

2. SPECIFIKÁCIÓ

A szakdolgozatomban célom egy olyan működőképes DDS függvénygenerátor megtervezése és megvalósítása, amely legalább 1MHz-es szinusz, illetve 100kHz-es háromszög és négyszög jelalakokkal képes 50Ω -os és alacsony értékű terhelést meghajtani 10V csúcsértékű kimeneti jellel mindezt viszonylag kompakt méretben. A generátor vezérlése teljesen digitális lesz, egyedül az erősítő és a szinteltoló fokozatok, illetve a tápegységek maradnak analóg áramkörök. A tervezés során a kapcsolási rajzok elkészítéséhez az Autodesk Eagle nyomtatott áramkör tervező programot fogom használni. Az egyes részáramköröket bizonyos esetekben szimulációs szoftverrel is ellenőrzöm, amelyre az LTSpice nevű programot fogom alkalmazni. Az elképzelésem az, hogy a kimeneti jel alakja mellett a jel frekvenciájának, kimeneti amplitúdójának, illetve egyenáramú eltolásának változtatására is lehetőség legyen. Ezeket digitális potenciométerek segítségével szeretném megoldani. A kimeneti jelalakok, illetve a kimeneti impedancia módok között egy nyomógommbal lehet majd választani. A célom, hogy minél kevesebb kezelőszerv legyen a készülékház előlapján így mind a digitális potméterek vezérlése, mind az AD9833-as DDS IC vezérlését egy darab enkóderrel fogom megvalósítani. Minden egyes beállított értéket egy 20x4-es karakteres LCD kijelzőn fogok megjeleníteni. A teljes generátor vezérlését egy AVR mikrovezérlő látja majd el, amely egy Atmega328-as típusú. A mikrovezérlő fő funkciója a digitális potméterek és a DDS IC vezérlése, illetve a beállított értékek kiírása az LCD kijelzőre. A készülék tápellátását biztosító tápegység szintén saját tervezésű lesz. A generátorban lévő áramköröknek többféle különböző feszültségre van szükségük melyek stabilizált formában fognak rendelkezésre állni. Ezek a feszültség értékek +12V; -12V; 5V; és 15V. Végző soron az elkészült függvénygenerátoron ellenőrző oszcilloszkópos méréseket fogok végezni, amelyek során ellenőrzöm az egyes erősítő fokozatok helyes gerjedés mentes működését, a jelalakok torzítás mentességét, a generátor sávszélességét az egyes jelalakoknál, illetve a kimeneti feszültség értékek helyességét. Az így kapott eredmények alapján osztályozom az elkészült függvénygenerátort, összegzem az észrevételeket és az esetleges hibákat, majd megvizsgálom az eszközben rejlő tovább fejleszthetőségi lehetőségeket.

3. HULLÁMFORMÁK ELŐÁLLÍTÁSI LEHETŐSÉGEI.

Azokat az eszközöket, áramköröket, amelyek egymástól eltérő, de azonos frekvenciájú jelalakokat képesek előállítani hullámforma generátoroknak nevezzük. Jelen esetben a három leggyakoribb alap jel van megkülönböztetve. Ezek a szinusz, a háromszög, illetve a négyszögjel. Ezen jelek előállítására többféle módszer is kínálkozik. Régebben ezek a generátorok kizárólag analóg áramköri elemeket tartalmaztak. A jelek előállítása RC oszcillátorok, illetve műveleti erősítők integrátorok segítségével történt. Egy ilyen típusú generátort szemléltet az 1. ábra.



1. ábra: Egyszerű hullámforma generátor kapcsolás műveleti erősítővel [1]

Az ábrán látható függvénygenerátor alapjele egy négyszögjel, amelynek frekvenciája a 100kΩ-os potméterrel állítható. A második fokozat egy integrátort valósít meg, melynek bemenetére az alap négyszögjel kerül, az integrálás eredménye háromszögjel lesz. A végső szinuszel pedig az előzőleg előállított háromszögjel integrálása után áll elő. [2]

A kapcsolás hátrányai:

- Diszkrét, nagy szórású alkatrészek.
- Lassú felfutási lefutási idők.
- Öregedésre hajlamos alkatrészek használata elhangolódást okozhat.
- Pontatlan frekvenciaállítás.
- Nehézkes a digitális vezérlést megvalósítani.
- A jelek egymásra hatással vannak, nem függetlenek egymástól
- Meglehetősen sok alkatrész használata.
- Nem lehetséges két teljesen egyforma generátor megvalósítása.

A kapcsolat előnyei:

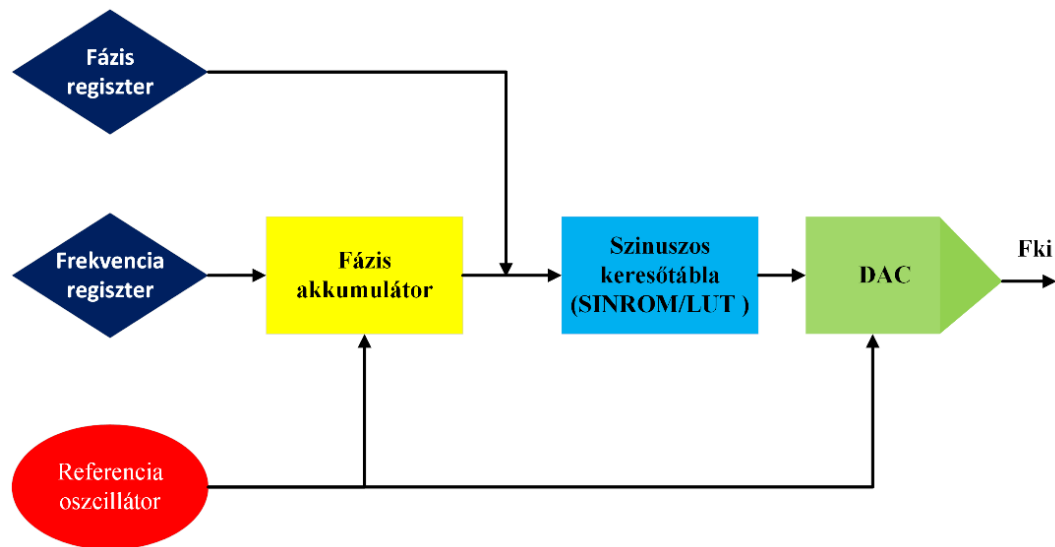
- Egyszerű, olcsó, gyorsan megépíthető az áramkör.
- Könnyen beszerezhető alkatrészeket tartalmaz.
- Az egyszerűség miatt kicsi a meghibásodás lehetősége.
- Nem bonyolult az áramkör működésének megértése, kezdőknek kimondottan ajánlott megoldás.

3.1 INTEGRÁLT ANALÓG ÁRAMKÖRI MEGOLDÁSOK

Amennyiben a generátort nem diszkrét módon szeretnénk megvalósítani, használhatunk kimondottan erre a célra készült céláramköröket, amelyekből létezik analóg és létezik digitális elvet használó megoldás is. Ha nem szeretnénk digitális vezérlést megvalósítani akkor az analóg megoldások között is találunk jól használható kompakt IC-eket, ilyen például az ICL8038-as, illetve XR2206-os függvénygenerátor IC. Ezekkel az áramkörökkel már egészen jó eredményeket el lehet érni azonban a legnagyobb probléma, továbbra is fent marad, a digitális vezérelhetőség hiánya, illetve nehézkes megoldása hiszen egyik típus sem rendelkezik semmilyen digitális interfésszel. Abban az esetben, ha egy komplexebb feladatra szeretnénk használni ezeket az analóg IC-eket sok kiegészítő áramkörre lehet még szükség a megfelelő működés eléréséhez. Ha a pontosságukat vesszük figyelembe akkor nem tapasztalunk rossz paramétereket viszont a felső határfrekvencia minden esetben eléggé korlátozottnak mondható hiszen az ICL8038-as 300kHz-ig-szolgáltat torzításmentes jelet, az XR2206-os pedig 1MHz-ig. A beszerezhetőségük is nehézkes a korukból eredően, vagy ha beszerezhető akkor is általában valamilyen egységcsomag részeként ezért az analóg módszerrel működő IC-k nem voltak számomra megfelelőek így más lehetőség után kellett nézzek, ezek a digitális DDS (közvetlen digitális szintézis) elvet alkalmazó IC-k lettek. [3] [4]

4. A DDS SZINTÉZIS FOLYAMATA

A közvetlen digitális szintézis (DDS) során egy analóg hullámforma, általában szinuszhullám előállítása zajlik le, mégpedig egy időben változó jel digitális formában történő generálásával, majd ezekből a digitális mintákból egy DAC segítségével jön létre az időben folytonos jel. A DDS-eszközön belül végzett műveletek elsősorban digitálisak, így a kimeneti jelalakok között gyors váltást tesz lehetővé emelet rendkívül precíz kis léptékű az eszköz frekvenciafelbontása, valamint széles frekvenciaspektrumon képes működni. A DDS-eszközök fő részegységei a fázis-akkumulátor, a szinuszos keresőtábla (SINROM vagy LUT) és a DAC. [5] Ezeket a részegységeket szemlélteti a 2. ábra.



2. ábra: A DDS jelszintézis folyamatábrája és főbb részegységei [Saját kép]

A DDS egy adott frekvencián szinuszhullámot hoz létre. A létrehozott jel frekvenciája két változótól függ, a referencia oszcillátor frekvenciájától, illetve a frekvenciaregiszterbe töltött bináris számtól melyet hangolósónak is neveznek. A hangolószó a kimeneti frekvencia megváltoztatására szolgál az eszköz működése közben. A fázis akkumulátor a referencia oszcillátor ütemében megnöveli a tartalmát a frekvencia regiszterbe töltött bináris számértékkel, tehát ha például a betöltött érték 2 akkor mindegy egyes órajel ciklusban 2-vel növeli meg a tartalmát. A referencia oszcillátor frekvenciájának értéke tehát alapvetően meghatározza a fázisakkumulátor „frissítési” sebességét ezáltal a szinuszos keresőtáblán történő lépések, keresések végrehajtását is. A referenciaoszcillátor órajelét a legtöbb esetben egy pontos kvarc oszcillátor állítja elő. [6]

A fázis akkumulátor által előállított fázis érték alapján történik a szinuszos keresőtáblában az adott fázis értékhez tartozó amplitúdó érték lekérdezése. A frekvencia regiszterben lévő hangolószó értéke adja meg a szinuszos keresőtáblából lehívott értékek számát egy órajel ciklusra vonatkozóan. Például egy 1 értékű hangolószót alkalmazva a szinuszos keresőtáblában lévő összes érték lehívásra kerül. Ha hangolószó értéke 2 akkor minden második érték kerül lehívásra a keresőtáblából és ilyenkor a fázisakkumulátor kétszer gyorsabban nullázódik ki, aminek következtében a kimeneti frekvencia érték megduplázódik. Azaz ez azt jelenti, hogy minél kisebb a hangolószó értéke annál több lépést tesz meg a fázisakkumulátor azaz lassabban ér el a keresőtábla végéhez, aminek hatására alacsonyfrekvenciás hullámot generál. Ha a hangolószó értéke nagy akkor a fázisakkumulátor gyorsan átugorja a keresőtáblában lévő értékeket, azaz nagyfrekvenciás hullámot generál.

Színuszjel előállítása esetén célszerű 360 fokos (2π radián) azaz 360 darab értékből álló szinuszos keresőtáblát alkalmazni hiszen ennyi fokot tesz meg a jel egy periódus alatt. A keresőtáblában mind a 360 darab fokértékhez tartozik egy amplitúdó érték tehát a keresőtábla összesen 360 darab amplitúdó értéket tartalmaz. A fázisakkumulátor 360 darab órajel ciklus után visszaáll a kezdeti értékhez. Mivel az órajelet a rendszer referencia oszcillátora állítja elő mind a keresőtáblán történő lépés, illetve a fázis akkumulátor értékének növelése egyszerre hajtódik végre.

Ha a frekvenciaregiszterbe töltött hangolószó értéke 1 akkor minden egyes órajelnél 1-gyel növekszik a fázisakkumulátor értéke, és egymás után sorrendben lehívásra kerülnek a szinuszos keresőtábla értékei. Minden 360.-ik referencia órajel után az akkumulátor újraindul, és egy következő hullámforma jön létre és ez a folyamat fog ismétlődni ciklikusan. A hangolószó 2-re állítása azt fogja eredményezni, hogy minden második érték fog lehívásra kerülni a szinuszos keresőtáblából tehát a fázis akkumulátor kétszer olyan gyorsan fog lépkedni a kereső táblán, aminek hatására a kimeneti frekvencia értéke megduplázódik.

Természetesen ez csak példa hiszen, ha csak 360 db értéket használnánk akkor az szaggatott kimenetet eredményezne, és a jitter zaj használhatatlanná tenné a kimeneti jelet. A DDS-rendszerek jellemzően több ezer adatpontot tartalmazó szinuszos keresőtáblázatokkal és több bites frekvencia regiszterrel, illetve fázis akkumulátorral rendelkeznek. [7] [29]

5. DDS CÉLESZKÖZÖK

A saját tervezésű generátorom alapját egy DDS elvet alkalmazó Analog Devices által gyártott IC-alkotja. A gyártó kínálatában 31 ilyen elvet alkalmazó generátor IC található, ezek közül van felsorolva néhány a lényeges tulajdonságaikkal, majd a kiválasztott AD 9833-as típus kerül részletes bemutatásra.

AD9833:

- **Frekvenciatartomány:** Az AD9833 egy alacsony energiafogyasztású DDS IC, amely a 0,1 Hz-től 12,5 MHz-ig terjedő frekvenciatartományban dolgozik.
- **Felbontás:** A kimeneti hullámformák 10-bites felbontással állíthatók be.
- **Alkalmazások:** Kompakt mérete és alacsony energiaigénye miatt kiválóan alkalmas hordozható és alacsony energiaigényű eszközök számára. Ideális audio alkalmazásokhoz és alapvető frekvenciamérésekhez. [8]

AD9834:

- **Frekvenciatartomány:** Az AD9834 egy 25 MHz-es DDS IC, amely széles frekvenciatartományt kínál.
- **Kimeneti amplitúdószabályozás:** Beépített amplitúdó szabályozási lehetőséggel rendelkezik.
- **Alkalmazások:** Nagyon hasznos audio alkalmazásokban, frekvenciamérésben és olyan helyeken, ahol szükség van stabil szinuszos hullámformákra. [9]

AD9850:

- **Frekvenciatartomány:** Az AD9850 egy széles frekvenciatartományt kínál, amely 0 Hz-től akár 125 MHz-ig terjedhet. Ez lehetővé teszi a nagyfrekvenciás és széles sávú alkalmazások számára a precíz hullámformák előállítását.
- **Felbontás:** Az IC felbontása 32 bites, ami nagy pontosságot és precíz szabályozhatóságot biztosít a generált jel frekvenciájában.
- **Kimeneti amplitúdószabályozás:** Az AD9850 tartalmaz egy 8-bites digitális-analóg átalakítót (DAC), amely lehetővé teszi az amplitúdó szabályozását a kimeneten
- **Alkalmazások:** Az AD9850 kiválóan alkalmas széles körű alkalmazásokhoz, például funkciógépek, frekvenciaváltók, generátorok, tesztberendezések és RF alkalmazások tervezéséhez. [10]

AD9954:

- **Kimeneti csatornák:** Az AD9954 egy komplexebb DDS IC, amely négy különböző kimeneti csatornát kínál egy chipeken belül.
- **Frekvenciamoduláció:** Képes amplitúdó és frekvenciamodulációra, ami kiválóan alkalmas olyan alkalmazásokhoz, ahol a hullámformát változtatni kell.
- **Alkalmazások:** Komplex hullámformák generálására használható, például amplitúdó-modulált vagy frekvenciával modulált jelek előállításához. [11]

AD9959:

- **Frekvenciatartomány:** Az AD9959 egy high-end DDS IC, amely akár 200 MHz-es DDS frekvenciát biztosít.
- **Komplex alkalmazások:** Kiválóan alkalmas nagy teljesítményű RF alkalmazásokhoz és széles körű jelgenerálási feladatokhoz.
- **Kimeneti részletezés:** Nagyon precíz kis léptékezésű frekvencia és fázis szabályozást tesz lehetővé. [12]

AD9910:

- **Frekvenciatartomány:** Az AD9910 a DDS IC-k krémjének tekinthető, 1 GHz-es frekvenciatartományával és széles kimeneti tartományával.
- **Magas frekvencia:** Kiválóan alkalmas nagy frekvenciájú és széles sávú alkalmazásokhoz.
- **Nagy felbontás:** Nagyon pontos és kis léptékű frekvenciavezérlésre képes [13] [14].

6. NÉHÁNY ELÉRHETŐ KERESKEDELMI ALTERNATÍVA

Mindenképpen szükséges és célszerű a készülő függvénygenerátort összehasonlítani néhány kereskedelmi forgalomban kapható készülékkel. Az ilyen típusú összehasonlítás segít nagyjából elhelyezni az eszközt a készülék piacon és egy ár érték arányt képezni. Az összehasonlításban szereplő eszközök megközelítőleg egy árkategóriába esnek és emellett kimondottan olyan tudásúak melyek, az egyszerűbb felhasználási területen történő méréseket célozzák meg. Az „egy árkategória” alól kivételt képez a **JT-JDS6600** típusú függvénygenerátor, amely jóval drágább, mint a többi típus. Ez a készülék azért került be az összehasonlításba, hogy szemléltetve legyen az, hogy mennyi az az ár, amitől már olyan eszköz birtokában vagyunk, amely teljesen digitális vezérléssel rendelkezik és minden fontos beállított értéket megjelenít a kijelzőjén. Az összehasonlításban szereplő eszközök képeit az 5-ös a 6.-os és a 7-es ábrák illusztrálják. A függvénygenerátorok összehasonlítása táblázatos formában történt meg, ezeket a táblázatokat a 3-as, illetve a 4-es ábra mutatja be.

