



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Elektronikai Technológia Tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia Dolgozat

Piffkó Dániel

Arduino Nano mikrokontroller megvalósítása és
tesztelése biológiailag lebomló hordozón

Konzulensek:

Dr. Berényi Richárd (BME ETT)

Dr. Géczy Attila (BME ETT)

Budapest, 2023

1. Tartalomjegyzék:

1. Tartalomjegyzék	2
2. Absztrakt	4
3. Abstract	5
4. Bevezetés	6
4.1. Fenntarthatósági probléma	6
4.2. Miért pont az Arduino?	7
4.3. Zöld technológia ma	8
5. A tanulmányozott hordozó	10
6. A vizsgálat terve	12
6.1. Célja	12
6.2. Lépések vázlatpontokban	12
7. Bill of Materials (alkatrészlista)	13
8. Layout terv optimalizálása	14
9. Legyártott FR4-es áramkörök áttekintése, szerelése	16
10. FR4 alapú mikrokontroller funkcionális tesztje	17
10.1. Bootloader égetése	17
10.2. Példaprogram futtatása	19
11. Áramkör létrehozása lebomló hordozón	20
11.1. Kezdeti nehézségek és megállapítások	20
11.2. Lebomló áramkörök optikai és elektromos vizsgálata	21
11.3. Rövidzárok lokalizálása, javításuk	23
11.4. Lebomló áramkörök forraszthatósági tesztje	24
11.5. Hőprofil	25
11.6. Forrasztás utáni tapasztalatok	26
12. Lenolaj eltávolításának lehetőségei	27
13. Lebomló áramkörök szerelése	28

14. Eredmények a szerelt lebomló áramkörök esetében	29
14.1. BIO_1-es sorszámú panel	29
14.2. BIO_2-es sorszámú panel	31
14.3. BIO_3-es sorszámú panel	32
15. A szerelés során szerzett tapasztalatok összesítve	32
16. Biológiailag lebomló hordozók vizsgálata HAST kamrában	33
16.1. A vizsgálat menete	33
16.2. A HAST vizsgálat eredményei	34
17. Három pontos hajlítási teszt	36
18. Hordozók összehasonlítása mintavételezési program által	37
19. Fenntarthatósági kérdések	38
20. Összegzés	39
21. Szakirodalom, források	39
22. Köszönetnyilvánítás	41
23. Függelék	42
23.1. Általános tesztprogram kódja	42
23.2. MATLAB: FFT, spektrum ábrázolás	42
23.3. Mintavevő program kódja	43
23.4. Spektrum elemzés képei	44

2. Absztrakt

Modern civilizációnk elengedhetetlen részei az elektronikai eszközök, melyekkel minden nap találkozunk akár közvetlen, vagy közvetett módon. Sajnos az eszközeink élettartama véges, így elhasználódásuk, tönkremenetelük után a bennük található áramkörök és egyéb elektronikai alkatrészek veszélyes hulladékká válnak. A 2022-es év végére, közel 59.4 millió tonna elektronikai hulladék keletkezett világszerte, és az eddigi trend, valamint az előrejelzések szerint ez a mennyiség évről-évre 2 millió tonnával növekszik. Belátható, hogy ebben a formában az elektronikai ipar nem fenntartható hosszútávon.

Kutatásomban arra keresem a választ, hogy megvalósítható-e működő áramkör egy olyan, természetes anyagból készült hordozón, melynek felépítése nagyon hasonlít a széles körben alkalmazott FR-4 -es hordozóéhoz. A hordozó alapja politejsav (PLA), mely főleg a lebomló csomagolóanyagok, valamint a 3D nyomtatás terén terjedt el, a laminátum vázát pedig lenszálak alkotják. A létrehozott és vizsgált áramkör egy Arduino® Nano mikrokontroller, melyre azért esett a választás, mert világszerte széles körben ismert és használt eszköz, valamint programozása is egyszerű. Kapcsolási rajza és layoutja open-source, így könnyen szerkeszthetőek az áramkör azon részei, melyeket optimalizálni kell a lebomló hordozón megvalósuló gyárthatóság szempontjából.

Dolgozatomban kitérek arra, hogy milyen nehézségek merültek fel a működő áramkör elkészítése, valamint szerelése folyamán. Milyen különbségek figyelhetők meg az FR-4 -es, valamint a lebomló hordozón létrehozott mikrokontrollerek között. Különböző elektromos és mechanikai tesztekkel hasonlítom össze a mikrokontrollereket, mint például analóg jelek kiírásának és beolvasásának pontossága, vagy a gyorsított stressz teszttel (HAST) szembeni ellenállóságuk.

3. Abstract

Electronic devices are an indispensable part of our modern civilisation, and we encounter them every day, either directly or indirectly. Unfortunately, our devices have a finite lifespan, which means that when they wear out or break down, the circuits and other electronic components they contain become hazardous waste. By the end of the year 2022, nearly 59.4 million tonnes of electronic waste generated worldwide, and the trend and projections show that this amount will increase by 2 million tonnes every year. It is clear that the electronics industry is not sustainable in the long term at this rate.

In my research, I am looking to answer the question: is it feasible to build a working circuit on a substrate made of natural materials with a structure very similar to the widely used FR-4 substrate? This natural substrate is based on polylactic acid (PLA), which is mainly used in degradable packaging and 3D printing materials, and the laminate carrier is made of flax fibres. The created and tested circuit is an Arduino® Nano microcontroller, chosen because it is a well-known and widely used device worldwide and easy to program. Its schematic and layout are open-source, making it easy to edit the parts of the circuit that need to be optimised for manufacturability on a degradable substrate.

In my thesis, I will discuss the difficulties experienced during the construction and assembly of the working circuit. What differences can be observed between microcontrollers built on FR-4 and those which are created on a degradable substrate. I will compare the microcontrollers using various electrical and mechanical tests, such as the accuracy of writing and reading analogue signals, or their resistance to the highly accelerated stress test (HAST).

4. Bevezetés

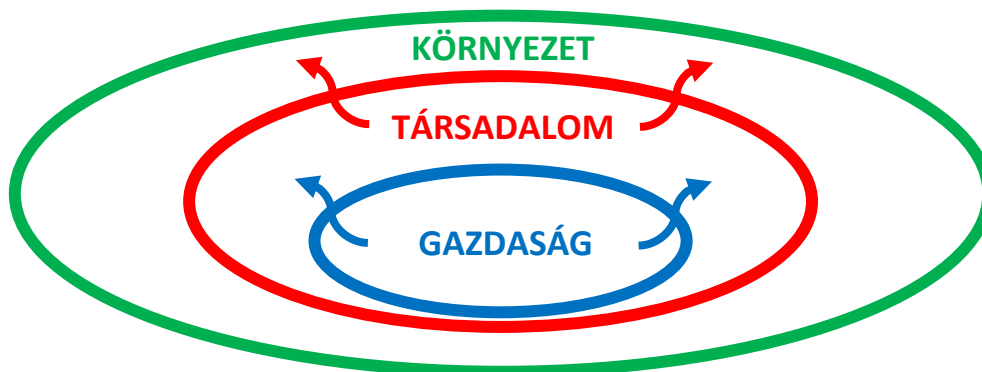
4.1. Fenntarthatósági probléma

Modern és továbbra is fejlődő világunk elengedhetetlen elemei az elektronikai eszközök. Mára az élet szinte minden szegmensében jelen vannak. Az általános célú áramkörök gyártásának relatív olcsósága, valamint a legkülönbözőbb eszközök 'okosításával' járó trend mind azt eredményezi, hogy az ezeken alapuló és az ezeket kiszolgáló áramkörök száma folyamatosan nő.