Típus	FG-100	AE20125
Színuszjel sávszélessége	1Hz-500kHz	0,1Hz-10MHz
Háromszögjel sávszélessége	1Hz-20KHz	0,1Hz-2.5MHz
Négyszögjel sávszélessége	1Hz-20KHz	0,1Hz-2.5MHz
Megjelenített értékek,beállítások	Frekvencia,Jelalak	Frekvencia,Jelalak
Csatornák száma	1	1
Jelszintézis típusa	DDS	DDS
Vezérlés módja	Analóg és Digitális	Analóg és Digitális
Ár	10 629 Ft	23 516 Ft

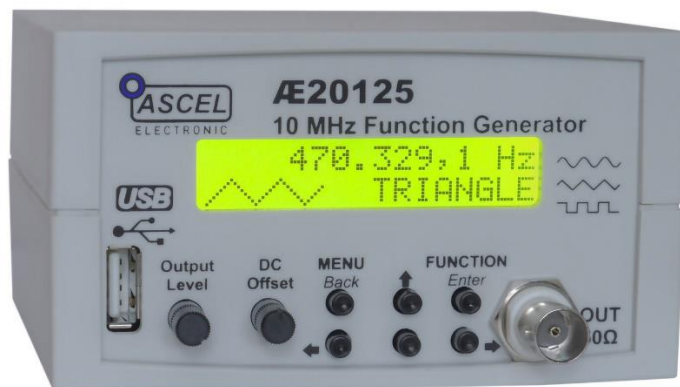
3. ábra: A függvénygenerátorok összehasonlító táblázata 1 [Saját kép]

Típus	JT-JDS6600	Saját generátor
Színuszjel sávszélessége	0Hz-60MHz	1Hz-1MHZ
Háromszögjel sávszélessége	0Hz-15MHz	1Hz-100KHz
Négyszögjel sávszélessége	0Hz-15MHz	1Hz-100KHz
Megjelenített értékek,beállítások	Amplitudó, Frekvencia, DC, Jelalak	Amplitudó, Frekvencia, DC, Jelalak
Csatornák száma	2	1
Jelszintézis típusa	DDS	DDS
Vezérlés módja	Digitális	Digitális
Ár	64 999 Ft	35 000 Ft

4. ábra: A függvénygenerátorok összehasonlító táblázata 2 [Saját kép]



5. ábra: Az FG-100 DDS függvénygenerátora [15]



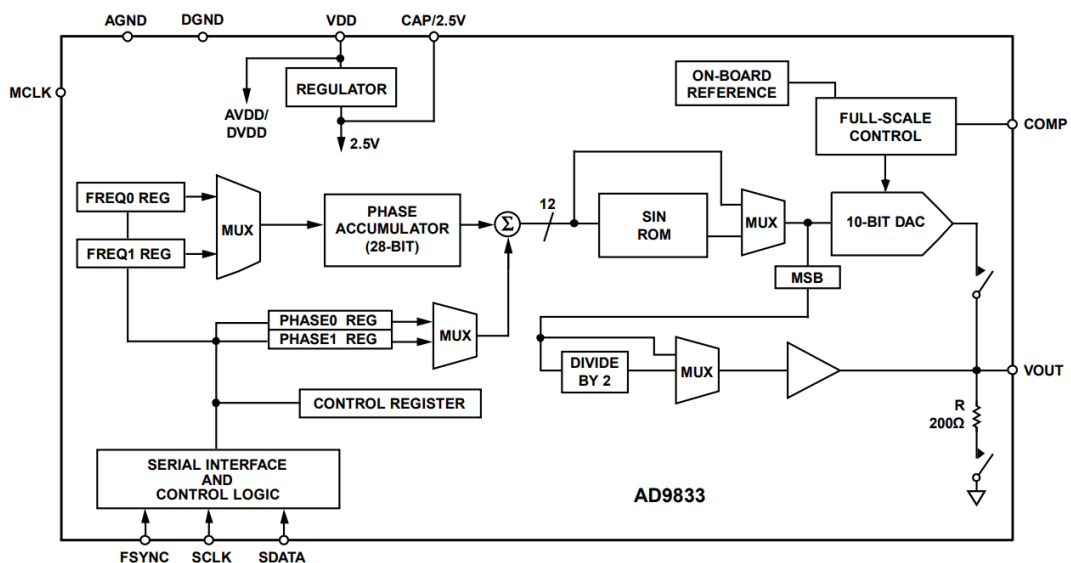
6. ábra: Az ASCEL AE20125-ös DDS függvénygenerátora [16]



7. ábra: A JOY-iT JDS6600 DDS függvénygenerátora [17]

7. AZ AD9833-AS DDS GENERÁTOR BEMUTATÁSA

Az Analog Devices széles kínálatából a gyártó egyik belépő szintű modelljét az AD9833-as IC-t választottam. Az IC frekvencia átvitele bőven túlteljesíti az otthoni méréseknél használatos maximális frekvenciák értékét. Ennek a típusnak a maximális órajel frekvenciája 25MHz így ebből eredően az elméleti maximálisan kivehető frekvenciaérték a Nyquist kritérium értelmében az órajel frekvencia fele, azaz 12.5MHz. Természetesen használható kisebb értékű kvarcoszcillátor is, de ebben az esetben csökken a kivehető maximális frekvencia érték cserébe kisebb lépésközzel tudunk lépkedni a beállított frekvenciák között tehát javul a felbontásunk. A DDS család ezen típusát főként az 1MHz-ig működő függvénygenerátorokban használják, én is ebben a tartományban fogom használni az áramkört. Az áramkör működéséhez a kvarcoszcillátoron kívül minimális mennyiségű külső alkatrész szükséges, amely három darab kondenzátorban ki is merül. A kimeneti DAC az összes AD98xx típusnál áram kimenetű, de egyes típusok, mint pl. az AD9833, tartalmazzák az áram-feszültség átalakításra szolgáló kis értékű (itt 200 ohmos) ellenállást. Ezen az ellenálláson 300mV csúcserősségű feszültség jelenik meg. Ennek a típusnak talán az egyik nagy hátránya, hogy habár a szinuszjel és a háromszögjel azonos amplitúdó értékkel jelenik meg az áramkör kimenetén, a négyszögjel tápfeszültség amplitúdójú, amely gondot jelenthet a szinuszjel amplitúdójához méretezett erősítő fokozatok esetén, ha nem végzünk valamilyen feszültségosztást nagy mértékű túlvezérlés fordulhat elő. A 6.ábrán az AD9833-as áramkör belső blokkvázlata látható, amely megtalálható az IC gyári adatlapjában. [8]



8. ábra: Az AD9833 belső felépítésének blokkvázlata [8]

A blokkvázlatban szerepelnek az áramkört alkotó legfontosabb részegységek, amelyek közül a regiszterek, illetve a soros interfész szerepét és működését az alábbiakban részletezem.

7.1 SERIAL INTERFACE AND CONTROL LOGIC (SOROS INTERFÉSZ)

Ez az interfész jelen esetben egy háromvezetékes SPI interfész ezen keresztül történik az IC teljes vezérlése és programozása. Az adatok 8 bites keretben töltődnek be a regiszterekbe az IC SDATA (Soros Adat) lábán keresztül. Az IC FSYNC lába jelen esetben az SPI kommunikációban jól megszokott CS (Chip Select) lábat hivatott betölteni, azaz ez nem más, mint az IC-kiválasztását, az adatok betöltését engedélyező láb. Jelen esetben az FSYNC láb úgynevezett Active Low (Aktív alacsony) beállításban működik, tehát az IC- akkor van kiválasztva és akkor tudunk adatokat tölteni bele, ha erre a lábra logikai nulla érték van kötve. A SCLK lábra a soros adatátvitelhez szükséges órajel van kötve.

7.2 CONTROL REGISTER (VEZÉRLŐ REGISZTER)

Ez egy 16 bites regiszter, ezen regiszter biteivel tudjuk az AD9833-at bekonfigurálni, az egyes bitek jelentésére lentebb térek ki, illetve bemutatom táblázatos formában a három alapjel előállításához szükséges regiszter bitek beállításait.

7.3 FREQ0 ÉS FREQ1 FREKVENCIA REGISZTEREK

Az integrált áramkörben két darab frekvencia regiszter található (FREQ0, FREQ1). Mindkét regiszter 28 bites, bármelyik regiszter használható a programozás során az, hogy melyiket használjuk a vezérlő regiszter FSELECT bitje határozza meg. Ha az FSELECT bit értéke 0 akkor a FREQ0-ás, ha pedig az FSELECT bit értéke 1 akkor a FREQ1-es regisztert használjuk a frekvenciaérték beállítására. Ebbe a regiszterbe töltődik be a kimeneten mérni kívánt jel frekvencia értéke. Mivel a frekvencia regiszterek 28 bitesek így 2^{28} féle érték kerülhet bele. Jelen esetben a FREQ0-ás frekvenciaregiszter van használva. A $2^{28} = 268435456$ -nak felel meg ezt az értéket el kell mentünk konstansként majd a mikrovezérlőn futó program kódba, mert a kívánt frekvencia beállításakor számítást fogunk vele végezni. Van még egy fontos konstans értékünk ez pedig MCLK vagyis a Master vagy „fő” órajele az IC-nek, amely jelen esetben 25MHz, ezt az értéket szintén rögzítenünk kell majd a kódban. Ha az előbb említett konstans értékeket sikeresen rögzítjük akkor az IC kimenetén megjelenő jel frekvencia értéke az alábbi képlet alapján határozható meg

$$F_{ki} = (F_{MCLK}/2^{28}) \times \text{FREQREG}$$

A képletben szereplő tagok jelentése:

F_{ki} = Az IC kimenetén megjelenő jel frekvenciájának értéke

F_{MCLK} = Az IC fő órajele, amely jelen esetben 25MHz ez az egyik konstansunk.

2^{28} =A frekvencia regiszterben tárolható különböző értékek mennyisége, a másik konstans (**268435456**)

FREQREG= A kiválasztott frekvenciaregiszterbe írt érték.

A fenti képletből egyszerű algebrai átrendezéssel megkapjuk azt, hogy mit kell betöltenünk a frekvenciaregiszterbe ahhoz, hogy egy kívánt kimeneti frekvencia értéket be tudjunk állítani. Számunkra most ez a fontosabb összefüggés hiszen azt tudjuk, hogy milyen frekvenciájú jelet szeretnénk látni a kimeneten.

$$\text{FREQREG} = \frac{F_{ki} \times 2^{28}}{F_{MCLK}}$$

7.4 PHASE0 ÉS PHASE1 FÁZIS REGISZTEREK

A fázis regiszterek esetében is ugyanúgy kell eljárni, mint a frekvenciaregiszterek esetén annyi, hogy ezek a regisztereink 12 bites számábrázolási tartományt tesznek lehetővé, azaz **4096** féle értéket lehet letárolni bennük. Ezek a regiszterek abban az esetben használatosak, ha a kimeneti jelünket nullától eltérő fázishelyzetben szeretnénk indítani. Jelen szakdolgozat a fázis regiszterek beállításával nem foglalkozik, mert a jelek a nulla fázis helyzetből fognak indulni és utólag sem lesz a jel fázis értéke módosítva.

A továbbiakban a vezérlő regiszter (Control register) bitjeinek beállítási lehetőségei láthatóak. Az alábbi táblázatokban a 3 alapvető jelhez tartozó regiszter beállítások láthatóak.

A regiszter bit száma	DB15	DB14	DB13	DB12	DB11	DB10	DB9	DB8
Funkció	Fix	Fix	B28	HLB	FSELECT	PSELECT	Reserved	Reset
Színuszjel	0	0	1	0	0	0	0	0
Háromszögjel	0	0	1	0	0	0	0	0
Négyszögjel	0	0	1	0	0	0	0	0
Négyszögjel/2	0	0	1	0	0	0	0	0

9. ábra: A vezérlő regiszterek táblázatos összefoglalása 1 [Saját kép]

DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0
SLEEP1	SLEEP12	OPBITEN	Reserved	DIV/2	Reserved	MODE	Reserved
0	0	0	0	X	0	0	0
0	0	0	0	X	0	1	0
0	0	1	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0

10. ábra: A vezérlő regiszterek táblázatos összefoglalása 2 [Saját kép]

7.5 A CONTROL REGISTER (VEZÉRLŐ REGISZTER) BITJEINEK JELENTÉSE ÉS HASZNÁLATA

- **DB15 és DB14:** Értékük szinte mindig 0, mert ezzel jelezzük, hogy a regiszter tartalma bármikor megváltozhat.

- **DB13(B28):**

Ahhoz, hogy egy frekvencia regiszterbe írni tudjunk minden esetben 2 írási művelet szükséges. Ha ez a bit 1 be van állítva akkor egy teljes érték beírására van lehetőségünk 2 ciklusban. Mivel a frekvenciaregiszterek 28 bitesek ezért ezeket 2x14bit-ben kell feltölteni. Az első írás a 14 LSB -t tartalmazza, a második pedig a 14 MSB-t. Fontos, hogy a regiszterbe csak akkor történik tényleges beírás, ha mind a 28 bit átment, így a regiszter soha nem tartalmaz köztes értéket ebben a beállításban. Minden 16 bites üzenet első 2 bitje tartalmazza a kiválasztott Frekvenciaregiszter számát, így ennek a 2 bitnek mindkét üzenetben meg kell egyeznie. Ha ez a bit 0-ba van állítva akkor a 28 bites frekvenciaregiszterünk 2db 14 bites regiszterként fog működni. Ez azt jelenti, hogy a regiszter 14 MSB-je a 14LSB-től függetlenül megváltoztatható és fordítva. Azt, hogy éppen MSB-t vagy LSB-t írhatunk be azt a DB12(HLB) bit értéke határozza meg.

- **DB12(HSB):**

Használatának akkor van értelme, ha nincs szükség a teljes 28 bites felbontásra. Ez a vezérlőbit ad lehetőséget arra, hogy folyamatosan tudjuk egy regiszter 14LSB-ét vagy 14MSB-ét írni miközben figyelmen kívül hagyjuk a 28 bitből fennmaradó 14 bitet. Ennek a vezérlőbitnek csak akkor van hatása, ha a DB13(B28) bit értéke 0-ba van állítva, hiszen ez teszi lehetővé, hogy a 28 bites regisztert 2db 14 bitesregiszterként használjuk. Ha DB13(B28) bit értéke 1 akkor rendszer figyelme

kívül hagyja DB12(HLB) bit értékét bármit is írtunk bele. Ha HLB = 1 akkor az írást a címzett frekvencia regiszter 14MSB-re fogja elvégezni. Ha HLB= 0 akkor az írást a címzett frekvencia regiszter 14LSB-re fogja elvégezni.

- **DB11(FSELECT):**

Az FSELECT bit határozza meg, hogy a FREQ0 regisztert vagy a FREQ1 regisztert használja-e a fázisakkumulátor. Ha FSELECT=0 akkor FREQ0 regiszter, ha FSELECT=1 akkor FREQ1 regiszter van kiválasztva.

- **DB10(PSELECT):**

A PSELECT bit határozza meg, hogy a PHASE0 regiszter vagy a PHASE1 regiszter adata kerüljön hozzáadásra a fázis akkumulátor kimenetéhez. Ha PSELECT=0 akkor PHASE0 regiszter, ha PSELECT=1 akkor PHASE1 regiszter van kiválasztva.

- **DB9(Reserved):** Ez egy fenntartott bit értéke 0.

- **DB8(RESET):** Ha Reset = 1 a belső regisztereket 0-ra állítjuk vissza, ami a középskála analóg kimenetének felel meg. Ha Reset = 0 letiltjuk a regiszterek visszaállítását.

- **DB7(SLEEP1):** Ha SLEEP1 = 1, akkor a belső MCLK órajel le van tiltva, és a DAC kimenete a jelenlegi értéken marad. Ha SLEEP1 = 0, az MCLK órajel engedélyezve van.

- **DB6(SLEEP12):** Ez a bit az áramkörben lévő DAC kikapcsolására alkalmas jelen esetben, ha négyszögjelet generálunk akkor az nem a DAC-on keresztül kerül az IC kimenetére, hanem kikerüli a DAC-ot és a DAC MSB-je kerül ki a kimenetre, ami az IC pozitív tápfeszültségével megegyezik(5V/3.3V). Ha SLEEP12=1 akkor kikapcsoltuk a DAC-ot az IC -ben. Ha SLEEP12=0 akkor a DAC aktív. A SLEEP1 bittel kombinálva létrehozhatunk különböző úgynevezett Sleep (Alvás) funkciókat melyekkel csökkenthetjük az amúgy is minimális disszipációt.

SLEEP1	SLEEP12	Eredmény
0	0	Nincs kikapcsolva semmi
0	1	DAC kikapcsolva
1	0	Belső órajel letiltva
1	1	DAC és Órajel is letiltva

11. ábra: A SLEEP regiszterek összefoglaló táblázata [Saját kép]

- **DB5(OPBITEN):** Ezzel a bittel van lehetőségünk azt beállítani, hogy a DAC csatlakozzon -e az IC kimenetéhez vagy sem. Ha OPBITEN=1 akkor a DAC kimenete le van választva az IC-kimenetéről. Ebben az esetben az IC kimenetén a DAC MSB-je vagy MSB/2-je van jelen attól függően, hogy a DIV/2 bit milyen értéken van. Ha OPBITEN=0 akkor a DAC a kimenethez csatlakozik, és eldönthetjük, hogy szinusz vagy háromszög jelet akarunk-e előállítani ehhez majd a MODE bitet hívjuk segítségül.
- **DB4(Reserved):** Ez egy fenntartott bit értéke 0.
- **DB3(DIV/2):** Ha DIV2 = 1, akkor a DAC MSB-je kerül a kimenetre. Ha DIV2 = 0, a DAC adatok MSB/2-je kerül a kimenetre.
- **DB2(Reserved):** Ez egy fenntartott fix bit értéke 0.
- **DB1(MODE):** Ennek a bitnek az a feladata, hogy amikor a DAC aktív és a kimenethez csatlakozik akkor beállítsa, hogy milyen jel jelenjen meg a kimeneten. Ha a MODE = 1, a SIN ROM kihagyásra kerül a jelútból, ami egy háromszög kimenetet eredményez a DAC-ból. Ha mód = 0, a SIN ROM a fázisinformációt amplitúdó információvá alakítja, ami szinuszos jelet eredményez a kimeneten. Ez a bit az OPBITEN bittel együtt használható csak. Az alábbi táblázat ezt hivatott ábrázolni.

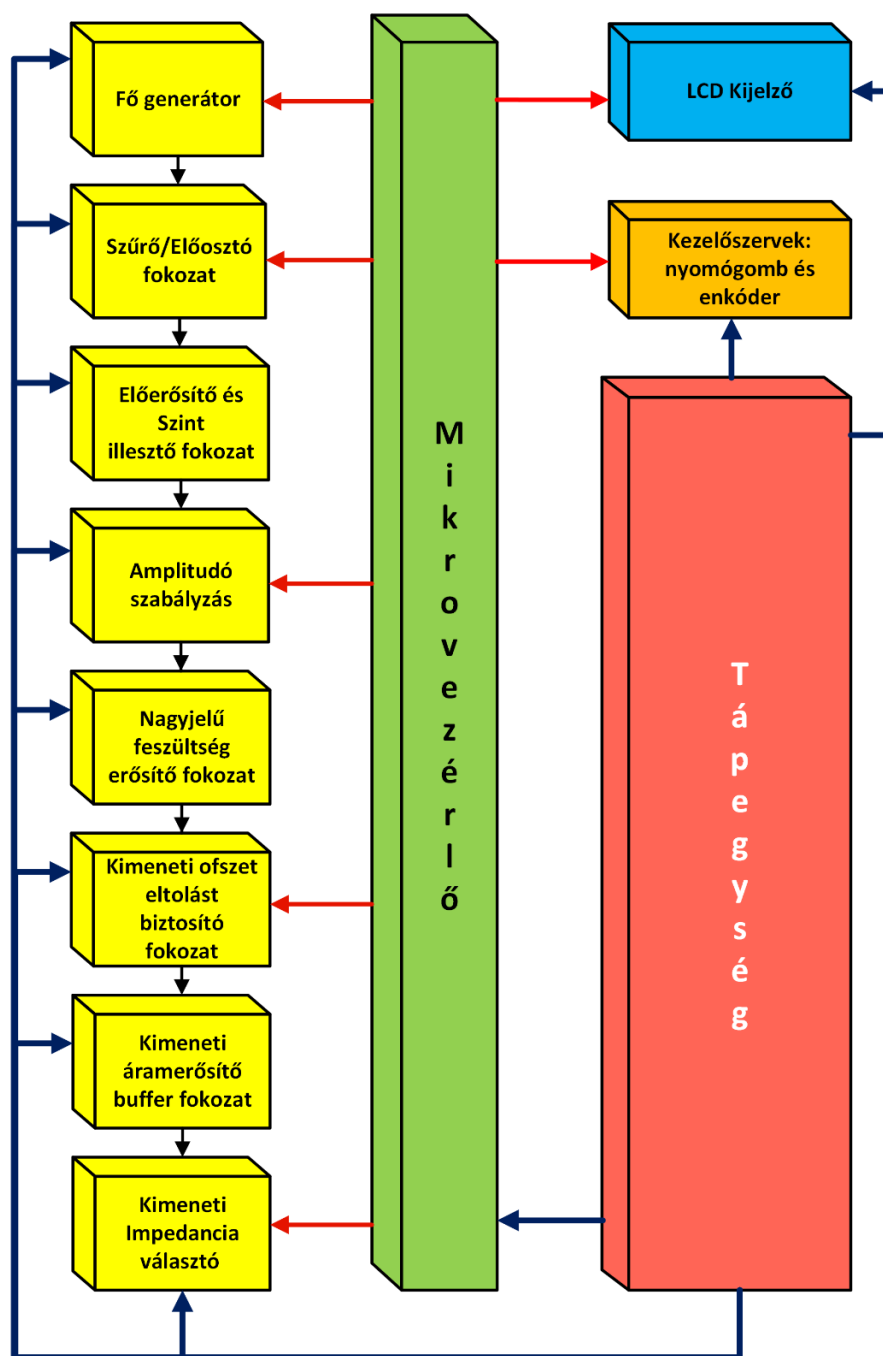
OPBITEN	MODE	DIV/2	Kimeneti jel alakja
0	0	X	Szinusz
0	1	X	Háromszög
1	0	0	f/2 Négyszög
1	0	1	Négyszög
1	1	X	Fenntartott

12. ábra: A különböző kimeneti jelalakok és a hozzájuk tartozó regiszter bitek beállítása
[Saját kép]

- **DB0(Reserved):** Ez egy fenntartott fix bit értéke 0 [8]

8. A FÜGGVÉNYGENERÁTOR LOGIKAI RENDSZERTERVE

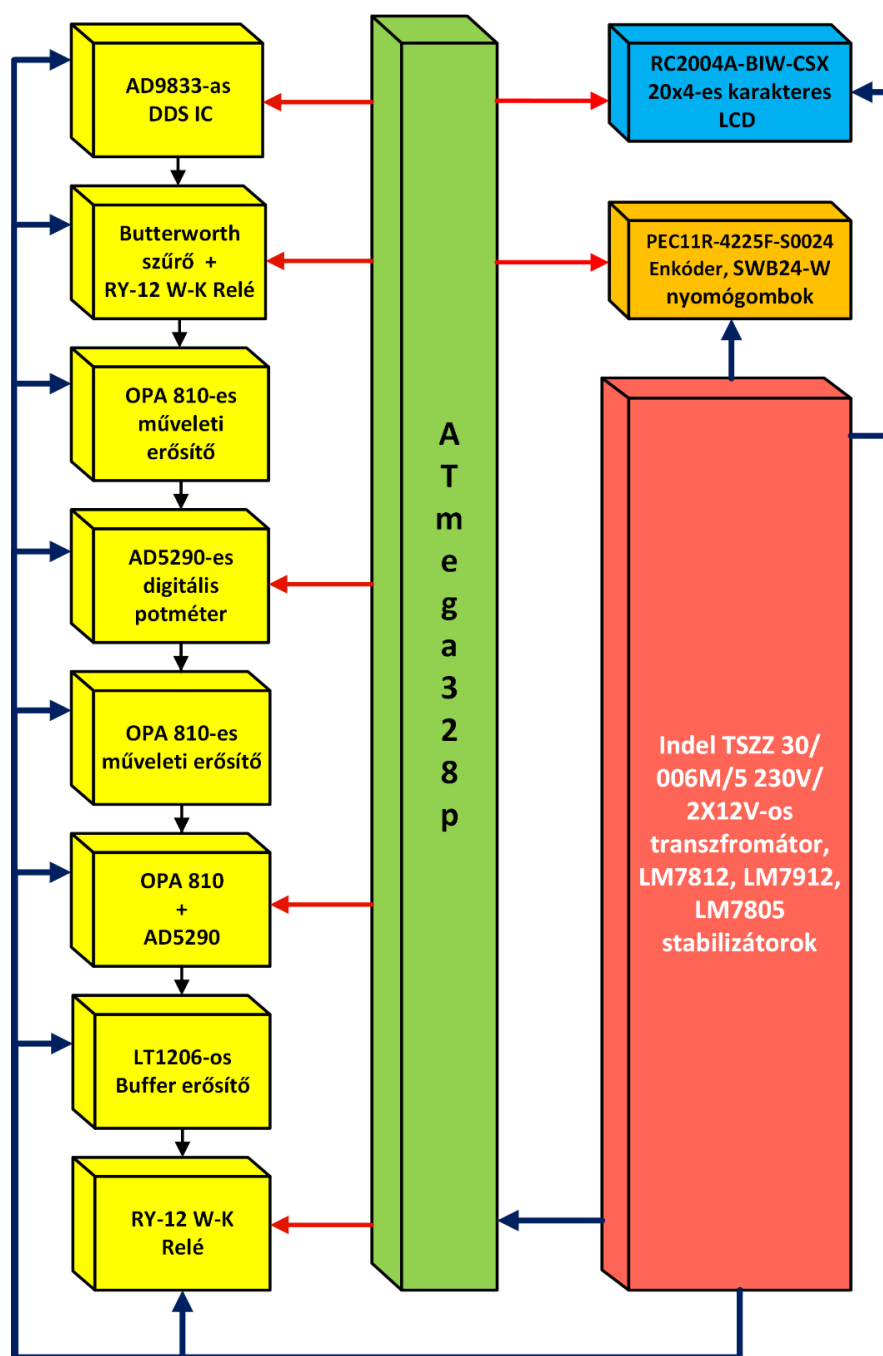
A függvénygenerátor logikai rendszerterve a 13. ábrán látható. A generátor összesen tizenkét részegységből áll. A kimeneti jelek előállításáért a citromsárga téglatestekkel jelölt fokozatokból alkotott lánc felelős. A fekete nyíllal történő összeköttetés az analóg jelutatót hivatott szimbolizálni. A piros nyílas vonalak digitális jelet, illetve jelfolyamot jelölnek, a sötétkék nyílas vonalak pedig a tápfeszültség ellátást felelős vezetékeket illusztrálják.



13. ábra: A függvénygenerátor logikai rendszerterve [Saját kép]

9. A FÜGGVÉNYGENERÁTOR FIZIKAI RENDSZERTERVE

A függvénygenerátor fizikai rendszerterve a 14.ábrán látható. A fizikai rendszerterven már szerepelnek az egyes fokozatokban felhasznált alkatrészek típusai. A részegységek, illetve a fokozatok pontos működésének és tervezésének ismertetése a 10-20.fejezetekben történik.

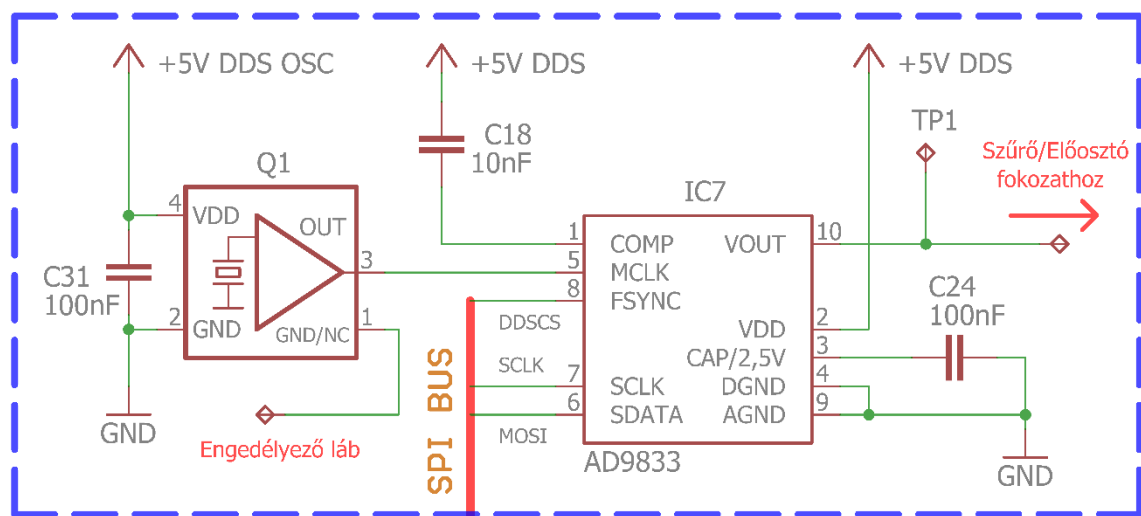


14. ábra: A függvénygenerátor fizikai rendszerterve [Saját kép]

10. A FŐ GENERÁTOR

A 15. ábrán a Fő generátornak nevezett részegység kapcsolási rajza látható, mely a függvénygenerátor alapját képezi. Ezt az áramkört az Analog Devices cég AD9833-as DDS generátor IC-je alkotja. Jelenleg az IC 5V-os üzemmódban működik, azonban lehetőség van a 3,3V-os táplálásra is. Az áramkör működéséhez viszonylag kevés külső alkatrészre van szükség. Az IC-nek szüksége van egy fő órajelre, amelyet egy 25MHz-es kvarcoszcillátor (jelölés: Q1) biztosít. Az oszcillátor szintén 5V-ról működik, melynek nagyfrekvenciás szűrését a C31 nevű 100nF-os kondenzátor végzi.

A kapcsolási rajzon található még két további kondenzátor a 10nF-os C18 leválasztja a kimeneti DAC előfeszítő feszültségét, míg a 100nF-os C24-es a kimeneti 2,5V-os egyenfeszültségű jelet szűri a zajoktól. Minden kondenzátor értéke az AD9833-as IC adatlapjában szereplő gyártói ajánlásnak megfelel. Az IC kimenetén megjelenő jelet a TP1-es tesztpontra lehet vizsgálni. Fontos megjegyezni, hogy a TP1-es ponton mérhető jelből nem állapítható meg a generátor fokozat sávszélessége mert az IC kimenete nincs felkészítve nagyobb kapacitást tartalmazó, illetve alacsony értékű terhelésekre így csak a helyes működés és a jel alakja vizsgálható. Már az oszcilloszkóp bemeneti kapacitása is számottevő terhelésnek minősül a nagyobb frekvenciák mérésénél. Az AD9833 és a mikrovezérlő közötti kommunikáció SPI interfészen keresztül történik. Mivel több alkatrész is használ SPI kommunikációt. Az átláthatóság érdekében a kapcsolási rajz szerkesztésekor egy SPI BUS lett létrehozva. [8]



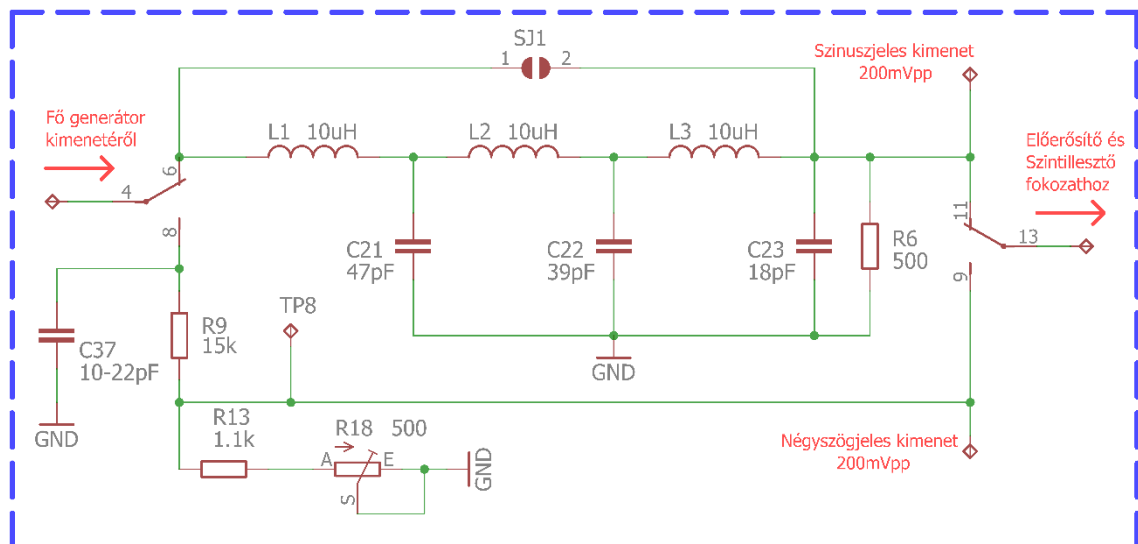
15. ábra: A Fő generátor kapcsolási rajza [Saját kép]

11. A SZŰRŐ ÉS ELŐOSZTÓ FOKOZAT

A kimeneti jel előállításáért felelős lánc következő fokozatának kettős szerepe van. A fokozat tartalmaz egy hatod rendű átlapolódásmentesítő Butterworth típusú szűrőt, egy állítható feszültségosztót, és végül egy relét, amelyet a mikrovezérlővel lehet ki-és be kapcsolni. A fokozat kapcsolási rajza a 16. ábrán látható. A IC-ben lévő DAC kimeneti jele, ami egyben a DDS IC kimeneti jele is nem egy folytonos hullámként értelmezhető, hanem egy szinuszos burkológörbe alatti digitális impulzussorozatként.

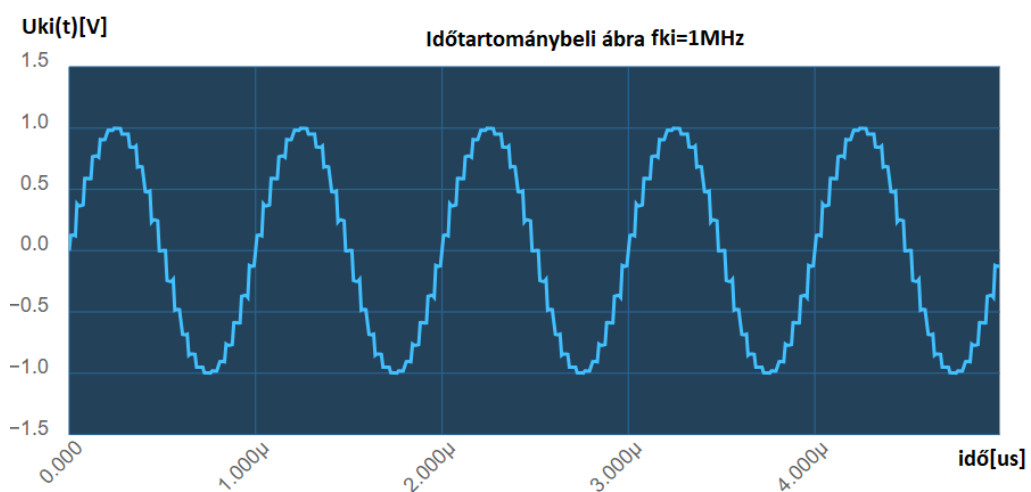
A digitális jelek feldolgozása során olyan nemkívánatos jelkomponensek is generálódnak a DAC kimenetén, mint a kvantálási zaj és az átviteli csúcsok, amelyek magasabb frekvenciájú felharmonikusokat tartalmaznak, mint az előállítani kívánt analóg jel alapharmonikusa. Ezen nemkívánatos frekvencia komponensek hatására a kimeneti jelben átlapolódások jelennek meg amik nagyban rontják kimeneti jel tisztaságát. [18]

A kimeneti jel tökéletes, zajmentes rekonstrukciójához egy átlapolódásmentesítő szűrő alkalmazására van szükség. A szűrő feladata, hogy a zavaró nagyfrekvenciás összetevők harmonikusait a lehető legnagyobb mértékben kiszűrje de a kimeneti jel alapharmonikusát változatlanul átengedje. Az előosztó és szűrőfokozat kapcsolási rajzát ábra szemlélteti. [19]

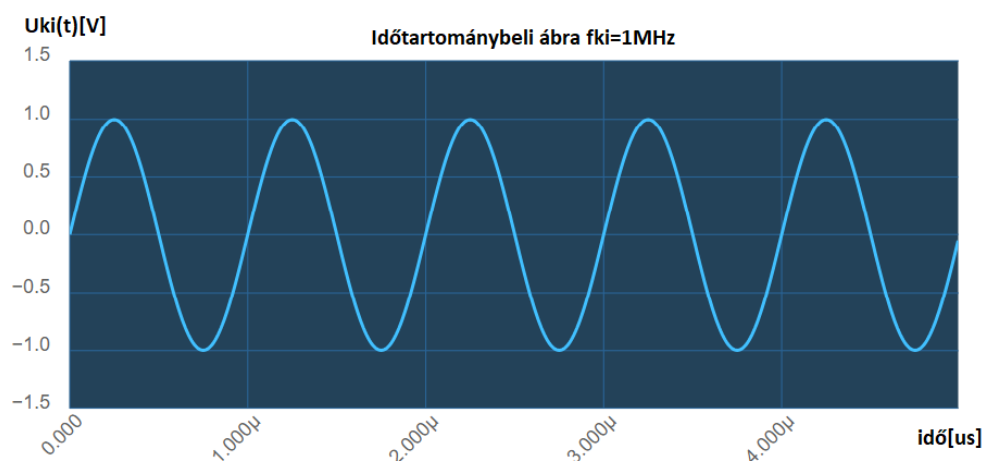


16. ábra: A Szűrő/Előosztó fokozat kapcsolási rajza [Saját kép]