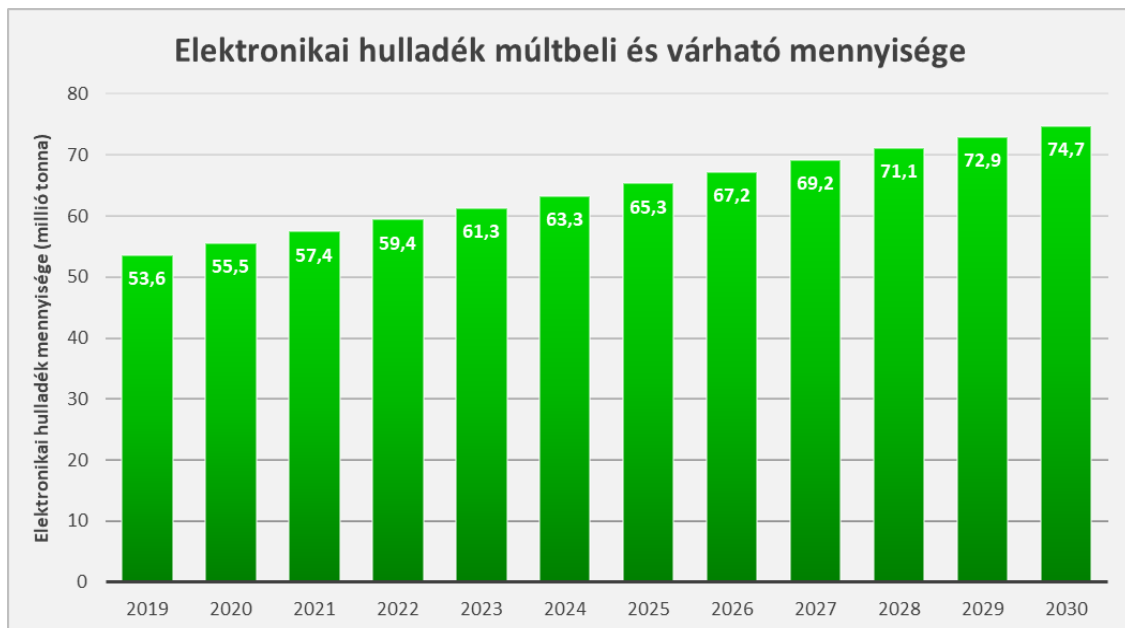
A probléma viszont, hogy mint semmilyen termék, ezen áramkörök élettartama sem korlátlan idejű. Életciklusuk végén, a legtöbb elektronikus eszköz veszélyes hulladékként végzi, melynek feldolgozása világszinten problémát jelent. Az előző év (2022) végére az éves e-hulladék mennyisége elérte az 59.4 millió tonnát. Előrejelzések szerint az elektronikai hulladékok mennyisége 2 millió tonnával nő évente.[1][2] A kontinensek közül Ázsia állítja elő legnagyobb mennyiségben az elektronikai hulladékot, míg Európában a legnagyobb az egy főre jutó e-hulladék mennyisége.

Ennek a hatalmas hulladékmennyiségnek megközelítőleg 10%-a kerül, többnyire illegális módon, szegény, fejlődő országokba, mint például Ghána vagy Pakisztán.[5] Ezek az országok jellemzően nem rendelkeznek értékes nyersanyagforrásokkal, így többek között az e-hulladékból visszanyerhető értékes fémeket forgatják vissza a kereskedelembé.[4] Azonban az erősen mérgező anyagokkal való érintkezés, valamint a kor- és szakszerűtlen munkafolyamatok miatt az ezzel foglalkozó emberek évtizedekkel rövidíthetik meg életüket.[6] Emberek milliói élnek életvitelszerűen az ezen tevékenységekre visszavezethető súlyosan szennyezett környezetben.

Az 1987-ben megjelent ENSZ által közzétett Brundtland-jelentés meghatározása szerint: „A fenntartható fejlődés olyan fejlődés, amely kielégíti a jelen szükségleteit anélkül, hogy veszélyeztetné a jövő nemzedékek esélyét arra, hogy ők is kielégíthessék szükségleteiket”. [3] A szigorú fenntarthatósági modell szerint a gazdasági tőke növelése, csak a nem növelhető természeti tőke rovására történhet, mely a gazdasági és társadalmi halmazt is bennfoglalja, hiszen ezek is a környezetünk részét képezik, annak részhalmazai. A gazdaság és a társadalom működése ezen halmazon kívül értelmezhetetlen. Belátható, hogy a jelenlegi elektronikai ipar hosszú távon nem fenntartható, hiszen nyersanyagforrásaink, valamint hulladék tárolási kapacitásaink akármennyire is nagyok, de **végesek**.



4.1.1. ábra: A szigorú fenntarthatósági modell



4.1.2. ábra: Az elektronikai hulladék mennyisége körülbelül 2 millió tonnával nő évente [2]

4.2. Miért pont az Arduino?

Az Arduino egy 2008-ban elindított elektronikai cég. Elsődleges profiljuk mikrokontrollerek felhasználóbarát kivitelezése volt. Rövid idővel a megalakulása után, már több százezer boardot, áramkört értékesítettek. 2010-ben bocsájtották ki az Uno nevű, talán egyik legközkedveltebb boardot, mely 2021-ben elérte a 10.000.000 eladott darabot.

Mindezek ellenére, ha figyelembe vesszük az éves keletkező e-hulladék mennyiségét, megállapíthatjuk, hogy párszázezer 1-2 grammos áramkör, csekély részét teszi ki a több 10 millió tonna hulladéknak. Erről az oldalról megközelítve, nem sokat számítana, ha az Arduino boardjait lebomló hordozókra cserélnénk.

Mi szól tehát mégis a termék mellett egy ilyen kutatásnál?

Elsősorban, az, hogy az Arduino boardok felhasználása nagy százalékban edukációs jellegű. Rendelkeznek professzionális, ipari környezetben is használható kártyákkal, de az egyszerűbb, könnyen felhasználható boardjaik sokkal ismertebbek a világ különböző részein. Úgy gondolom, hogy amennyiben sikerülne kivitelezni egy ilyen edukációs célú áramkört, az jelentős előrelépést jelentene lebomló áramkörök elterjedésében, hiszen egy világszerte ismert termékről van szó, mely elsősorban azokhoz jut el, akik az elektronika világa iránt egyébként is érdeklődnek. Továbbá az is előny lehet, hogy ezeknek az áramköröknek, mint elterjedőben lévő technológia, még nem kellene szigorú ipari követelményeknek megfelelnie. További előny, hogy az open source elvek nagymértékben megkönnyítik a zöld áramkörök megtervezését, az Arduino tervek elérhetősége miatt alkalmazható alapkutatáshoz az ő alkalmazott tervük – nincs szükség tehát komolyabb áramköri tervezésre, lehet a technológia fejlesztésére összpontosítani.