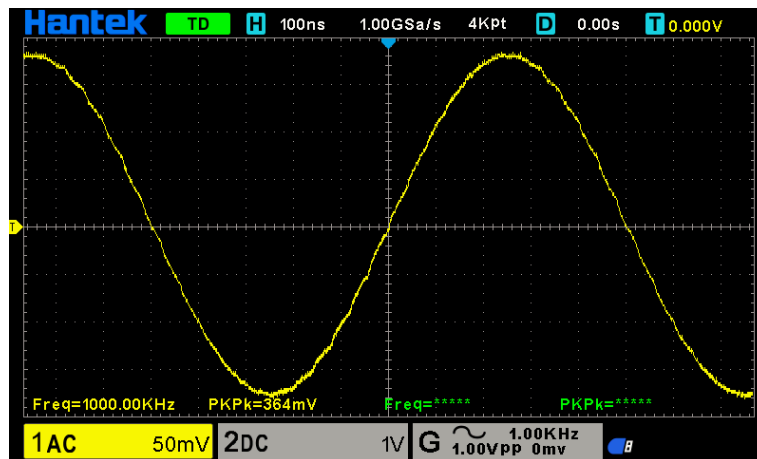
Ez a szűrő valójában nem más, mint egy a Nyquist frekvencia környéki törésponttal rendelkező nagy fokszámú azaz nagy vágási meredekséggel rendelkező szűrő. Ide a sima megszokott egyszerű aluláteresztő szűrők nem alkalmazhatóak speciális szűrőre van szükség, amely jelen esetben egy 6-od rendű Butterworth szűrő. Az alkalmazott szűrő 10MHz-es törésponti frekvenciával rendelkezik, illetve 120dB/dekád-os vágási meredekséggel. Ezek az értékek bőségesen elegendőek jelen alkalmazásban hiszen nem lesz 1MHz-től magasabb kimeneti frekvenciájú jel előállítva. A szűrőt szimulációs programban is ellenőriztem ez a gyártó saját szimulációja az erről készült eredmények a 17. és 18. ábrán láthatóak. [18] [19] [14]



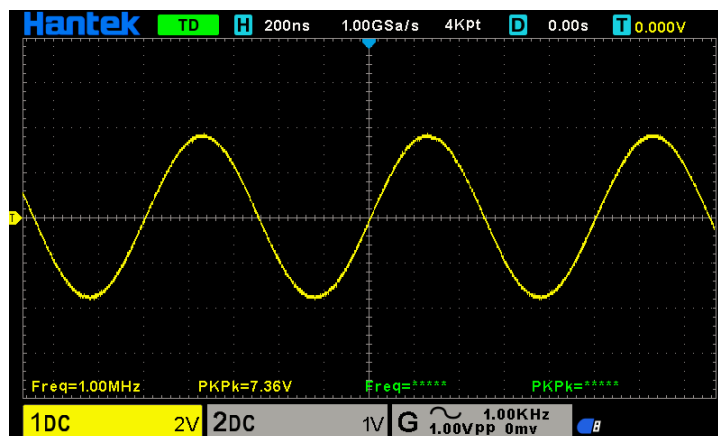
17. ábra: Szimulációban vizsgált 1MHz-es kimeneti jel, átlapolódásmentesítő szűrő nélkül [Saját kép]



18. ábra: 1MHz-es kimeneti jel, átlapolódásmentesítő szűrő használatával [Saját kép]



19. ábra: Valós 1MHz-es kimeneti jel, szűrő nélkül [Saját kép]

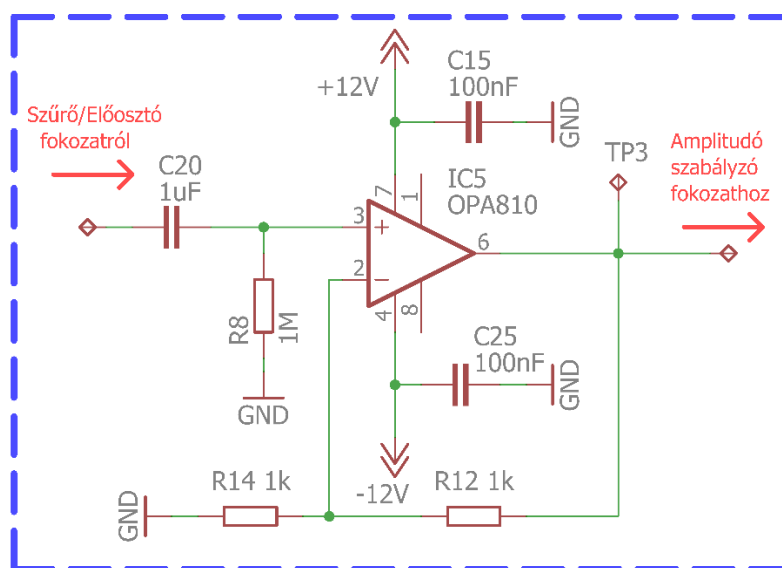


20. ábra: Valós 1MHz-es kimeneti jel, szűrő használatával [Saját kép]

A szűrő egy relé segítségével kiiktatható a jel útjából hiszen, ezen szűrőre csak szinuszjel és háromszögjel generálása esetén van szükség. A következő fontos áramkörü elem az előosztó áramkör, amely nem más, mint egy ellenállásokból felépített feszültségosztó melynek osztási pontján lévő feszültsége egy precíziós trimmer potenciométerrel a kívánt értékre állítható. A leosztott feszültség érték a TP8-as mérőponton ellenőrizhető. Erre a feszültség osztóra jelen esetben csak négyszögjelgenerálás esetén van szükség, mert az IC kimenetén ebben az esetben nem a 300mV csúcserősségű jel mérhető, hanem 2,5V-os értéket kapunk. Ahhoz, hogy minden egyes jelalak esetén ugyanakkora erősítést lehessen beállítani fontos, hogy minden egyes jelalak azonos amplitúdó értékű legyen. Szinuszjel és háromszögjel esetén nem merül fel amplitúdó béli különbség ezen jelek amplitúdóit figyelembe véve, az R18-as jelölésű trimmer potenciométerrel a TP8-as ponton 200mV-os amplitúdó értéket kell beállítani. [8]

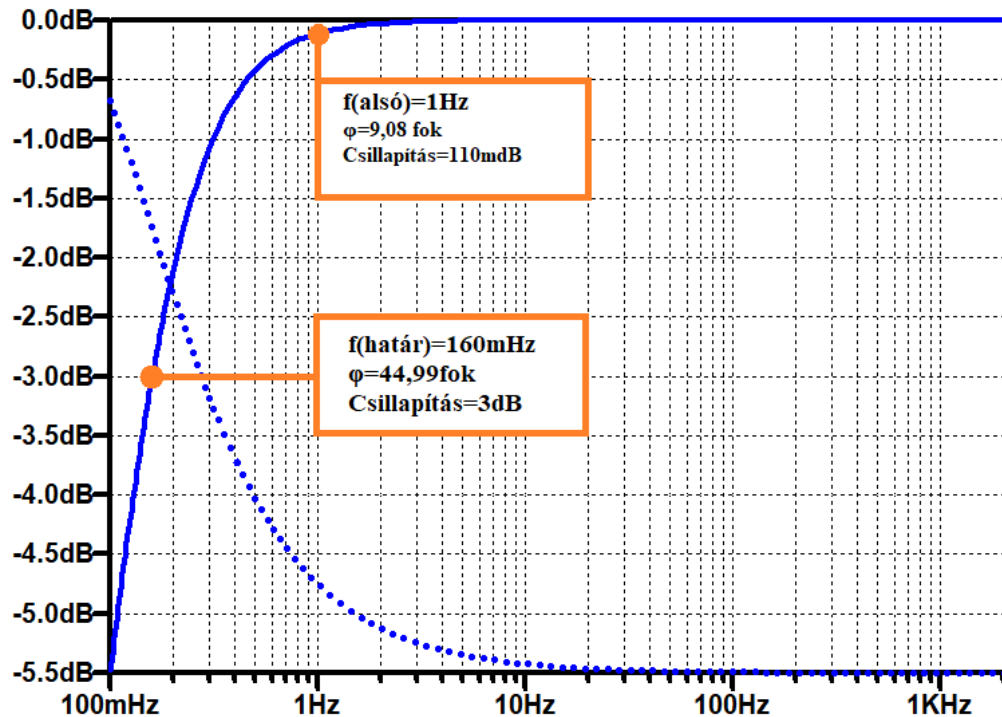
12. AZ ELŐERŐSÍTŐ ÉS SZINTILLESZTŐ FOKOZAT

A soron következő fokozat, egy nem invertáló kapcsolásban működő műveleti erősítővel megvalósított kétszeres erősítésű előerősítő fokozat. A fokozat kapcsolási rajza a 21.ábrán látható. A fokozat jelen esetben kettős feladatot lát el egyszer végez egy kétszeres erősítést, másodszor pedig terhelhetővé teszi a generátor IC-vel előállított kimeneti jelet, amely így már könnyen képes nagyobb parazitakapacitásokkal rendelkező terhelések meghajtására. Erre nagy szükség lesz a későbbiekben. A TP3-as mérőponton így már ellenőrizhető a DDS generátor IC sávszélessége. Az erősítő fokozat tervezésénél nélkülözhetetlen feladat volt a DDS IC kimenetén lévő 2,5V-os egyenfeszültségű alapjel leválasztása. Erre több lehetőség is van, de én a lehető legegyszerűbb eljárást választottam, amely kapacitív csatolás formájában valósult meg. Ennek a megoldásnak persze az egyszerűsége okán van néhány hátránya is. Az egyik hátránya, hogy így szükségessé vált R8 1M Ω -os ellenállás beépítése, a másik, hogy az így kapott felüláteresztő szűrő csökkenti az alsó határfrekvencia minimum értékét, emelet némi beállási időt is hozzáad a rendszerhez.



21. ábra: Az Előerősítő és Szintillesztő fokozat kapcsolási rajza [Saját kép]

Természetesen ezen értékeket megvizsgáltam, és mivel a generátort nem használom csak 1Hz és 1MHz között ezek az értékek elhanyagolhatónak mondhatóak. A szűrő tagot szimulációs környezetben vizsgáltam meg melynek eredménye a 22.ábrán látható.



22. ábra: A bemeneti RC szűrő Bode diagrammja 100mHz-1kHz [Saját kép]

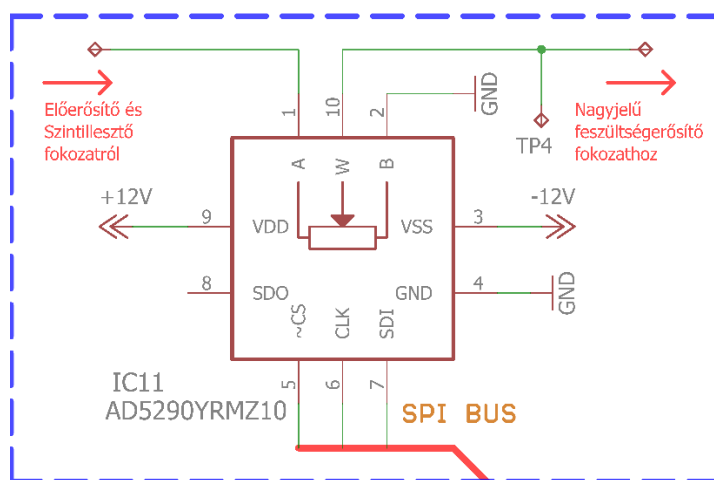
A 22.ábrán a folytonos kék vonal jelöli az amplitúdó értékeket decibel-ben a frekvencia függvényében, a szaggatott kék vonal pedig a fázis értékek alakulását szintén a frekvencia függvényében. A szimuláció során kapott eredmények azt mutatják, hogy abban a sáv szélességben, ahol generátor használva lesz nincsenek kiemelkedően nagy fázis tolás, illetve csillapítási értékek, tehát jelen szűrő a generátor minőségét csak csekély mértékben befolyásolja. Az erősítő fokozat erősítése kétszeres, amelyet R14 és R12-es ellenállások aránya állít be. Az erősítés értékét az alábbi képlet alapján határoztam meg.

$$Au = \left(1 + \frac{R12}{R14}\right) = \left(1 + \frac{1k\Omega}{1k\Omega}\right) = 2$$

A fokozat kettős tápfeszültségről üzemel, melyet stabilizált tápegység szolgáltat. A műveleti erősítő tápfeszültséghez tartozó lábainál a gyári ajánlást követve, helyet kapott meg egy-egy darab 100nF-os kerámia szűrőkondenzátor és ezek az adott lábhoz a lehető legközelebb lettek elhelyezve. A fokozat nagyfrekvenciás kompenzálást nem igényelt gerjedés nem lépett fel a tesztelés során.

13. AZ AMPLITUDÓ SZABÁLYZÁS

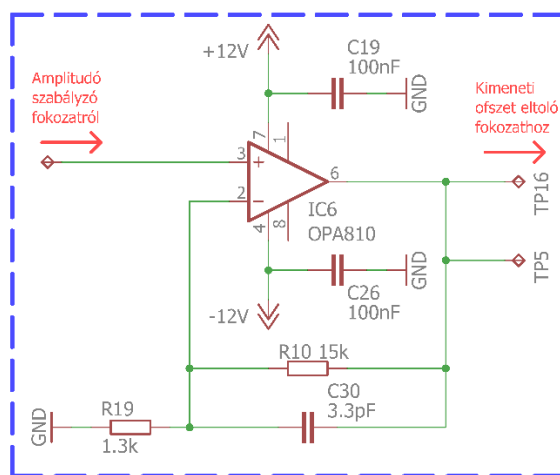
A soron következő részegység a függvénygenerátor legkritikusabb pontja. A szabályzás digitális megvalósítása nagy kompromisszumot okozott. A fő probléma a digitális potméterek gyenge sávszélességéből adódik és ezt a potméter nagy belső kapacitásai okozzák. Ha csak a nagyfrekvenciás viselkedést tartjuk szem előtt egy sima analóg potenciométerrel nagyobb kimeneti sávszélességet lehetett volna elérni és a megvalósítása is egyszerűbb lehetett volna. A másik fő probléma az volt, hogy habár szép számmal kaphatóak a kereskedelemben digitális potméterek, sajnos nem cserélhetőek ki egy az egyben az analóg társaikkal. A legtöbb digitális potméter nem támogatja a szimmetrikus tápfeszültségről történő tápellátást, viszont csak azok a típusok használhatóak váltakozóáramú jelek átvitelére, amelyek támogatják a szimmetrikus tápfeszültséget és sajnos ezekből a típusokból jóval kevesebb van, mint a sima aszimmetrikus tápfeszültséget támogató verziókból. A digitális potméterek sávszélességét nagyban befolyásolja, hogy mekkora a névleges ellenállás értéke. Minél kisebb névleges értékű potmétert választunk annál nagyobb a sávszélessége az eszköznek. A legnagyobb kompromisszumot az jelentette, hogy azon digitális potméterek, amelyek támogatják a szimmetrikus tápellátást 10k Ω -os ellenállás értéktől indulnak, és ebből adódóan a sávszélességük nem túl nagy. Végül a választásom az Analog Devices AD5290-es digitális potméterére esett. Ez a potméter egy 8 bites regiszterrel rendelkezik, amely jelen esetben azt jelenti, hogy összesen 256 féle pozícióba lehet a potmétert beállítani. A regiszter feltöltése SPI-on keresztül történik. Ebben a fokozatban a digitális potméter-en kívül semmi más nem került felhasználásra. Az amplitúdó szabályzás kapcsolási rajzát a 23. ábra szemlélteti. [20]



23. ábra: Az amplitúdó szabályzás kapcsolási rajza [Saját kép]

14. A NAGYJELŰ FESZÜLTSG ERŐSÍTŐ FOKOZAT

A függvénygenerátorban ennél a részegységnél történik a generált jelek legnagyobb mértékű feszültségerősítése. Az erősítést egy nem invertáló módba kötött műveleti erősítő végzi. A fokozat kapcsolási rajza a 24. ábrán látható.



24. ábra: A Nagyjelű feszültségerősítő fokozat kapcsolási rajza [Saját kép]

A fokozat erősítésének értéke az alábbi képlet szerint határozható meg.

$$A_v = \left(1 + \frac{R_{10}}{R_{19}}\right) = \left(1 + \frac{15k\Omega}{1,3k\Omega}\right) = 12,54$$

A fokozat bemenetére az amplitúdó szabályzás során beállított nagyságú jel kerül, melyet a TP4-es ponton lehetett ellenőrizni. A TP4-es ponton mérhető jel csúcsértéke minden egyes jeltípus esetén 400mV. A felerősített jel a TP5-ös mérőponton mérhető meg melynek csúcsértéke minden egyes jeltípus esetén 5V. Ebben a fokozatban mivel már nem egyszeres az erősítés értéke, viszonylag nagy sávszélességű és gyors műveleti erősítő alkalmazására volt szükség. A kapcsolásban felhasznált műveleti erősítő a Texas Instruments cég által gyártott OPA810-es típus. Ez a típus egy FET bemenetű és 70MHz-es erősítés sávszélesség szorzattal rendelkező műveleti erősítő. Ez azt jelenti, hogy ez műveleti erősítő abban az esetben, ha egyszeres erősítésre van visszacsatolva 70MHz-es sávszélességgel rendelkezik, de jelen esetben nem egyszeres a fokozat erősítése így a sávszélesség is kisebb. Mivel egy műveleti erősítő esetén az erősítés, illetve a sávszélesség között lineáris kapcsolatot feltételezünk így ahány szorosára növelem az erősítést annyszorosára csökken a maximális sávszélesség értéke. Az erősítő sávszélessége a jelenleg beállított erősítés esetén az alábbi képlet szerint határozható meg. [21] [2]

$$B = \frac{GBP}{Av} = \frac{70MHz}{12,54} = \mathbf{5,58MHz}$$

Fontos azonban, hogy ez a sávszélesség csak akkor abban esetben nevezhető az erősítő fokozat sávszélességének, ha az semmilyen nagyfrekvenciás kompenzálást nem tartalmaz, azaz nem sáv korlátolt az erősítés. Sávkorlátozásra viszont a legtöbb esetben szükség van annak érdekében, hogy az erősítő fokozat még véletlenül se gerjedjen, mert egy esetleges nagyfrekvenciás gerjedés tönkre teszi a műveleti erősítőt. A 14. ábrán szereplő kapcsolási rajzon a visszacsatoló R10-es ellenállással párhuzamosan van egy C30-as 3,3pF-os kondenzátor, amely pontosan ezt a kompenzálást hivatott megvalósítani. Sajnos a kompenzálás hatására ismételen csökkenni fog a sávszélesség értéke. A kompenzált sávszélesség az alábbi képletek szerint számítható ki.

$$T1 = R10 * C30 = (15 * 10^3) * (3,3 * 10^{-12}) = \mathbf{4,95 * 10^{-8}s}$$

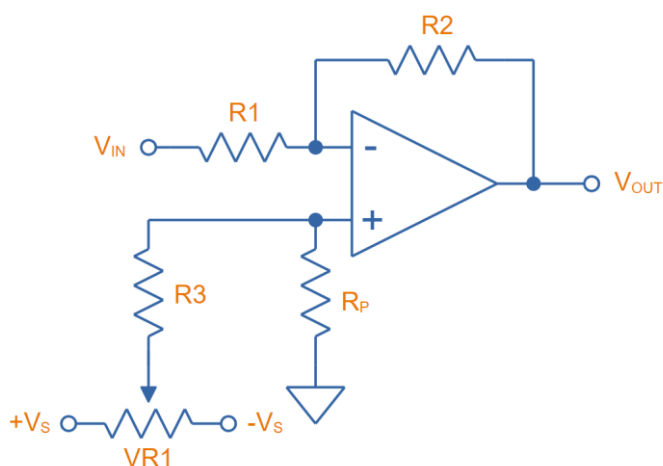
$$\omega_0 = \frac{1}{T1} = \frac{1}{(1 * 10^{-7})} = \mathbf{2 * 10^7 r/s}$$

$$fh = \frac{\omega_0}{2\pi} = 1591549,4Hz = \mathbf{3,21MHz}$$

A kapott végeredmény alapján a kapcsolás sávszélessége 5,58MHz-ről 3,21MHz re módosult. Ez a sávszélesség bőségesen elegendő mivel a generátorral maximum 1MHz-es kimentti jelet állítok elő. A kapcsolási rajzon van még két darab 100nF-os tápszűrő kondenzátor C19 és C26 ezek szintén a gyári ajánlást betartva lettek, a műveleti erősítő tápfeszültség lábaihoz a lehető legközelebb elhelyezve.

15. A KIMENETI OFSZET ELTOLÁST BIZTOSÍTÓ FOKOZAT

Minden függvénygenerátor rendelkezik kimeneti egyenfeszültség eltolási lehetőséggel. Ennek a megvalósítása a legtöbb esetben egy egyszerű potenciométeres feszültségosztóval történik. Az általam vizsgált generátorok esetében ez a funkció nem kapott külön fokozatot, hanem valamelyik közbenső erősítő fokozatban helyezték el az egyenfeszültségű eltolást megvalósító potenciométert. Az általam megvalósítani kívánt generátorban ez a funkciót egy külön fokozat látja el. Az ofszet eltoló fokozat alapját egy invertáló módban használt egyszeres erősítésre beállított műveleti erősítő alkotja. Az egyenfeszültségű eltoláshoz szükséges feszültséget egy feszültségosztóval állítom elő, amit a műveleti erősítő nem invertáló lábára kötök még egy plusz feszültség osztón keresztül. A fokozat kiindulási kapcsolási rajzát a 25. ábra szemlélteti.

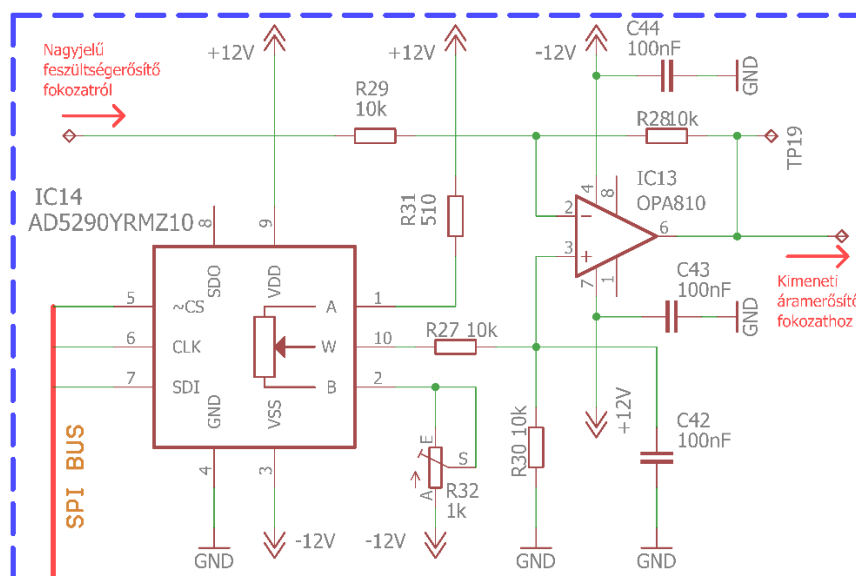


25. ábra: Az ofszet eltolást biztosító fokozat kiindulási kapcsolási rajza [22]

A fokozat erősítése $R2$ és $R1$ ellenállások arányával állítható be, de jelen esetben a beállított erősítés nem csak a váltakozó áramú erősítés lesz, hanem az egyenfeszültségű erősítés is. A $VR1$ -es potméterrel pozitív és negatív értékű feszültséget is elő lehet állítani így a kimenet pozitív és negatív irányba is egyaránt eltolható. Ha a potméter középpállásban van akkor a V_{out} kimeneti ponton mért ofszet feszültség értéke $0V$. Az $R3$ és az R_P jelű ellenállások egy második feszültségosztót alkotnak, erre jelen esetben azért van szükség mert a műveleti erősítő a nem invertáló lábán lévő feszültséget kétszeresen erősíti. A fokozat kimenetén mérhető ofszet feszültség értéke az alábbi képlet szerint számolható ki.

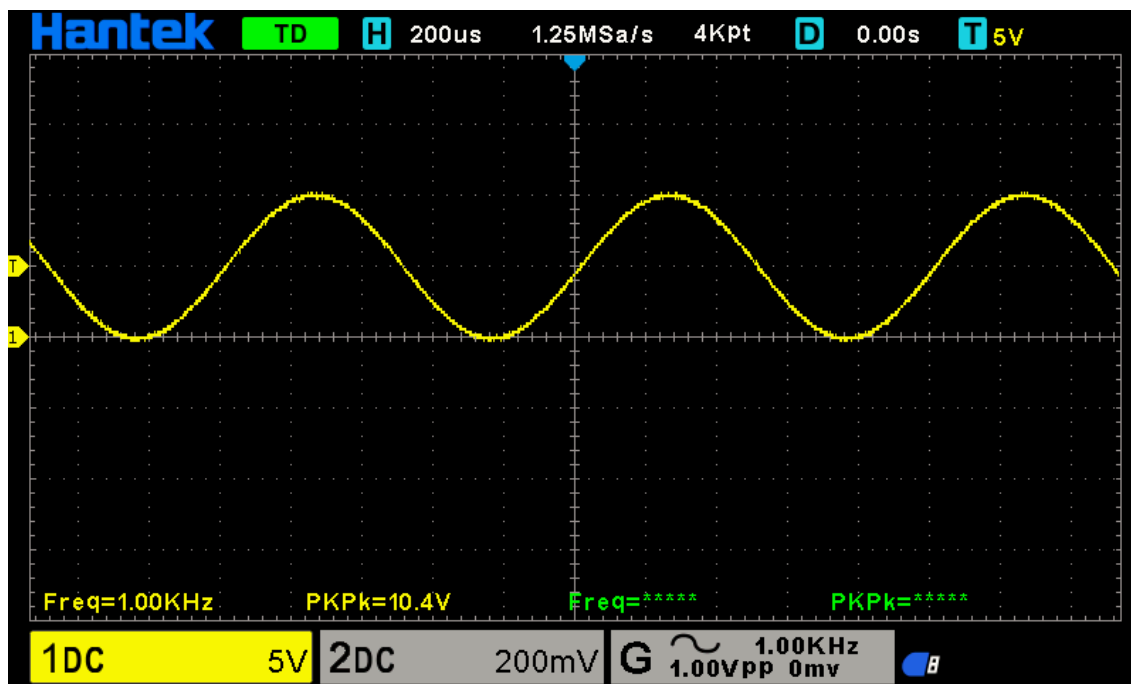
$$V[ofszet] = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) * \left(\frac{R_P}{R3 + R_P} * VR1\right)$$

A 26. ábra a módosított és megvalósított ofszet eltoló fokozatot ábrázolja. A működése teljesen megegyezik a 25. ábrán lévő alapáramkör működésével, viszont néhány ponton pontosítva lett a kapcsolás.

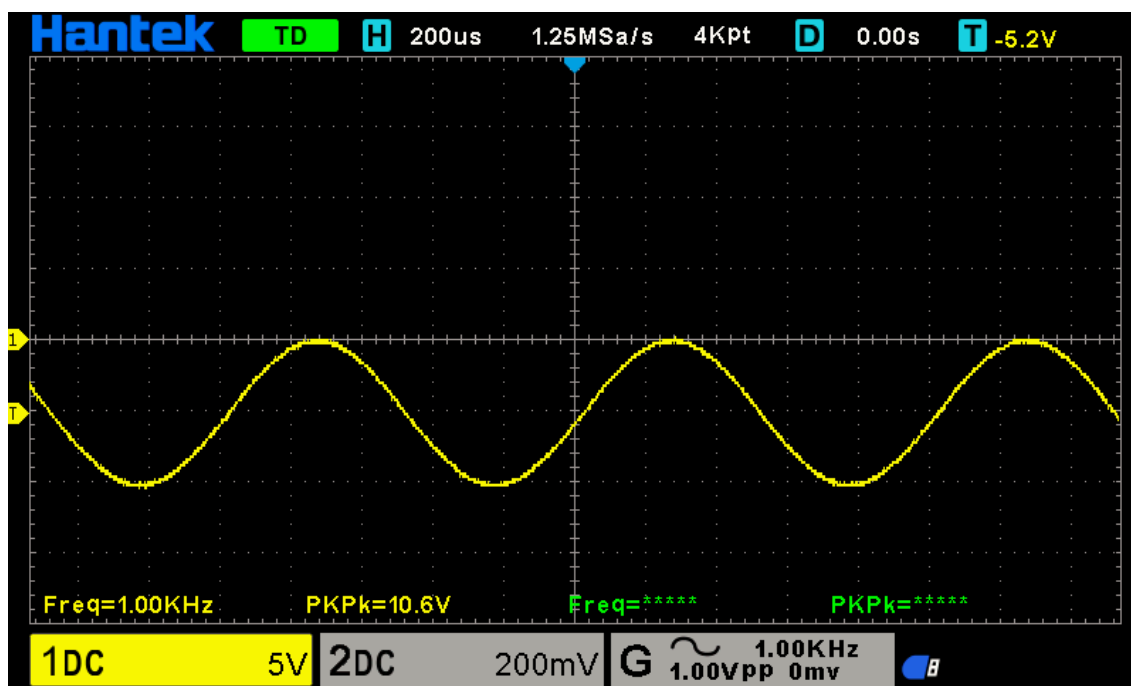


26. ábra: A kimeneti ofszet eltolást biztosító fokozat kapcsolási rajza [Saját kép]

Az analóg potméter digitálisra lett cserélve mivel a generátor teljesen digitális vezérlésű. A potméter típusa megegyezik a 13. fejezetben szereplő amplitúdó állításért felelős típussal egyedül az ellenállásértékük, ami különböző. Jelen esetben a 0V-os kimeneti ofszetfeszültséghez tartozó potméter állás a 127-es értékhez tartozik, azonban a tápfeszültség aszimmetriái miatt ez az érték a valóságban soha nem lesz 0V. A tökéletes 0V-os ofszetfeszültség eléréshez szükséges még a potméter A és B kivezetéseivel sorba kötött egy-egy darab ellenállás, amelyből az egyik egy változtatható precíziós többfordulatú heliotrimmer. A kapcsolási rajzon a fix értékű ellenállás az R7-es jelzésű 510 ohmos, a változható trimmer potméter pedig az R17-es 1kiloohmos. A kapcsolás pontos beállításakor, a digitális potmétert a 127-es pozícióra állítva a kimeneti ofszet feszültség TP6-os mérőponton mérhető. Az R17-es trimmer potmétert tekerve beállítható a TP6-os ponton a 0V-os ofszet feszültség ez nagyjából a potméter középállásánál történik meg. A digitális potméter 8 bites típus tehát 0-tól 255-ig lehet értéket beállítani rajta. A [127-255] -ös értékek között pozitív előjelű ofszetfeszültség állítható be, illetve a [127-0] -ás tartományban pedig negatív előjelű a beállított feszültség érték. [20]



27. ábra: Pozitív 5V-os egyenfeszültséggel eltolt 1kHz-es szinuszjel [Saját kép]



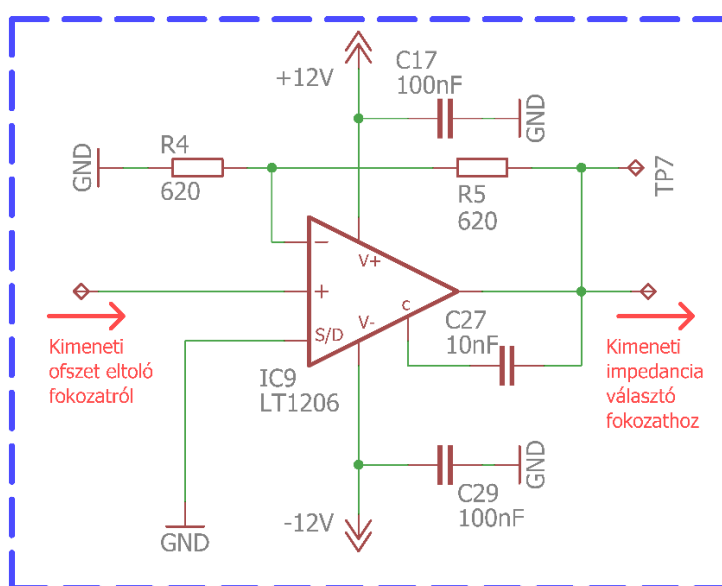
28. ábra: Negatív 5V-os egyenfeszültséggel eltolt 1kHz-es szinuszjel [Saját kép]

16. A KIMENETI ÁRAMERŐSÍTŐ BUFFER FOKOZAT

Az eddig ismertetett erősítő fokozatok főként feszültségerősítést végeztek. Annak ellenére, hogy az alkalmazott műveleti erősítők kimeneti impedanciája rendkívül alacsony, nem lehet túlságosan alacsony terhelő ellenállással terhelni a kimenetüket, mert nem képesek elegendő kimenő áramot szolgáltatni a terhelés számára. Az alkalmazott műveleti erősítők maximális kimeneti árama 75mA, ami kisebb terhelések esetén elegendő, de a nagy áramigényű kapacitív terhelések, illetve az alacsony impedanciás terhelések esetén ez már kevésnek bizonyul. Azokat az erősítő fokozatokat, melyek széles sáv szélességgel rendelkeznek, és hatékonyan tudnak alacsony impedanciás és kapacitív terheléseket meghajtani, mindeközben csekély feszültségerősítést biztosítanak, buffer erősítőknak nevezik. Egy ilyen buffer fokozat diszkrét alkatrészek felhasználásával is megvalósítható, de általában ez a megoldás viszonylag nagy helyet igényel a nyomtatott áramkörü lapon, és a diszkrét alkatrészek nagy szórása lassú és alacsony sáv szélességű működést eredményezhet. Egy másik probléma a megfelelő kimeneti rövidzárvédelem hiánya. Ennek célja, hogy megvédje a kimeneti erősítő fokozatot, ha rövidzárlat lép fel a generátor kimenetén. Az általában alkalmazott rövidzárvédelmi mechanizmusok közül a legelterjedtebb a határoló típusú rövidzárvédelem. Azonban fontos megjegyezni, hogy ez a típus az egyszerűsége miatt hajlamos tévesen működésbe lépni főként a nagy frekvenciás jelek hatására és ez a téves működés torzítást tud okozni a kimeneti jel alakjában. A diszkrét alkatrészekből történő megvalósítások tehát nem célszerűek helyettük az integrált megoldásokat javasolt alkalmazni. Az integrált megoldások már magukban foglalják a megfelelő rövidzárvédelmet emellett kellően nagy sáv szélességgel rendelkeznek és a kimeneti impedanciájuk is alacsony.

A buffer erősítő áramkörök sáv szélessége relatív alacsonynak mondható egy sima műveleti erősítő sáv szélességéhez képest, ennek oka az, hogy a buffer erősítőnek nagy áramokat kell szolgáltatnia a terhelés felé, a nagyobb áramok nagyobb felületeket igényelnek a tokozáson belül, amelyek hatására nagyobb parazita kapacitások keletkeznek és ezek a kapacitások rontják le az eszköz sáv szélességét. A nagyobb kimeneti áramigény nagyobb disszipációt is eredményez ezért igen gyakran, de nem minden esetben az alkatrész tokozásától függően passzív hűtés alkalmazására is van lehetőség.

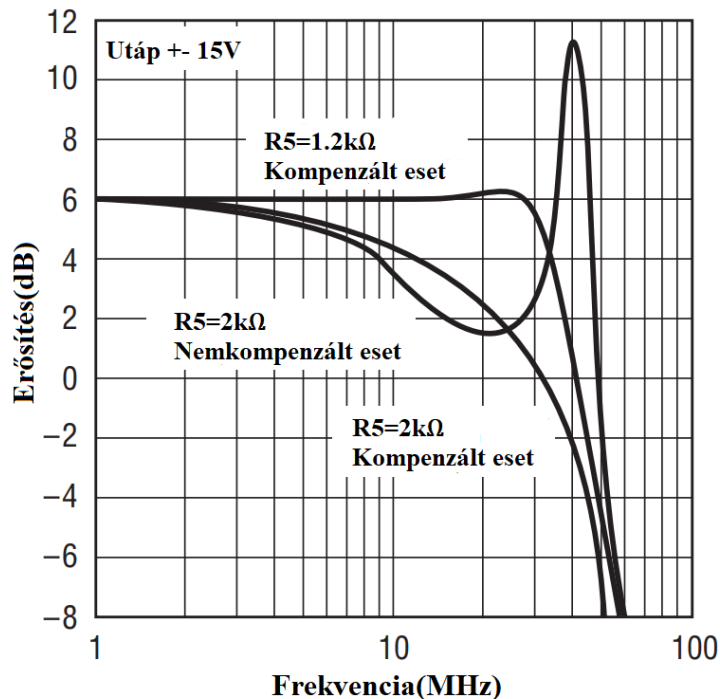
A kereskedelmi forgalomban számos típus található, ezek közül én az Analog Devices cég LT1206-os típusát találtam a legalkalmasabbnak. Ez a típus a kimenetére helyezett terhelés függvényében minimum 250mA és maximum 1,2A-es kimeneti áramot képes szolgáltatni, ezeket az áramértékeket a gyártó egy 1Ω -os terhelés mellett specifikálja. Az IC sávszélessége 60MHz a jel emelkedési sebességének (slew rate) értéke pedig 900V/us. A kimeneti rövidzár esetén az eszköz nem sérül meg, de jelentősen melegszik, ezért javasolt passzív hűtést alkalmazni a megfelelő hőelvezetés érdekében. A 29. ábra a megvalósított buffer erősítő fokozat kapcsolási rajzát szemlélteti.



29. ábra: A kimeneti buffer erősítő fokozat kapcsolási rajza [Saját kép]

A 29. ábrán bemutatott kapcsolási rajz egy nem invertáló erősítőt valósít meg, melynek erősítését az R5-ös és R4-es ellenállások állítják be kétszeres értékűre. A kapcsolás tartalmaz egy nem szokványos áramköri megoldást, ez az IC C(Ccomp) lába és a fokozat kimenete között elhelyezett C27-es 10nF-os kerámia kondenzátor. Ez a kapacitás egy kompenzációs hálózat része, mely hálózat további alkatrészei a tokozáson belül vannak. Ez az IC egy úgynevezett áram visszacsatolásos negatív visszacsatolást használ, aminél a visszacsatoló ellenállások értéke relatív alacsony, de ennek hatására nagyobb áramok tudnak folyni a visszacsatoló hálózaton, így a parazitakapacitások töltése gyorsabb és könnyebb ez egy nagyon gyors működésű erősítőt eredményez, ami rendkívül előnyös a jelenlegi alkalmazásban. A probléma az, hogy a generátor kimenetére helyezett terhelés a légritkább esetben nevezhető tisztán ohmos jellegűnek, sok esetben kapacitív jellegű terhelés is jelen van a kimeneten.