Megemlítendő még, hogy az Arduino jelenleg is törekszik a környezetbarát megoldások alkalmazására és hirdetésére. Boardjain szerepel az -Impatto Zero®- felirat, amely egy olasz kezdeményezésű környezetvédő együttműködés, ami olyan cégeket tartalmaz, akik törekednek a széndioxid semlegesség megtartására.

4.3. Zöld technológia ma:

A legújabb cikkeken megállapították (*Khrustalev et al., 2022*) [7], hogy a keletkező WPCB (waste PCB, azaz hulladék PCB) mintegy 70 tömegszázalékát (wt%) az üvegszállal erősített epoxi kompozitok teszik ki, amelyek nehezen feldolgozhatók, és károsak a környezetre, ha az e-hulladék halmokban maradnak. A fémek hidrometallurgiai, mechanikai vagy piromechanikai kezeléssel nyerhetők vissza a kompozitokból - ez szintén szintén problémás a környezet terhelésének szempontjából (*Ryan et al., 2023*) [8],

A fenntartható elektronika fejlesztése többnyire a politejsav (PLA) szubsztrátokon alapul, ezt a felhasználást az utóbbi években több szempontból is vizsgálják (*Schramm et al., 2012, [9] Mattana et al., 2015 [10], Henning et al., 2020, [11] Hong et al., 2021*) [12]. A legtöbb tanulmányból azonban kimaradt az égésgátlás és a szálerősítés, ami megbízhatóbb szerelvényekhez vezet.

Larguech et al. (2021) [13] termikus és dielektromos elemzést végzett PLA/PBS (polibutilén-szukcinát) keverék mátrixon juta szálerősítés után. Alacsony hőmérsékleten a dielektromos permittivitás javult a keverékmátrix megerősítése után. *Kumar és Gupta (2021) [14]* tanulmánya a klasszikus FR4-et hasonlította össze juta és epoxi, szizál és epoxi, valamint kender és epoxi alapú potenciális kompozit anyagokkal. Ez a munka az adott kompozitok mechanikai és elektromos tulajdonságait vizsgálta. A munka eredményei azt mutatták, hogy az epoxi és a juta, a szizál vagy a kender kombinációja szinte ugyanazokkal a tulajdonságokkal rendelkezik, mint a klasszikus FR4. Azonban a szerzők az égésgátlás témakörét nem érintették, amely a természetes alapú szálak esetében kritikus aspektus.

Yedrissov és munkatársai (2022) [15] szintén egy újszerű módszert javasoltak a környezetre veszélyes polimer kötőanyagok helyett PLA-alapú, biológiailag lebomló polimerek használatára. A tanulmányban bemutatták az újrahasznosított és megújuló anyagokból történő PCB-gyártást, ahol a folyamat során különböző alkatrészeket is visszagyűjtöttek. *Khrustalev et al. (2022) [7]* egy új kompozit anyagot javasolt a NYÁK gyártásához, újrahasznosítási módszerrel, hogy a PLA lapokból származó alkatrészeket visszanyerhessék. Az alkalmazott eljárás során sikeresen leválasztották az elektronikus alkatrészeket, a rézsávokat, az üvegszálakat és a politejsavat. Az üvegszál alkalmazása azonban gyenge pont, amíg az újrahasznosítás során külön kezelést igényel, és nem komposztálható. *Bharath et al. (2023) [16]* banánszövet beépítését javasolta erősítésként, azonban munkájuk nem mutatott tényleges alkalmazási esettanulmányokat.

Sudheshwar és társai (2023, és 2023) [17][18], papír alapú elektronikát javasoltak, mint jó alternatívát a hulladék és a fenntarthatóság szempontjából; azonban munkájuk nem a hagyományos SMT technológiákra összpontosít, inkább a papír alapú, additív vezető alapú elektronika alkalmazhatóságára és hatására összpontosítanak.

Az esettanulmányokra áttérve, *Kovács és társai (2015) [19]* PLA és CA alapú RFID-kártyákat gyártottak a tanszéken különböző méretekben, sikeres megoldásként. Emellett bemutattak egy CA alapú MP3-lejátszót is. Ezekben a tanszéki munkákban a kollégák bemutatták a sikeres felületszerelés lehetőségét, bár ekkor még hiányzott a szálerősítés, a forrasztási maszk alkalmazhatósága, és a bemutatott szerelvények nagyon érzékenyek voltak a hagyományos reflow (újraömlesztéses forrasztási) hőmérsékletekre, még Sn-Bi alapú forrasztóanyag-ötvözetekkel, csökkentett olvadáspont (138 °C) mellett is.

Li és munkatársai (2021) [20] bemutatták a tranziens áramkörök alkalmazását poli(vinil-alkohol) (PVA) szubsztrátokon a szórakoztató elektronika területén. Egy teljesen biológiailag lebomló okosórát terveztek és gyártottak, az eszköz áramköri lapját öntő/préselő géppel gyártották, míg a tok

3D nyomtatással készült és PVA alapú. A készülék szerves fénykibocsátó kijelzőt (OLED), mikrokontrollert, gyorsulásmérő modult és oximétert tartalmaz, az alkatrészeket biorezerválható nanokompozittal kötötték össze. Az előállítás és jellemzés mellett bemutatásra került a víz felhasználásával történő feloldási folyamat is. Az újrahasznosítás kevesebb mint 30 órát vesz igénybe, miközben a csomag és az elektronikus alkatrészek részben feloldódtak. Hátránya azonban, hogy a technológia nem kompatibilis az intelligens elektronikában használt jelenlegi NYÁK- és szerelési technológiákkal (általában SMT), és az általános minőség és megbízhatóság kérdéses a szubsztrát átmeneti jellege és a vízben történő feloldás miatt. Bár a kutatás lenyűgöző, az alkalmazhatóság korlátozott, még a javasolt felhasználási esetben is.

Arroyos és társai (2022) [21] egy számítógépes egér prototípust gyártottak, amely egy biológiailag lebomló NYÁK-ból, egy kompozitálható PVA tokból és korlátozott elektronikai alkatrészkeletből állt. A Soluboard PCB-ket és a PVA tokot vízben feloldották, és a szétszerelés után számos alkatrész újra felhasználható volt. Az oldhatóság azonban kereskedelmi oldalról is inkább csak szemfényvesztésnek tűnik jelenleg, mint a követelményrendszernek megfelelő alkalmazhatóságnak.

Túlzás lenne azt állítani, hogy ma egyáltalán nincsenek törekvések a zöld áramkörökre való átállásra, ugyanakkor ezek még csupán kísérleti stádiumban vannak. Meglátásom szerint a problémát az okozza, hogy ha javítani szeretnénk környezetvédelmi szempontból az áramkör egy-egy tulajdonságát, akkor sérül annak megbízhatósága a mindennapi felhasználás során.