Ez a gyors működésű erősítő a kapacitív terhelésekre főleg a nagyfrekvenciás tartományban erős túllövással, berezgéssel válaszol ez a jelenség legjobban a négyszögjel felfutó élénél figyelhető meg. A 30. ábra egy 200pF nagyságú kapacitív terhelés által okozott nagyfrekvenciás emelést szemlélteti különböző értékű visszacsatoló ellenállások esetén.



30. ábra: Nagyfrekvenciás emelés, kompenzált, illetve nem kompenzált esetek különböző értékű visszacsatoló ellenállások esetén [Saját kép]

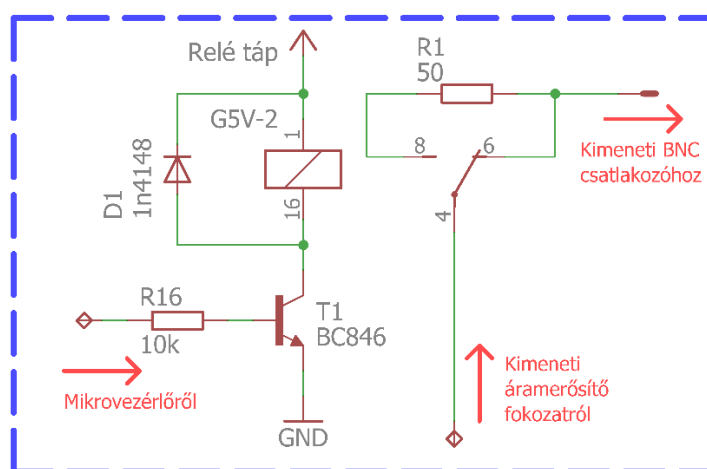
A 30. ábra alapján megállapítható, hogy amennyiben egy erősítő fokozat erősítése konstansnak tekinthető (jelenleg 6 dB, vagyis kétszeres erősítés), akkor a visszacsatoló ellenállás (R_5) értékének csökkentésével növelhető a kapacitív terhelésekre adott válasz gyorsasága, azaz túllövés keletkezik a kimeneti jelben. Ennek az az oka, hogy minél kisebb a visszacsatoló ellenállás értéke, annál gyorsabban működik az erősítő. Ugyanakkor ezzel a beállítással növekszik a túllövések valószínűsége. [23]

A 29. ábrán látható, hogy a beállított erősítés szintén kétszeres(6dB) de az R_5 -ös visszacsatoló ellenállás majdnem fele akkora értékű, mint a 30.ábrán vizsgált esetben így az általam használt alkalmazásban mindenképpen célszerű a C27-es kompenzáló kondenzátor alkalmazása.

17. A KIMENETI IMPEDANCIA VÁLASZTÓ FOKOZAT

A legtöbb függvénygenerátor szabvány 50Ω -os kimeneti impedanciával rendelkezik, de néhány generátor esetében ez a kimeneti impedancia átkapcsolható egy úgynevezett alacsony impedanciás kimenetre. Az általam megvalósított generátorban is van lehetőség kétféle kimeneti impedancia beállítására. Az egyik opció a szabvány 50Ω -os kimeneti impedancia míg a másik lehetőség egy alacsony impedanciás kimenetet biztosít. Az 50Ω -os kimeneti impedancia szabványa a BNC (Bayonet Neill–Concelman) csatlakozók esetében a 50Ω -os karakterisztikus impedancia szabványával kapcsolódik össze. A koaxiális kábelek esetében a legelterjedtebb szabvány az USA-ban a MIL-C-17 szabvány. Az Európai szabványok között az egyik ismert példa az RG-58 típusú kábel, amely 50Ω -os karakterisztikus impedanciát tartalmaz.

Az 50Ω -os kimeneti impedancia azt jelenti, hogy a függvénygenerátor kimeneti jele, ha egy 50Ω -os terhelésre van kapcsolva, a jelet jól illeszti a terhelés impedanciájához, minimalizálva a visszaverődéseket és a torzításokat. Ez nagyon fontos a mérőműszerek és más berendezések pontos mérési eredményeinek eléréséhez. Ezenkívül az 50Ω -os kimeneti impedancia lehetővé teszi a különböző eszközök közötti könnyű csatlakozást és összekapcsolást anélkül, hogy bonyolult impedancia-illesztőket kellene alkalmazni. Az alacsony impedanciás esetén a generátor kimenete hatékonyan kezeli az általában nehezen hajtható, alacsony impedanciájú terheléseket. Ez az opció különösen hasznos, amikor nem rendelkezünk előzetes információval a generátor kimenetére helyezett impedanciáról. Az impedancia váltó kapcsolási rajza a 31. ábrán látható.



31. ábra: A kimeneti impedancia választó fokozat kapcsolási rajza [Saját kép]

18. A MIKROVEZÉRLŐ KIVÁLASZTÁSA

Az alkalmazott mikrovezérlő kiválasztásakor az egyik fő szempont az volt, hogy az adott feladatra a legmegfelelőbb mikrovezérlőt válasszam ki tehát legyen elegendő általános felhasználású lába, és rendelkezzen SPI és I2C interfészekkel. A második fő szempont a könnyű és olcsó beszerezhetőség volt. Az alábbi táblázatban összesítem a felhasználandó lábak számát és típusát, illetve azokhoz kapcsolódó eszközöket és funkcióikat.

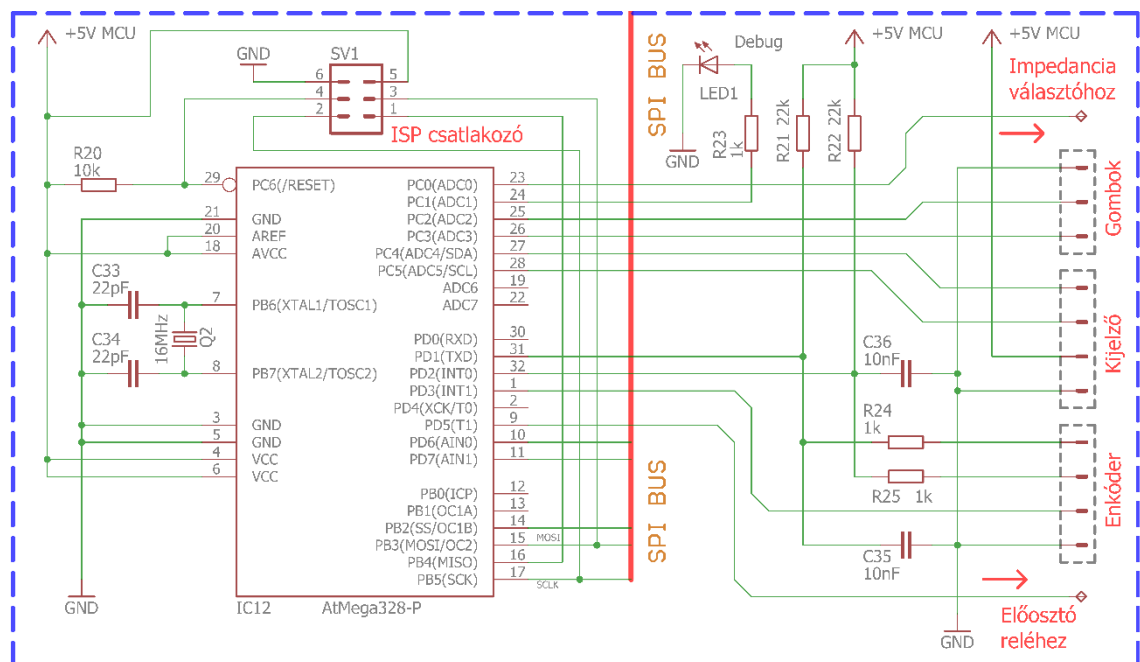
Eszköz és Funkció	Lábak darabszáma és típusa
Nyomógombok: Kimeneti impedancia váltás, DDS kimenet tiltása.	2db, általános felhasználású láb (GPIO)
Rotary Enkóder: Offszet beállítás, Frekvencia beállítás, Jelalak kiválasztás, Kimeneti feszültség érték beállítás.	3db, általános felhasználású láb (GPIO)
LCD Kijelző: Beállított értékek megjelenítése.	2db, I2C interfész
CSS (Chip Select): SPI kommunikációhoz szükséges engedélyező lábak.	3db, általános felhasználású láb (GPIO)
SPI Kommunikáció: A DDS IC és a digitális potméterek beállításához szükséges.	3db, SPI interfész lábak (MISO, MOSI, SCLK)
Relék: Előosztó be-ki kapcsolás, Impedancia váltás 50Ω-ról 0 Ω-ra.	2db, általános felhasználású láb (GPIO)
Led: A program Debug-olásakkor van nagy szerepe.	1db, általános felhasználású láb (GPIO)

32. ábra: A mikrovezérlő felhasznált lábainak összefoglaló táblázata [Saját kép]

Az adatok összegzése alapján az általános felhasználású lábakra és az SPI, valamint I2C interfészekre vonatkozó követelmények alapján a számomra legmegfelelőbb választás az Atmel 8-bites mikrovezérlő családjának egyik kiemelkedő típusa, az Atmega328P. Ennek a választásnak több oka van: a 8-bites környezet elegendőnek bizonyul jelen alkalmazáshoz, emellett a szóban forgó mikrovezérlő típust már alaposan megismertem korábbi projektek során. [24]

A mikrovezérlő működéséhez szükséges az órajel biztosítása, és ebben az esetben két lehetőség áll rendelkezésre. Az egyik lehetőség a belső oszcillátor használata, ez egy RC (rezisztív-kapacitív) oszcillátor. Ennek az alkalmazása célszerű lehet olyan esetekben, ahol a készülék dobozában nincs nagy hőmérsékletváltozás, kevés a környezeti zavar és nincs szükség nagy pontosságra. Amennyiben pontos időzítésre, pontos órajelfrekvenciára és jó hőmérséklet stabilitásra van szükség, javasolt a külső kvarcoszcillátor alkalmazása. Én is az utóbbi lehetőséget választottam, mivel az elkészült áramkört viszonylag zárt készülékdobozban fogom elhelyezni. Ezenkívül néhány alkatrész disszipációja viszonylag magas, így gyakorlatilag garantált, hogy a készülékdobozon belüli hőmérséklet változni fog.

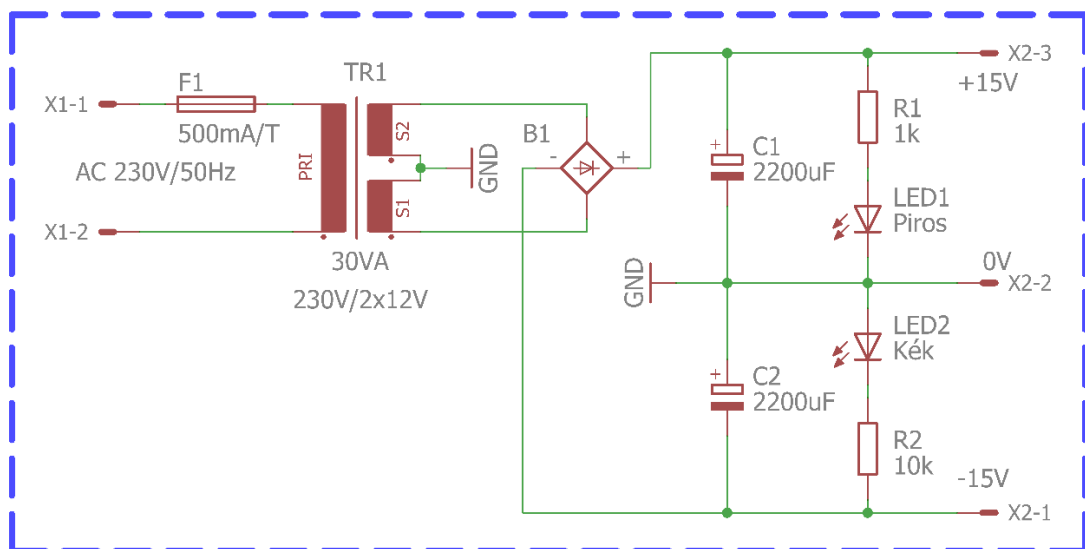
A mikrovezérlő programozása ISP-vel (In System Programming) történik. Ebben az esetben a programozás a mikrovezérlő SPI interfészen keresztül történik, a programozó egység az, ami ISP-módba van beállítva. Az ISP módban történő programozás lehetővé teszi a mikrovezérlő programozását és újra programozását közvetlenül a végleges alkalmazásban vagy az adott rendszerben anélkül, hogy le kellene forrasztani a mikrovezérlőt a nyomtatott áramkörtől. Ez rugalmas és könnyű programozást biztosít a fejlesztés során. [25] A mikrovezérlős részegység kapcsolási rajza a 33. ábrán látható.



33. ábra: A mikrovezérlős részegység kapcsolási rajza [Saját kép]

19. A TÁPEGYSÉGEK

A tápegység tervezése során az elsődleges szempont az volt, hogy lehetőleg elkerüljem a kapcsolóüzemű tápegységek alkalmazását. A tervezés kezdetén mégis fontolóra vettem a kapcsolóüzemű tápegységek lehetőségét, mivel az alacsony disszipáció elérése általában egy kulcsfontosságú műszaki követelmény. Ugyanakkor a kapcsolóüzemű tápegységek használatának hátránya, hogy maga a kapcsolási folyamat általában több száz kHz-es frekvencián történik. Mivel a tápegység egy függvénygenerátor tápellátására szolgál majd, nem célszerű olyan típust használni, amely magas, több száz kHz-es kapcsolófrekvenciával rendelkezik, ezért a végső tápegység egyszerű disszipatív elvű tápegység lett. A generátor működéséhez szimmetrikus és aszimmetrikus tápfeszültségeket kell biztosítani. A +12V és a -12V szimmetrikus tápfeszültség a műveleti erősítők és a digitális potméterek tápellátását valósítja meg. A mikrovezérlő és a relék külön stabilizált 5V-os tápfeszültségről üzemelnek, hogy elkerüljék a mikrovezérlő tápfeszültségében a relék működéséből eredő zavarok megjelenését. A tápegység két nagy részegységre van szétbontva. Az egyik részegység a fő tápegység melynek paneljén egy 30VA-es INDEL gyártmányú hálózati transzformátor és a hozzá tartozó graetz hidas egyenirányító kapcsolás kapott helyet. Ezen a panelen van még két darab led egy piros és egy kék, melyek a pozitív és a negatív tápfeszültségek meglétét jelzik. A fő tápegység kapcsolási rajzát a 34. ábra szemlélteti a 35. ábrán pedig a beültetett panel látható. [26]



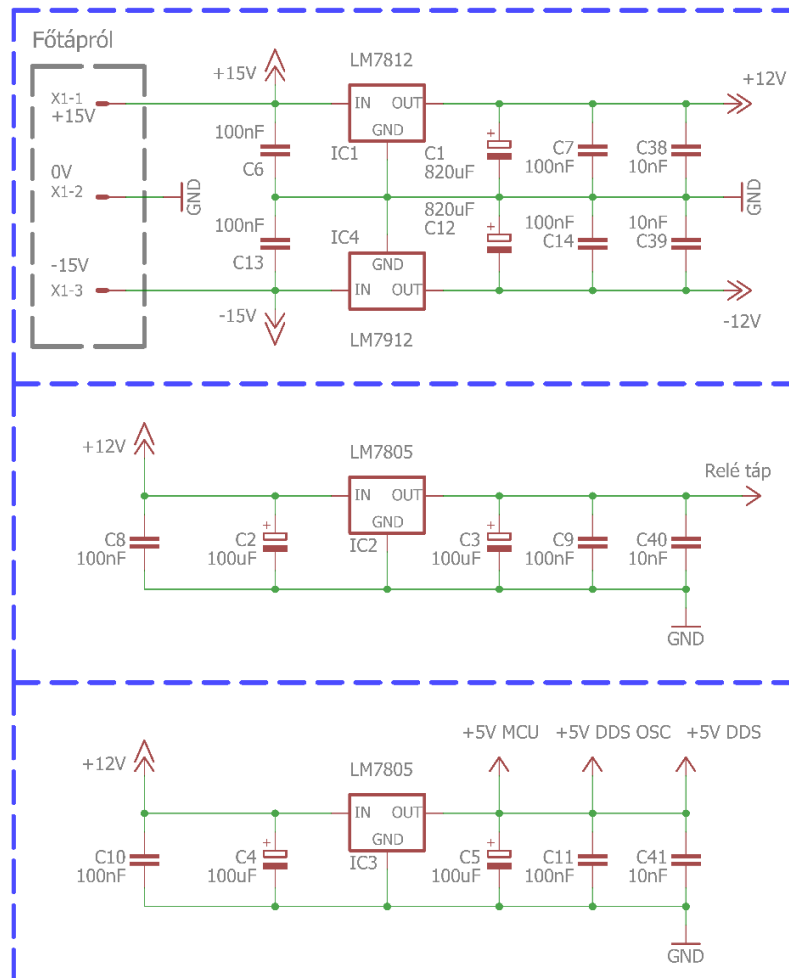
34. ábra: A fő tápegység kapcsolási rajza [Saját kép]



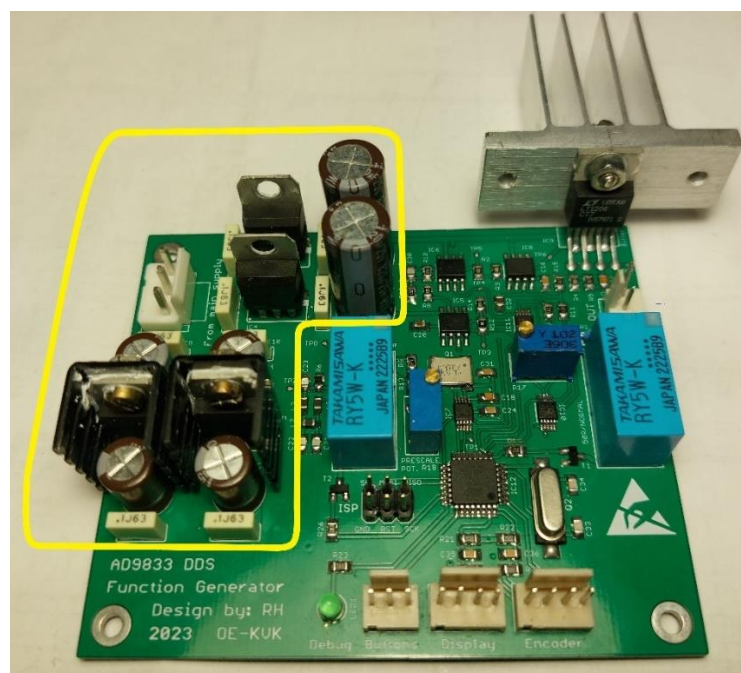
35. ábra: A megvalósított főtápegység [Saját kép]

A főtápegység által előállított feszültségek még nem stabilizáltak. A feszültségek stabilizálása a tápegység második fő részegységében a stabilizátoros szekcióban történik. A szükséges feszültségek stabilizálását egyszerű analóg stabilizátor IC-k valósítják meg. A főtápegység által előállított feszültség szimmetrikus +15V és -15V értékű, ezekből a feszültségekből vannak a +12V és a -12V-os feszültség értékek előállítva az L7812-es pozitív és L7912-es negatív feszültségű stabilizátor IC-vel. A két darab 5V-os aszimmetrikus tápfeszültség előállítása a már előzőleg stabilizált +12V-ból történik egy-egy L7805-os stabilizátorral, így a stabilitási tényezők összeszoródnak és így az 5V-os stabilizátorok disszipációja is kisebb lesz. A stabilizátoros tápegység rész kapcsolási rajza a 36.ábrán látható.

A 37.ábrán a sárgával bekeretezett részben van a stabilizátoros tápegység rész megvalósítva. Mindegyik stabilizátor TO-220-as tokozású, jelen esetben szükséges volt ennek a tokozásnak a használata, mert a stabilizátorok főként az 5V-os típusok jelentős disszipációnak vannak kitéve és ennek hatékony kezelésére a tokozás könnyen lehetővé teszi a passzív hűtés alkalmazást, amely most 1-1 darab fekete hűtőzászlót jelent. Ez a mértékű passzív hűtés elegendőnek bizonyult.



36. ábra: A stabilizátoros tápegység kapcsolási rajza [Saját kép]



37. ábra: A beültetett stabilizátoros tápegység rész [Saját kép]

20. A KIJELZŐ ÉS A KEZELŐSZERVEK

A függvénygenerátoron beállított értékek megjelenítése karakteres LCD kijelzőn történik. A számos LCD kijelzők közül jelen esetben a 20x4-es kiosztású felelt meg a legjobban mert viszonylag sok funkció és beállított érték kerül kiírtatásra a használat során. Kisebb karakterszámú kijelző esetén átláthatatlan lett volna a kijelzőn megjelenő információ. A felhasznált LCD kijelző a RAYSTAR OPTRONICS cég terméke, mely kék ledes háttérvilágítással rendelkezik. A kijelző 5V-os tápfeszültségről működik. A kijelző és mikrokontroller közti kommunikáció I2C interfészen keresztül történik, de ez a kijelző eredetileg nem alkalmas az I2C kommunikációra így egy kiegészítő adapter felhasználására volt szükség. [27] [28]

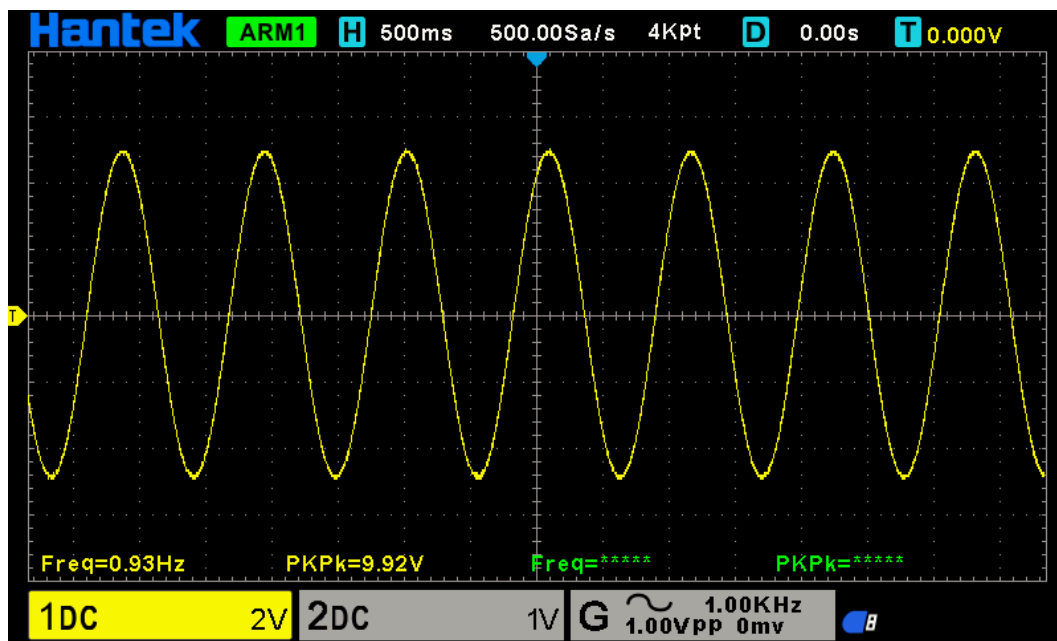
A kezelőszervek tekintetében összesen kétféle alkatrész lett felhasználva, annak érdekében, hogy a készülék majdani előlapján minél kevesebb kezelőszerv legyen ezzel növelve az esztétikát és az átláthatóságot. Az egyik kezelőszerv a nyomógomb, amelyből összesen két darab került felhasználásra. Ezek közül az egyik a kimeneti impedancia kiválasztását végzi a másik pedig lehetőséget ad DDS IC kimenetének be-ki kapcsolására. A frekvencia értékének beállítása, a kimeneti amplitúdó és DC szinteltolás, valamint a kívánt jelalak kiválasztása enkóder segítségével történik. Az enkóder rendelkezik beépített nyomógommbal is, amivel az éppen beállítani kívánt funkciót lehet kiválasztani majd az enkóder gombjának jobbra vagy balra tekerésével állítható be a kívánt érték. Ez megint egy praktikus megoldás mert így nem kellett minden egyes funkcióhoz külön-külön nyomógombot alkalmazni. A 38. ábra a felhasznált kijelzőt, illetve a kezelőszerveket mutatja be.



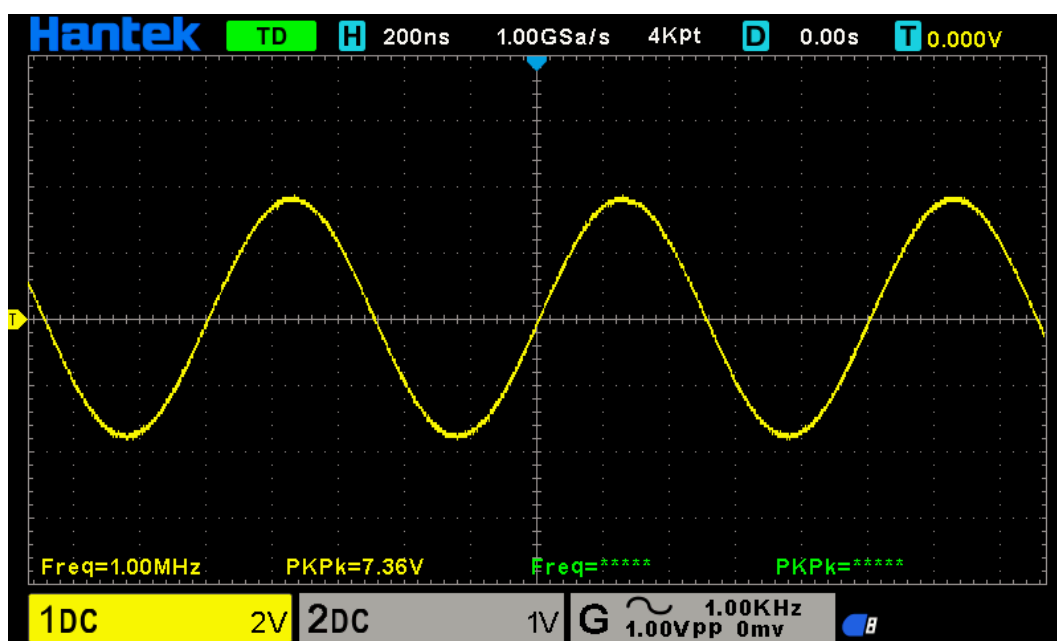
38. ábra: A felhasznált kijelző és a kezelőszervek [Saját kép]

21. A FÜGGVÉNYGENERÁTOR BEMÉRÉSE

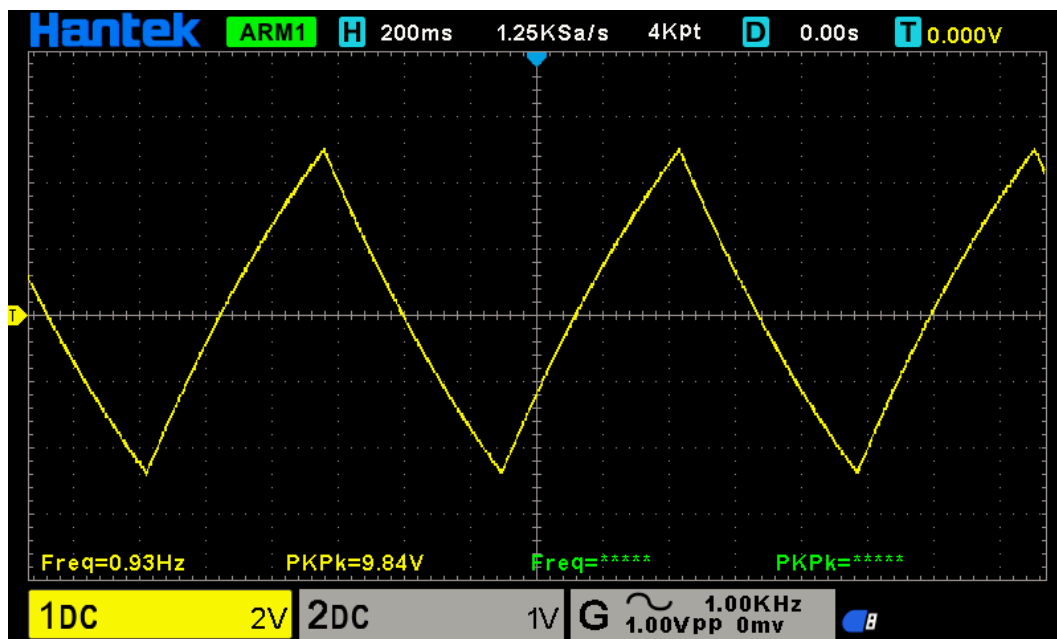
Ebben a fejezetben az elkészült generátor bemérésekor kapott oszcilloszkóp ábrák szerepelnek. A bemérés során megmérésre kerültek a felső és alsó határfrekvencia értékek mind a három jelalak esetén, illetve négyszögjel esetén a jel emelkedési sebessége, végül pedig az FFT analízisek eredményei láthatóak 1kHz, 100kHz, és 1MHz-es szinuszjelről.



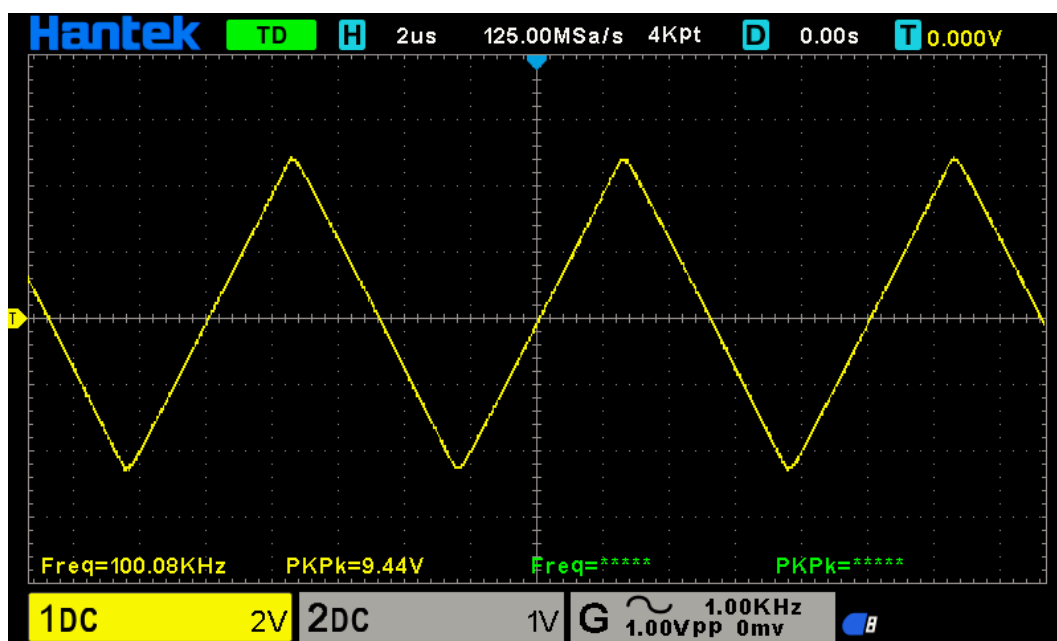
39. ábra: Az alsó határfrekvencia mérése szinusz jel esetén [Saját kép]



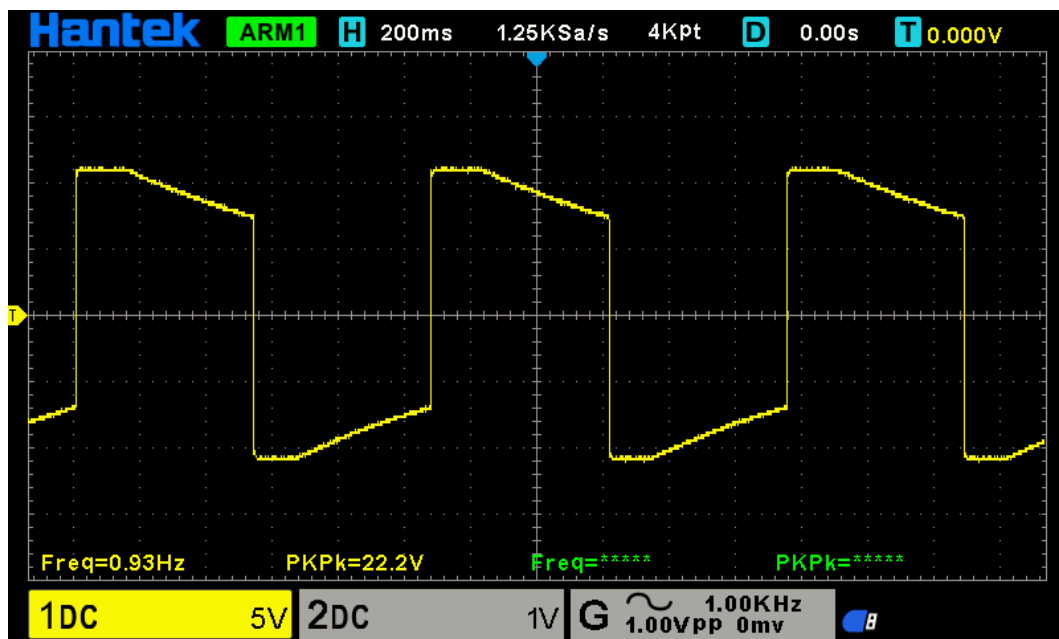
40. ábra: Az felső határfrekvencia mérése szinusz jel esetén [Saját kép]



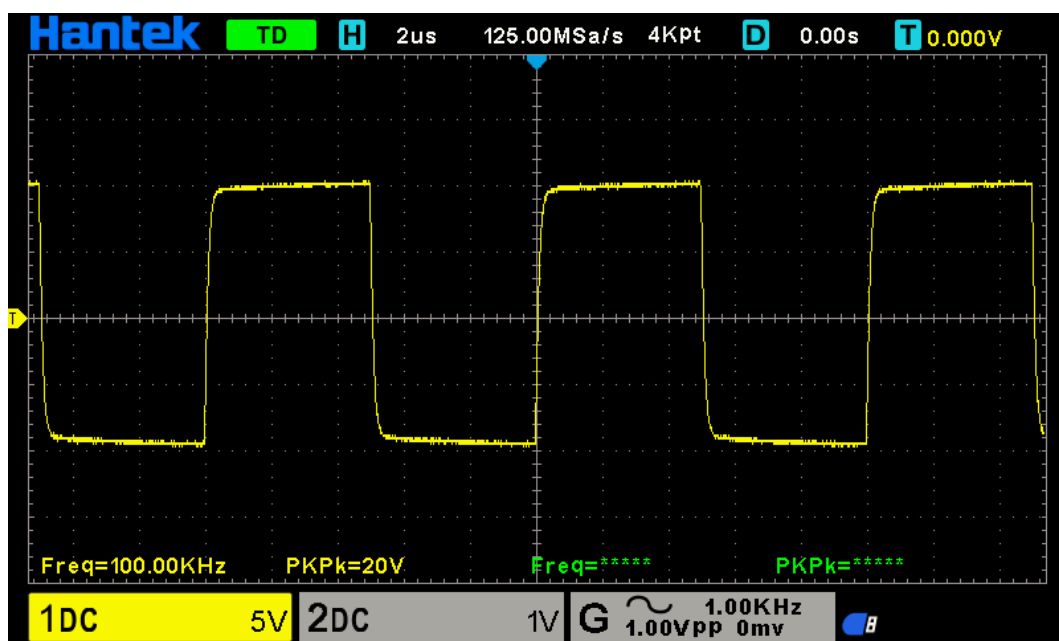
41. ábra: A háromszögjel alsó határfrekvenciájának mérése [Saját kép]



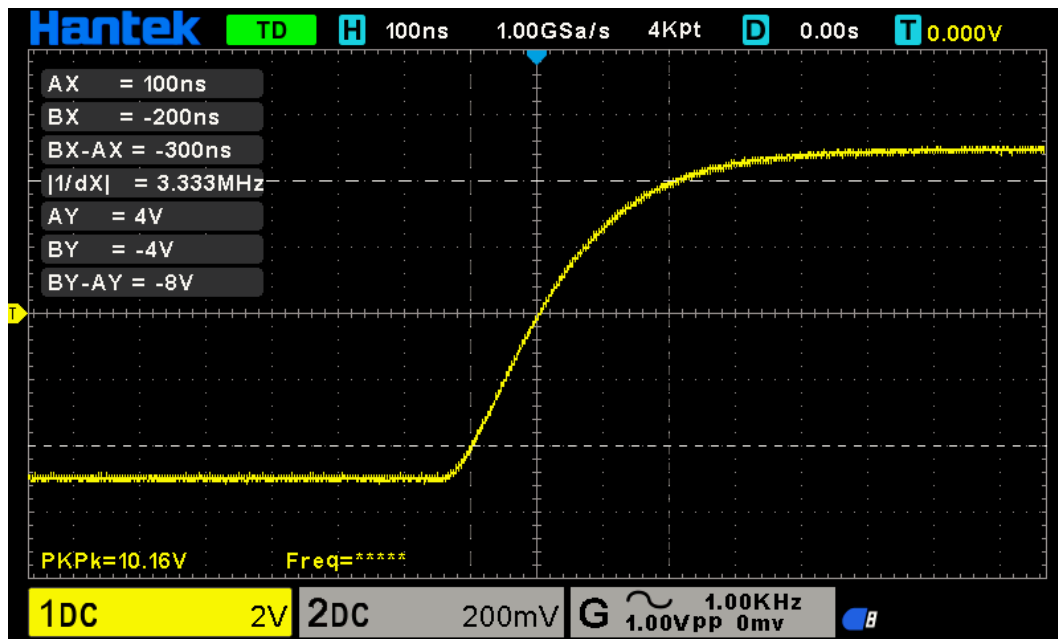
42. ábra: A háromszögjel felső határfrekvenciájának mérése [Saját kép]