Például, ha az áramkör szétszerelését szeretnénk megkönnyíteni, azzal kevésbé lesz mechanikailag szilárd és tartós. Ezzel máris jelentősen csökkentettük a felhasználhatóságát. Hasonlóan, ha lebomló anyagot szeretnénk alkalmazni az áramkör létrehozása során, számolnunk kell azzal, hogy az áramkör nem lehet kitéve, vagy bizonyos mértékig ellen kell állnia különböző környezeti tényezőknek (víz, pára, magas hőmérséklet), valamint, hogy megbízható működésének ideje jelentősen csökkenhet.

Fontosnak tartom egy olyan anyagnak a megtalálását, amely általánosan tudja helyettesíteni alkalmazási területtől függetlenül a napjainkban leginkább elterjedt FR4-es hordozót. Amennyiben ez nem teljesülne, úgy a különböző felhasználási területű áramkörök, különböző hordozókon tudnának csak megvalósulni, amely a gyártás egyszerűsége szempontjából vetne fel problémákat.

Több innovatív irányban is elindultak kutatások és születtek kísérleti eszközök, melyek az áramkörök környezetbaráttá tételére kerestek optimális megoldást. Sok különböző ötletet láttam, melyek alapján a következő fő problémákat tudtam összegyűjteni:

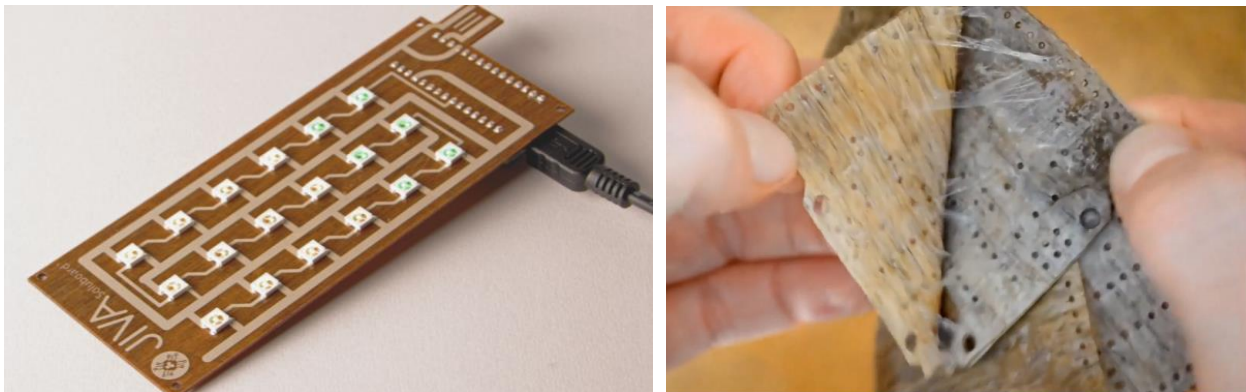
Könnyen beinduló lebomlás, szerkezetmódosulás: Több kísérleti hordozó esetében látható olyan videó, képanyag, melyekben az adott hordozón megvalósított áramkört vízbe helyezve másodperceken belül megindult a hordozó delaminációja vagy oldódása. Más esetekben a hőmérséklet emelkedés hatására deformálódott jelentős mértékben az áramkör. Ezeknek a hordozóknak hátránya, hogy alkalmazásuk során különös figyelmet kell fordítani arra, hogy a működésük szempontjából rájuk veszélyes környezeti hatásoktól minél inkább elszigetelve maradjanak.

Mechanikailag gyenge szerkezet, rossz vezetőréteg tapadás: A vezetőréteg megfelelő tapadása a hordozóhoz nagyon fontos szempont, hiszen a vezetőanyag leválása szakadásokhoz, alkatrészek leeséséhez, így akár funkcionális használhatatlansághoz is vezethet. A nem megfelelő mechanikai ellenállóképesség több okra is visszavezethető. Előfordulhat, tipikusan természetes eredetű, például rostokból laminált hordozók esetében, hogy maga a laminátum anyaga szakad ki egy fizikai behatást elszenvedett alkatrészrel együtt. Más esetekben a vezetőréteg és a hordozó közötti

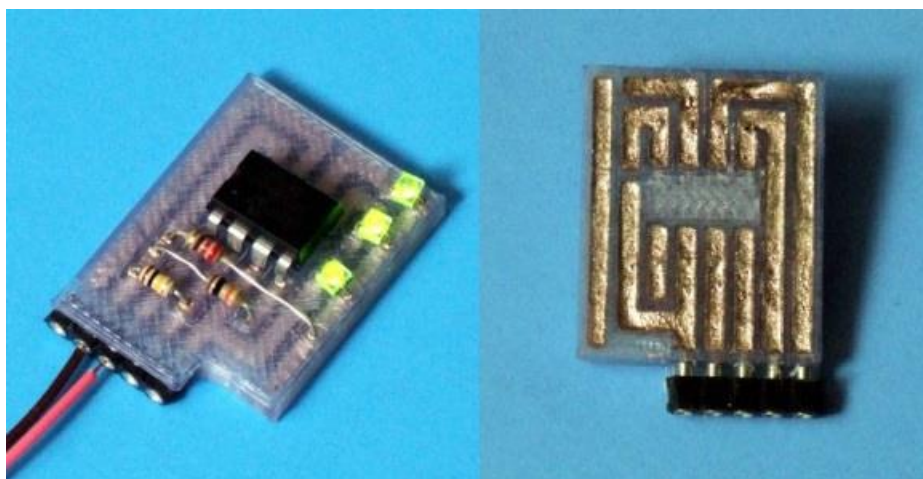
tapadás nem bizonyult elég erősnek. Ennek oka lehet az additív rajzolatkialakítási technológia, mely szemben a szubtraktív eljárással, gyengébb tapadást eredményez, vagy a hordozó felületének túlzott egyenletessége.

Bevált és jelenleg alkalmazott technológiával nem létrehozható: Úgy gondolom, hogy nagy hátrányt jelenthet a környezetvédelem, gyárthatóság és ebből kifolyólag a gyors elterjedés szempontjából, ha a jövőbeli környezetbarát áramkörök nem lennének a jelenleg alkalmazott technológiával legyárthatóak, és elkészítésükhöz új technológiát kellene kifejleszteni, valamint új gyárat, gyártósorokat építeni. Az általam interneten fellelt kísérleti áramkörök mindegyike egyéni technológiával készült.

Egyszerű funkciók megvalósítása: A széles vezetőrajzolat, mely ellensúlyozza a rossz tapadóképességet, vagy a kézzel készítés miatt kevés alkatrész került felhelyezésre az általam talált áramkörök jelentős részénél. Jelenleg képesek vagyunk a hagyományos áramkörökön nagy alkatrészsűrűséget, ebből eredően nagy funkciószűrűséget elérni, magas gyártási kihozatali arány mellett.



4.3.1. – 4.3.2. ábra: JIVA Soluboard®, melyről vízbe helyezve könnyen leszedhetők az alkatrészek, valamint megindul a rostokból készült hordozó delaminációja. [PIC_1][PIC_2]



4.3.3. ábra: PLA alapú, forrasztásmentes, vezető festékkel bevont áramkör.[PIC_3]

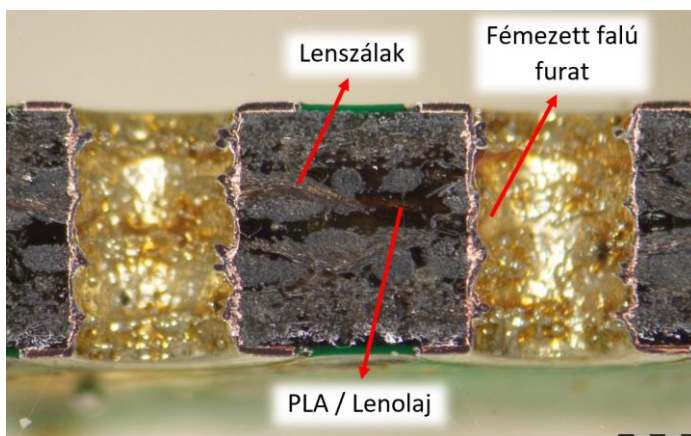
5. A tanulmányozott hordozó:

Az általam felhasználni kívánt hordozó a BME-ETT, valamint a Meshlin Composites Zrt. együttműködésének eredményeként született meg. Az alkalmazott hordozó, valamint az elterjedt FR4-es kompozit szerkezeti felépítése lényegében megegyezik, csupán a felhasznált anyagokban térnek el. Az FR4-es hordozó egy üvegszál erősítésű epoxigyanta kompozit, mely különböző égésgátló anyagokkal

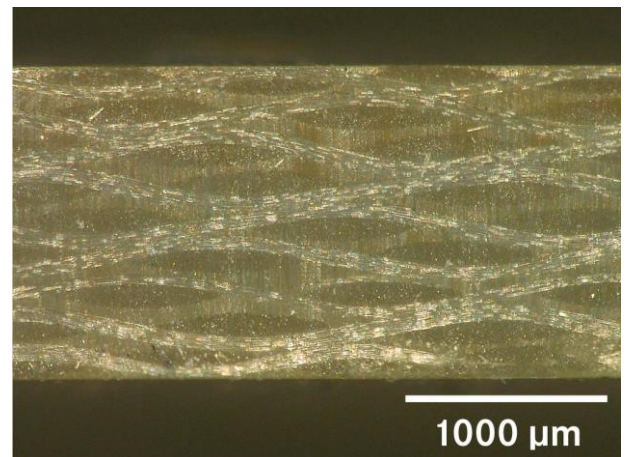
adalékolt. A felhasznált lebomló hordozó estén az üvegszálak lenolaj szövet, valamint az epoxigyantát politejsav (röviden PLA helyettesíti), továbbá természetes eredetű égésgátló anyagokkal tették biztonságossá a hordozót a tűzzel szemben.

Különbség ugyanakkor, hogy a környezetbarát hordozó lenolajat is tartalmaz. Ennek oka, hogy az FR4-es kompozit egyik előnyös tulajdonsága, hogy alacsony a vízfelvételi kapacitása. Ez is garantálja, hogy az ezen hordozón megvalósított áramkörök elektronikai tulajdonságai hosszú távon stabilak maradjanak. Mivel a lenolajból előállított szövet sűrűsége kisebb, mint az üvegszálakból készítetté, továbbá maguk a növényi rostok is képesek a víz felvételére, szemben az üvegszálakkal, a lebomló kompozit vízfelvétele kedvezőtlenül nagy lenne. Ez nem csupán az elektronikai paramétereket befolyásolná az áramkörök használata során, de a víz jelenléte a hordozóban a kelleténél korábban beindíthatja bomlás folyamatát. Az elképzelések szerint erre nyújthatott volna jó megoldást a lenolaj, mely térfogatkitöltő szerepével, valamint apoláris molekulaszervezetével jelentősen csökkentette volna a lebomló hordozó vízfelvételét. Sajnos a lenolaj jelenléte negatív módon befolyásolta, jelentősen megnehezítette a megfelelően működő áramkörök létrehozását. A későbbiekben erre részletesen is kitérek.

A 5.1. ábrán a lebomló kompozit keresztmetszeti csiszolatát láthatjuk, melyen jól megfigyelhető a hordozó szerkezete, valamint az egyes alkalmazott anyagok. Az 5.3. ábrán a lenolajból készült szövet mikroszkópos képe figyelhető meg.



5.1. ábra: Keresztmetszeti csiszolat a lebomló hordozóról



5.2. ábra: Keresztmetszeti kép egy FR4-es hordozóról [PIC_4]



5.3. ábra: Mikroszkópos kép a lenolajból készített szövetről

6. A vizsgálat terve:

6.1. Célja:

Fő célkitűzésem volt, hogy kutatásom végeredményeként sikerüljön az Arduino cég Nano elnevezésű, funkcionálisan jól működő mikrokontrolleres modult megvalósítanom a fentebb bemutatott biológiailag lebomló hordozón. A modul létrehozása során gyűjtöttem és értelmeztem a különböző tapasztalatokat, és az azokból levont következtetéseket alkalmaztam az egyes áramkörök elkészítése során.

6.2. Lépések vázlatpontokban:

Az alábbiakban vázlatpontokba rendezve összegyűjtöttem a lebomló mikrokontroller létrehozásához vezető lépéseket. Természetesen később bővebben is kitérek az egyes állomásokra.

- A Nano mikrokontroller layoutjának elemzése, optimalizálása, alkatrészek megrendelése:

Szerencsére a kiválasztott mikrokontroller schematic és layout rajzolata nyílt forrású, így a weboldalról könnyen letölthető (<https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>) és a megfelelő szoftverrel (EAGLE) könnyen átszerkeszthető, optimalizálható.

- Referencia mikrokontroller létrehozása FR4-es hordozón:

Az FR4-en létrehozott áramkörre több okból is szükség volt. Sikeres létrehozása esetén igazolható, hogy az optimalizált layout helyes működést biztosít, és hogy lehetséges az áramkör létrehozása a BME V1-es épületében található UniPCB Kft. által. Továbbá a lebomló hordozón elkészített áramkörök összehasonlíthatóak ezzel, a hagyományos módon létrehozott áramkörrel.

-Az áramkör létrehozása lebomló hordozón, szerelése:

A tanulmányozott lebomló hordozón még nem készült ilyen komplexitású és bonyolultságú áramkör. A létrehozás menetének legtöbb tapasztalata új jellegű és az azokból levont következtetések hasznosak a létrehozás lépéseinek javítása, optimalizálása szempontjából.

-Elkészült modul funkcionális tesztelése:

A kitűzött cél eléréséhez teljesülnie kell, hogy a mikrokontroller funkcionálisan helyesen működik-e. Ehhez szükséges, hogy a megírt programok feltölthetőek legyenek a mikrokontrollerre, valamint, hogy azok az elvártaknak megfelelően le is fussanak.

-Egyéb tesztek elvégzése:

HAST ciklusnak vettem alá 3 darab FR4-es, valamint 3 darab környezetbarát szerelmetlen hordozót, arra keresve a választ, hogy milyen eltérések mutatkoznak a különböző típusú hordozók között, amennyiben szélsőséges körülményeknek tesszük ki őket. Esetleges eltéréseket keresve, program általi elektromos tesztelésnek is alávettem a hagyományos és lebomló kompozitanyagokon létrehozott kontrollereket.