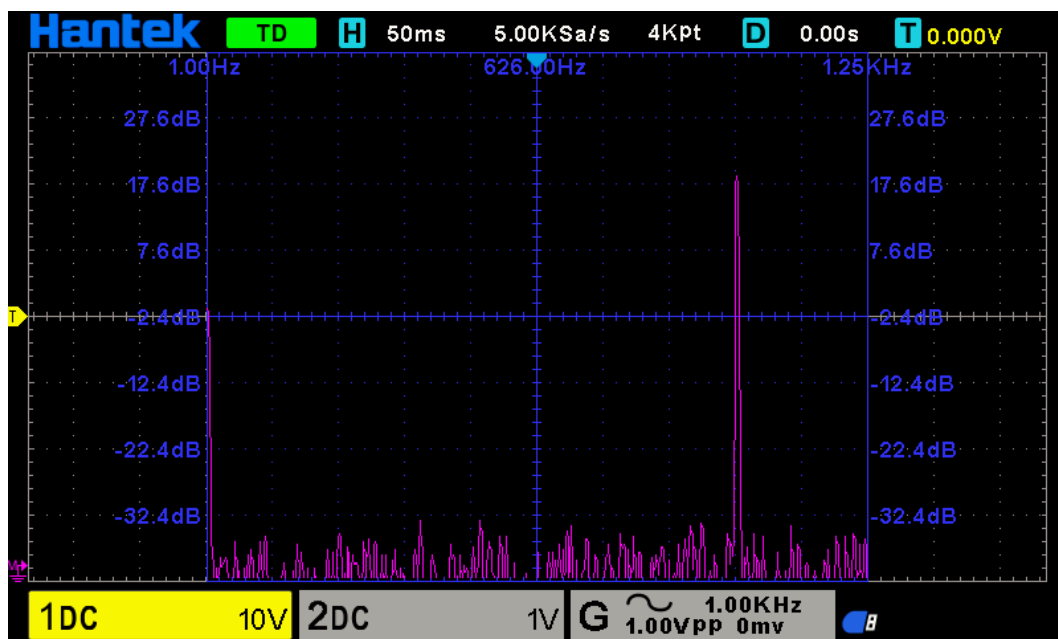
43. ábra: A négyszögjel alsó határfrekvenciájának mérése [Saját kép]



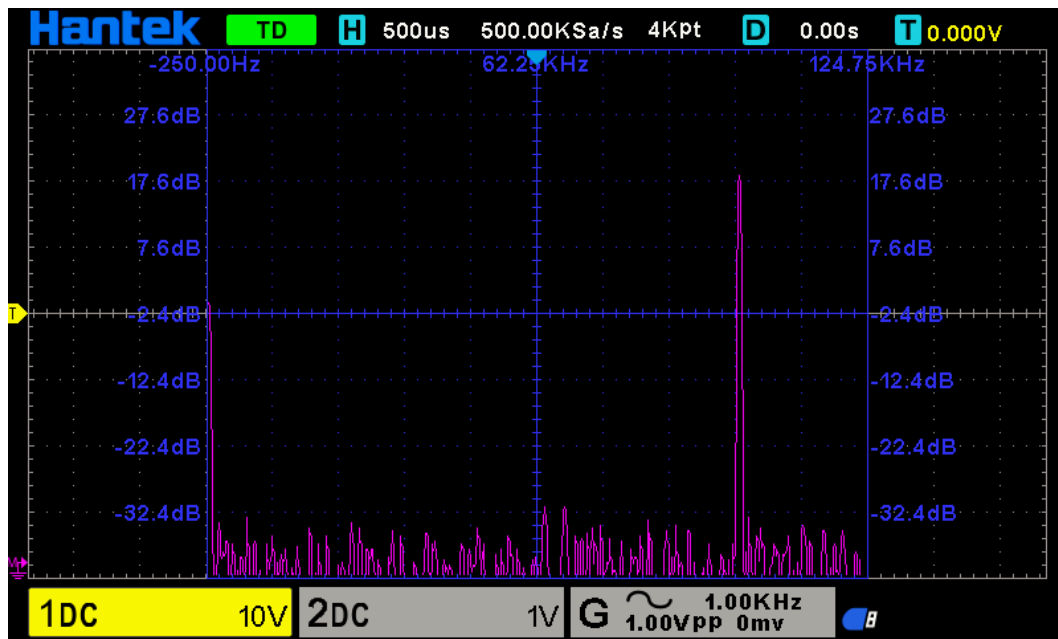
44. ábra: A négyszögjel felső határfrekvenciájának mérése [Saját kép]



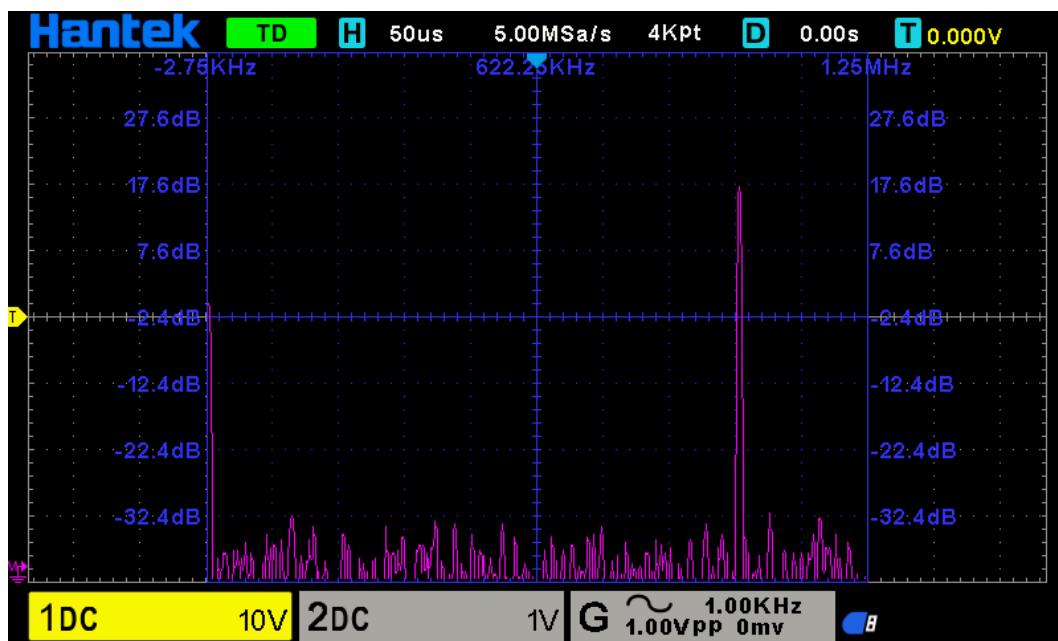
45. ábra: Egy 1kHz-es négyzetjel jel emelkedési sebességének mérése [Saját kép]



46. ábra: Az FFT analízis eredménye 1kHz-es szinuszjel esetén [Saját kép]



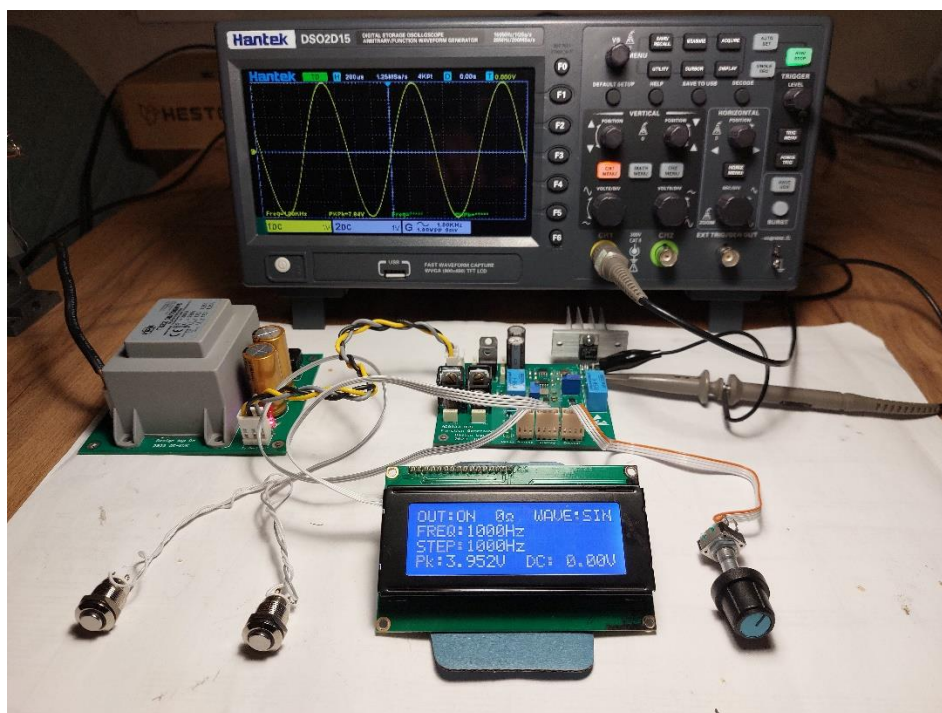
47. ábra: Az FFT analízis eredménye 100kHz-es szinuszjel esetén [Saját kép]



48. ábra: Az FFT analízis eredménye 1MHz-es szinuszjel esetén [Saját kép]

22. ÖSSZEFOGLALÁS

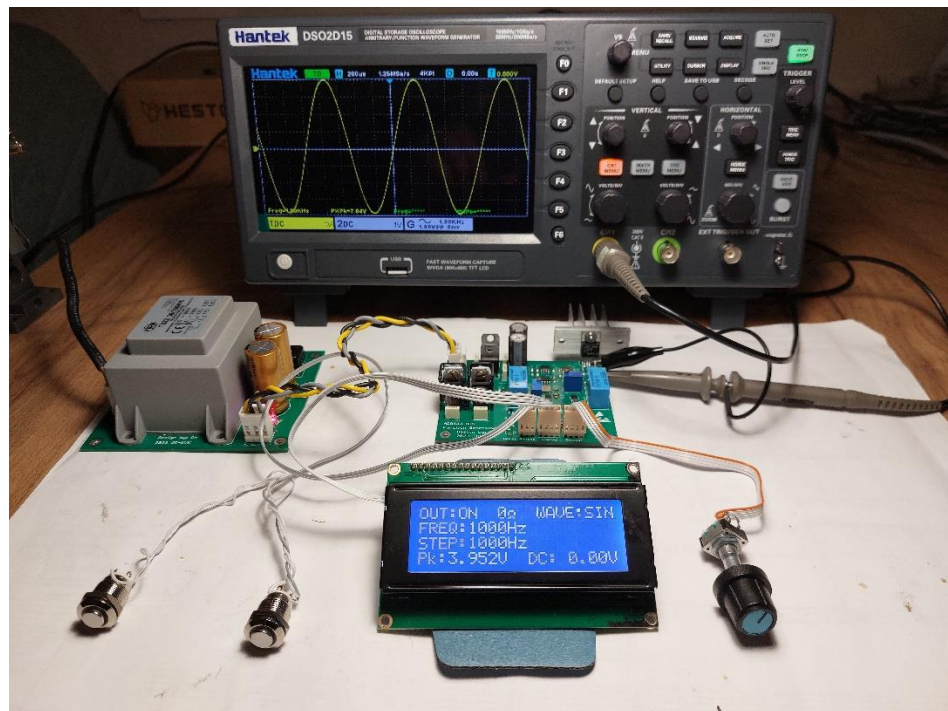
A szakdolgozat célja egy könnyen elkészíthető az otthoni mérésekhez jól használható függvénygenerátor bemutatása volt. A kapott mérési eredmények alapján a generátor teljesítette a felé támasztott mérési követelményeket. A legtöbb ebbe az árkategóriába eső kereskedelmi forgalomban kapható eszköz esetén csak a beállított frekvencia nagysága és a jelalak típusa kerül kijelzésre ez a mérések során zavaró lehet. Az általam megvalósított generátor esetében mind a kimeneti jel csúcs értéke, illetve az egyenfeszültségű szinteltolás mértéke is kijelzésre kerül így nem feltétlen szükséges oszcilloszkóp ezen értékek beállítására. Fontos megjegyezni, hogy a kijelzett amplitúdó és egyenszint eltolási értékek inkább tájékoztató jellegűek nem tökéletesen pontosak néhány tized voltos elcsúszás tapasztalható az oszcilloszkóp által mért és a generátor kijelzőjén megjelenített érték között. Ennek oka a digitális potméterek 8-bites felbontásúak ezért, ha precízebb beállításra van szükség akkor nagyobb bitszámú potméter alkalmazása javasolt és célszerű oszcilloszkópot használni az értékek beállításakor. Az elkészült generátor bedobozolása idő hiányában elmaradt így jelenleg csak a panel szinten történt a bemérés és a tesztelés. A ábra a tesztelés során alkalmazott mérési elrendezést szemlélteti. A tesztelés során rendellenes működés, illetve hiba nem lépett fel.



49. ábra: A tesztelés során alkalmazott mérési elrendezés [Saját kép]

23. SUMMARY

The aim of the thesis was to present an easy-to-make function generator that can be used well for home measurements. Based on the measurement results obtained, the generator fulfilled the measurement requirements imposed on it. In the case of most commercially available devices in this price category, only the magnitude of the set frequency and the type of waveform are displayed, which can be confusing during measurements. In the case of the generator I implemented, both the peak value of the output signal and the degree of the DC level shift are also displayed, so an oscilloscope is not absolutely necessary to set these values. It is important to note that the displayed amplitude and level shift values are more informative and not perfectly accurate. The reason for this is that the digital potentiometers have an 8-bit resolution, so if a more precise setting is required, it is recommended to use a potentiometer with a larger number of bits and it is advisable to use an oscilloscope when setting the values. Due to lack of time, the finished generator was not boxed, so the measurements and testing were currently only done at the panel level. The figure illustrates the measurement arrangement used during testing. No abnormal operation or error occurred during testing.



50. ábra: A tesztelés során alkalmazott mérési elrendezés [Saját kép]

24. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] L. a. Electronics, „How to Build a Simple Function Generator with an LM324 Op Amp Chip,” Learning about Electronics, 2018. [Online]. Available: <https://www.learningaboutelectronics.com/Articles/Function-generator-circuit.php>. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [2] U.Tietze-Ch.Shenk, Analóg és digitális áramkörök, 4. szerk., D. P. okl.villamosmérnök, Szerk., Budapest: Műszaki könyvkiadó, 1990, pp. 134-152.
- [3] H. Semiconductor, „ICL8038,” INTERSIL, 1998. [Online]. Available: <https://www.mit.edu/~6.331/icl8038data.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [4] DatasheetsPDF, „Exar Corporation,” Exar, 8 2 2008. [Online]. Available: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/285091/ExarCorporation/XR2206/1>. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [5] Wikipedia, „Közvetlen digitális szintézis,” 1 8 2023. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Direct_digital_synthesis. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [6] K. Imre, „Közvetlen digitális szintézis,” *Rádiótechnika*, pp. 36-51, 2021.
- [7] M. Christiano, „Everything You Need to Know About Direct Digital Synthesis,” All About Circuits, 20 11 2015. [Online]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/direct-digital-synthesis/>. [Hozzáférés dátuma: 9 11 2023].
- [8] Analog Devices, „AD9833 Datasheet,” Analog Devices, 2003. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9833.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 29 10 2023].
- [9] A. Devices, „AD9834 Datasheet,” Analog Devices, 2003. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9834.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 9 11 2023].
- [10] A. Devices, „AD9850 Datasheet,” Analog Devices, [Online]. Available:

- <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9850.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 9 11 2023].
- [11] A. Devices, „AD9954 Datasheet,” Analog Devices, 2003. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9954.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 9 11 2023].
- [12] A. Devices, „AD9959 Datasheet,” Analog Devices, 2005. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9959.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 9 11 2023].
- [13] A. Devices, „AD9910 Datasheet,” Analog Devices, 2007. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9910.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 9 11 2023].
- [14] A. Devices, „ADIsimDDS (Direct Digital Synthesis),” Analog Devices, 1995-2022. [Online]. Available: <https://tools.analog.com/en/simdds/?harmonicDB=-50&mult=1&part=AD9914&rso=111111&sclock=3.5G&tof=1.28G&useFilters=0>. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [15] J. List, „REVIEW: FG-100 DDS FUNCTION GENERATOR,” Hackaday, 17 5 2018. [Online]. Available: <https://hackaday.com/2018/05/17/review-fg-100-dds-function-generator/>. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [16] A. Electronic, „Ae20125 Manual,” Ascel Electronic, 2012. [Online]. Available: https://www.ascel.de/download/ae20125/ae20125_manual_en.pdf. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [17] JOY-iT, „JOY-iT JDS6600 DDS Signal Generator user manual,” JOY-iT, 6 1 2020. [Online]. Available: <https://joy-it.net/files/files/Produkte/JT-JD6600/JT-JDS6600-Manual-2020-02-07.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [18] A. Devices, „Why does a DDS need a reconstruction filter?,” Analog Devices, [Online]. Available: <https://ez.analog.com/dds/w/documents/3740/why-does-a-dds-need-a-reconstruction-filter>. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [19] D. B.-K. Gentile, „DDS-Based Clock Jitter Performance vs. DAC Reconstruction

- Filter Performance,” Analog Devices, 2006. [Online]. Available: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/351016224an_837.pdf. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [20] Analog Devices, „AD5290 Datasheet,” Analog Devices, 2005. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad5290.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [21] T. Instruments, „OPA810 Datasheet,” Texas Instruments, 7 2020. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/gpn/OPA810>. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [22] G. Hunter, „OP-Amps,” 2023.08.29. [Online]. Available: <https://blog.mbedded.ninja/electronics/components/op-amps/input-offset-voltage-trimming-inverting.svg>. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [23] A. Devices, „LT1206 Datasheet,” Analog Devices, 1993. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1206fb.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [24] M. Technology, „Atmega328p Datasheet,” Atmel, 2015. [Online]. Available: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [25] Arudino.CC, „Arduino as ISP and Arduino Bootloaders,” Arudino.CC, 31 10 2023. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/built-in-examples/arduino-isp/ArduinoISP>. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [26] TME, „INDEL TSZZ30/006M/5,” INDEL, [Online]. Available: https://www.tme.eu/en/details/tszz25_2x12v/pcb-transformers/indel/tszz30-006m-5/. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [27] Hestore, „RC2004A-BIW-CSX,” RAYSTAR, [Online]. Available: https://www.hestore.hu/prod_getfile.php?id=5397. [Hozzáférés dátuma: 7 11 2023].
- [28] F. d. Brabander, „LiquidCrystal I2C - Arduino Reference,” Arduino.CC, [Online]. Available:

<https://reference.arduino.cc/reference/en/libraries/liquidcrystal-i2c/>. [Hozzáféres dátuma: 7 11 2023].

- [29] E. M.-C. Slattery, „Ask The Application Engineer—33: All About Direct Digital Synthesis,” Analog Devices, 8 2005. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/all-about-direct-digital-synthesis.html>. [Hozzáféres dátuma: 8 11 2023].