7. Bill of Materials (alkatrészlista):

Fontos szempont volt a megrendelendő alkatrészek meghatározásakor és összeírásakor, hogy a lehető legkevesebb számú elektronikai üzletből megvásárolhatóak legyenek, valamint amennyiben helyettesítő terméket kell használni, annak paraméterei megegyezzenek az eredetileg tervezett alkatrészével. Öt darab lebomló és egy darab FR4-es referenciahordozó szereléséhez elegendő alkatrész került megrendelésre.

	Típus	Alkatrész	Darabszám	Méret (mm)	SMD size	Packaging	Megjegyzés	Link
TOP	uP	ATmega328P	1	5 x 5		VQFN32	32M1-A	link 641. oldal
	Resonator	16MHz resonator	1	3.2 x 1.3			CSTCE16M	link
	Connector	USB-MINI-B_2	1				SMT	link 16. oldal
	Reset	Pushbutton	1	4 x 3		SMD_157SW		link
	LED	CHIPLED	2		0805		GREEN	link
	LED	CHIPLED	1		0805		RED	link
	LED	CHIPLED	1		0805		YELLOW	link
	ICSP	Tüskesor	1	2x3 (2.54)				link
	PINs	Tüskesor	2	1x15 (2.54)				link
BOTTOM	USB-UART	FT232RL	1	10.2 x 5.3		SSOP28		link 31. oldal
	Resistor 4ch	Resistor 4x1k	2	3.2 x 1.6		CAY16-F4		link 2. oldal
	Regulator	(LM1117IMPX-5.0)	1			SOT223		link 35. oldal
	Fuse	MF-FSMF050X	1		0603			link
	Rectifier	SS1P3L	1	2.54 x 4		DO220AAL		link
	Capacitor	4.7uF_16V	2		1206			link
	Capacitor	1uF	3		0603			link
	Capacitor	100nF	4		0603			link

7.1. ábra: Az alkatrészek megnevezése, darabszámuk és paramétereik táblázata.

	Típus	Alkatrész	Webshop link	Mennyiség 5+1 db board esetén	Cég	Megjegyzés	Ár/db (Ft)	Ár/board (Ft)
TOP	uP	ATmega328P	webshop	6	Hestore	Helyettesítő termék: ATMEGA168-20MU	3343	3343
	Resonator	16MHz resonator	webshop	6	Farnell	Helyettesítő termék: CSTNE16M0V530000R0	94	94
	Connector	USB-MINI-B_2	webshop	6	Farnell		519	519
	Reset	Pushbutton	webshop	6	Farnell		376	376
	LED	CHIPLED	webshop	12	Hestore		30	60
	LED	CHIPLED	webshop	6	Hestore		77	77
	LED	CHIPLED	webshop	6	Hestore		46	46
	ICSP	Tüskesor	webshop	6	Hestore		38	38
	PINs	Tüskesor	webshop	12	Hestore		32	64
BOTTOM	USB-UART	FT232RL	webshop	6	Hestore		2725	2725
	Resistor 4ch	Resistor 4x1k	webshop	12	Farnell		28	56
	Regulator	(LM1117IMPX-5.0)	webshop	6	Hestore	Helyettesítő termék: AMS1117-5.0-CF	67	67
	Fuse	MF-FSMF050X	webshop	6	Farnell		271	271
	Rectifier	SS1P3L	webshop	6	Farnell	Helyettesítő termék: SS1P4L	193	193
	Capacitor	4.7uF_16V	webshop	12	Hestore		42	84
	Capacitor	1uF	webshop	18	Hestore		17	51
	Capacitor	100nF	webshop	24	Hestore		10	40

7.2. ábra: Az alkatrészek megnevezése megrendelendő darabszámuk és beszerzési helyeik táblázata.

8. Layout terv optimalizálása:

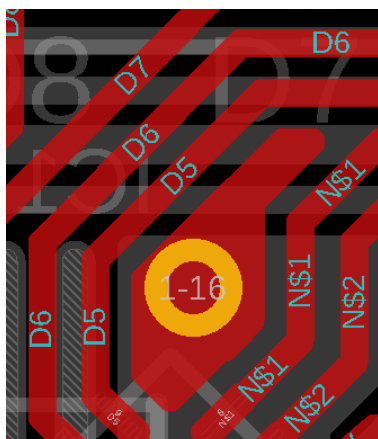
Az Arduino mikrokontroller megvalósításának nagy előnye, hogy az áramkörök nyílt forrásúak, így megtervezését nem kell az alapoktól kezdeni. A layout terv a cég honlapjáról egyszerűen letölthető és szerkeszthető.

Az optimalizálás fő szempontja volt, hogy a hordozó hátrányos tulajdonságai a lehető legkisebb mértékben befolyásolhassák az áramkör működését és élettartamát. Továbbá fontos szempont volt, hogy az áramkör a lehető legegyszerűbb kivitelezésű legyen. Ne tartalmazzon felesleges elemeket, ugyanakkor megbízhatósága lehetőleg maximális legyen az elérhető kereteken belül.

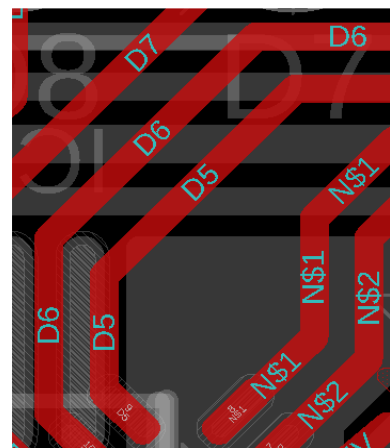
Ezen megfontolások alapján az áramkör alábbi tervezési jellemzőit korrigáltam:

-Kis területű, funkció nélküli rézfelületek mellőzése:

Az eredeti layout tervben előfordultak olyan, kis területű, viákkal földpontra kötött rézfelületek, melyek hőelvezető képessége méretükből fakadóan csekély, valamint földponti potenciáljuk sem volt kihasználva az áramkör működése szempontjából. Az áramkör ezen részeit feleslegesnek ítélt meg, hiszen mellőzésükkel a vezetékvezés számára szabadítható fel felület, továbbá furatok elkészítése is megspórolható.



8.1. ábra: Kis területű rézfelület viával.



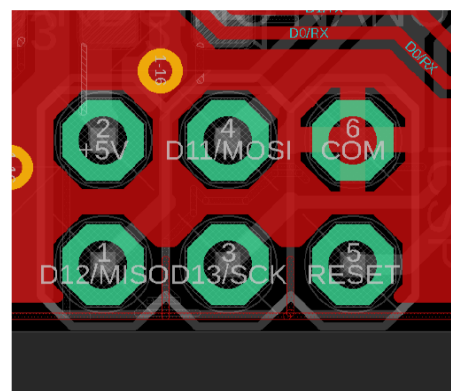
8.2. ábra: 'Rézsziget' és via eltávolítása

-Szélekre kifutó rézfelület korrigálása:

Az eredeti tervben a rézrajzolat sok helyen 0.2mm-re ért véget a hordozó határaitól. A mikrokontroller használata során, illetve a hordozó esetleges kopásával ezeken a részekon könnyebben beindulhat a réz delaminálódása.



8.3. ábra: Hordozó széléhez túl közel nyúló rézrajzolat



8.4. ábra: A hordozó széle és a rézrajzolat közötti távolság megnövelve

-Vezetékek szélességének-távolságának korrigálása:

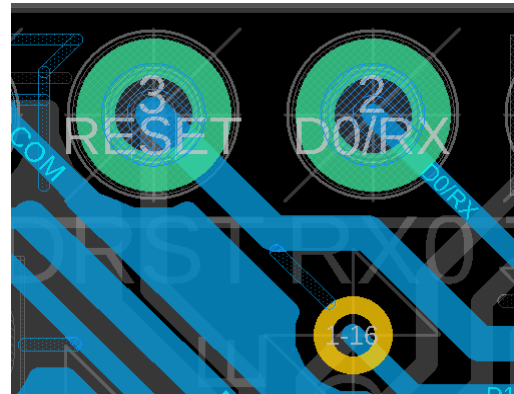
Az áttervezés után a minimális csíkszélesség 10mil lett, továbbá a minimális vezeték távolság sem csökken 8mil alá. A tápvezetéseket igyekeztem a lehető legszélesebbre tervezni, hogy az ellenállásuk, így a hődissipáció is a lehető legkisebb legyen.

-Furat-vezeték csatlakozások javítása:

Az eredeti tervben a kivezetésekhez vagy viákhoz csatlakozó vezeték több helyen nem derékszögben érkeztek be a furatok fémezéséhez. A csatlakozások megbízhatósága akkor maximális, ha az egyes vezetékek derékszögben csatlakoznak a furatok fémezéséhez.



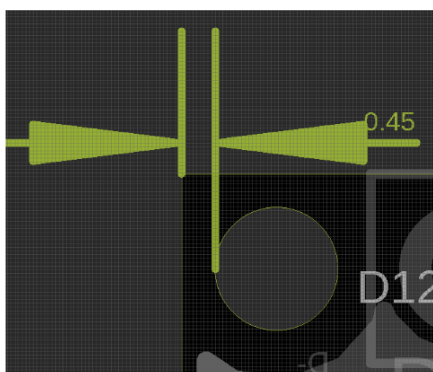
8.5. ábra: A RESET furathoz nem derékszögben csatlakozó vezeték



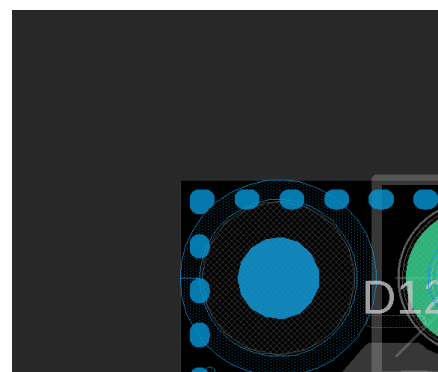
8.6. ábra: Korrigált furat-vezeték csatlakozás

-Sarok furatok mellőzése:

A hordozó négy sarokpontján elhelyeztek egy-egy furatot, melyek a jelenlegi kísérlet szempontjából feleslegesek. A furatok miatt a hordozó legkeskenyebb szélessége ezeken a pontokon 0.45mm, ezzel jelentősen csökkentve a panel mechanikai strapabírását ezeken a helyeken. A furatok eltávolításának előnye, hogy ezeken a pontokon elhelyezhetővé váltak a fiduciális jelek, így szintén több hely szabadult fel az áramkör más területein a vezetékvezetés számára.



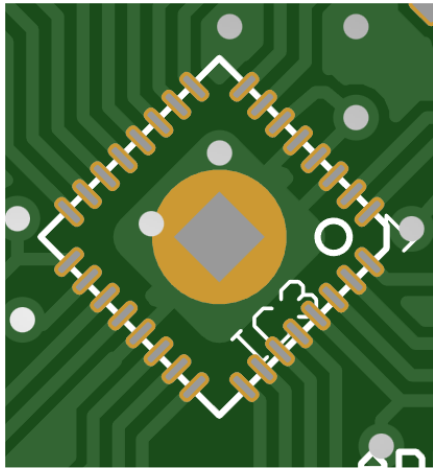
8.7. ábra: A hordozó széléhez túl közel lévő, funkcióval nem rendelkező furat.



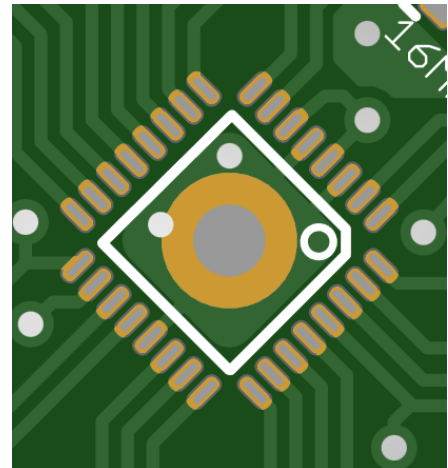
8.8. ábra: Furat eltávolítása, fiduciális jel elhelyezése.

-Szitanyomtatott réteg szerkesztése:

Némely alkatrészek esetén előfordult, hogy az elhelyezést segítő ábrák a szitanyomtatás során nyitott, forrasztandó rézfelületre kerültek volna rossz pozícionálás esetén (újszerű hordozón ez előfordulhat), így ezek átszerkesztése szükséges volt, hogy ne okozzanak problémákat a forrasztás során. Több ábra esetén pontosítani kellett a pozíciót, hogy egyértelműen mutassák az alkatrészek helyeit a hordozón.



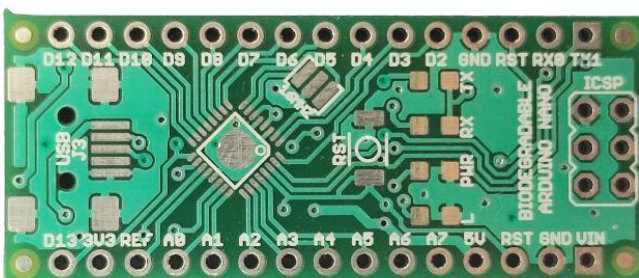
8.9. ábra: Forrasztási felületeken átmenő alkatrész segédábra



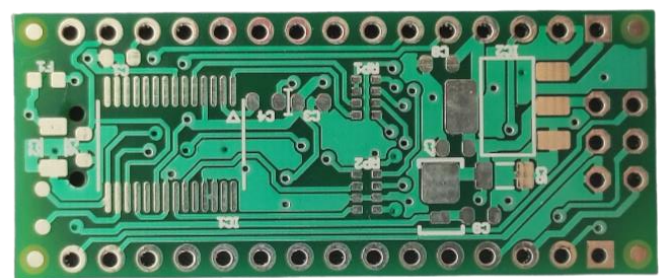
8.10. ábra: Segédábra újrajrjolása

9. Legyártott FR4-es áramkörök áttekintése, szerelése

A hordozókat a UniPCB Kft. gyártotta le. Az elkészült áramköröket optikai és elektronikai eszközökkel is teszteltem. Azt vizsgáltam, hogy a mikrokontroller leendő kivezetését jelentő furatok között tapasztalható-e rövidzár, vagy az azonos jelű kivezetések esetében szakadás. Az elkészült 12 darab áramkör egyikénél sem találtam olyan rendellenességet, amely veszélyeztethette volna a mikrokontroller működését.

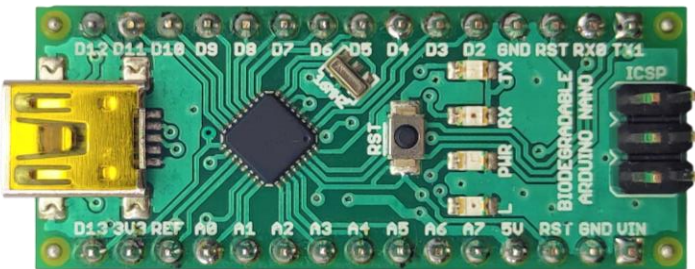


9.1. ábra: FR4-en létrehozott áramkör TOP oldala

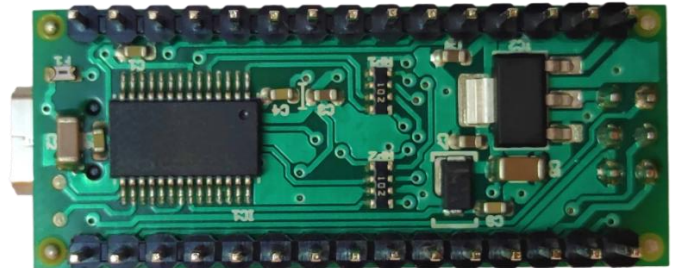


9.2. ábra: FR4-en létrehozott áramkör BOTTOM oldala

Az FR4-es hordozók közül egy darab került szerelésre. Az alkatrészek mikroszkóp alatt, kézzel kerültek beültetésre. Az újraömlesztéses forrasztáshoz szükséges ólommentes (SAC) forrasztáspta lézervágott proto-stencil alkalmazásával került fel a hordozó felületére. A forrasztás két lépésben valósult meg, elsőként a ATmega mikrokontroller IC-t tartalmazó oldala lett beforrasztva az áramkörnek, ezt követően pedig az átellenes oldal. Az újraömlesztéses forrasztást követően a mikrokontroller kivezetéseiként funkcionáló tűskesorok kézzel lettek beforrasztva. A forrasztásokat követő mikroszkóp alatti ellenőrzés során nem volt fellelhető sem rövidzár, sem szakadás, sem bármilyen egyéb forrasztási hiba, amely javításra szorult volna.



9.3. ábra: FR4-en létrehozott szerelt áramkör TOP oldala



9.4. ábra: FR4-en létrehozott szerelt áramkör BOTTOM oldala

10. FR4 alapú mikrokontroller funkcionális tesztje:

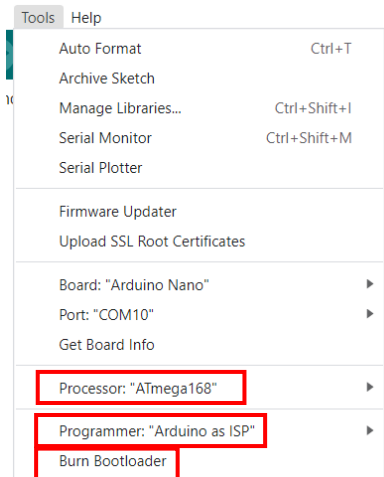
10.1. Bootloader égetése:

Az Arduino mikrokontrollerek ismerté válásának és elterjedésüknek egyik fő oka, hogy használatuk nagyon letisztult és egyszerű. A programunk futtatásához csupán egy, az *ArduinoIDE* programmal rendelkező számítógépre, egy USB A – USB mini B típusú csatlakozókkal rendelkező kábelre, és magára a mikrokontrollerre van szükségünk. A programozhatósághoz a mikrokontrollernek azonban már rendelkeznie kell egy úgynevezett bootloader programmal. Ha az adott mikrokontrollert már összeszerelten szerezzük be valamelyik forgalmazótól, akkor már egy bootloaderrel ellátott mikrokontrollert kapunk kézhez, amely készen áll a programunk feltöltésére és futtatására. Mivel az általam elkészített mikrokontroller nem rendelkezik még a bootloader programmal, így ennek „beégetése” is rám hárul.

A bootloader az a fix háttérkód, mely egyfajta vezérlőként irányítja a kontrollert. Ezáltal tudjuk egyszerűen, az *ArduinoIDE* felületéről felprogramozni az eszközt, ez felelős új program feltöltésekor az előző utasítások törléséért, valamint a programkód szekvenciális végrehajtásért és más egyéb háttérvezérlő folyamatokért.

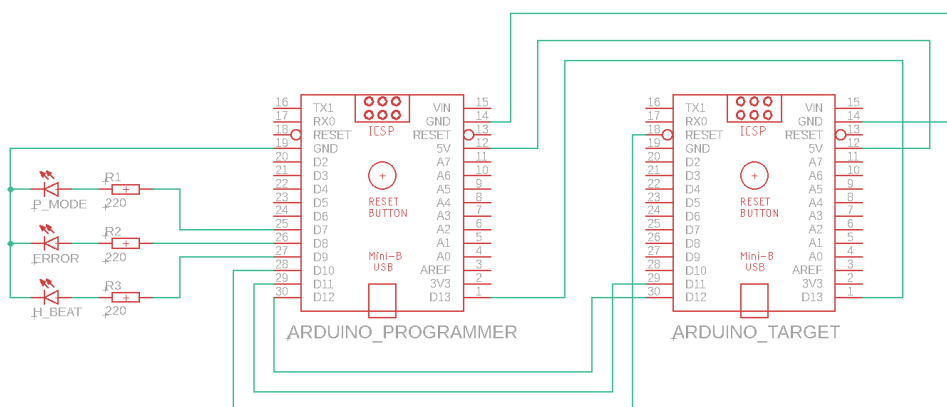
A bootloader feltöltésének több módja létezik, de mindenképpen szükséges egy programozó eszköz, mely egyaránt képes kommunikálni a számítógépünkkel és ISP kommunikációs protokollt használva a programozandó mikrokontrollerünkkel. Talán a legegyszerűbb módja a bootloader felégetésének, ha egy másik, bootloaderrel már rendelkező Arduino mikrokontrollert használunk fel programozó eszközként. Mivel már rendelkeztem működő kontrollerral, így ezt használtam fel az újonnan elkészült mikrokontroller programozó eszközeként.

A felprogramozás első lépése, hogy a programozó áramkörre feltöltjük az ArduinoIDE által felajánlott, előre megírt programot. Ezt követően a programozó és a bootloader nélküli board között kialakítjuk a megfelelő összeköttetéseket a programkód kommentjében leírtak alapján. Kiválasztjuk a cél mikrokontroller processzorának típusát, továbbá az „Arduino as ISP” menüponttal definiáljuk a programozó eszközt. A „Burn Bootloader” gomb megnyomásával megtörténik a beégetés. Ezt követően már szabadon programozható az új eszköz.



10.1.1. ábra: A bootloader égetéséhez szükséges menüpontok.

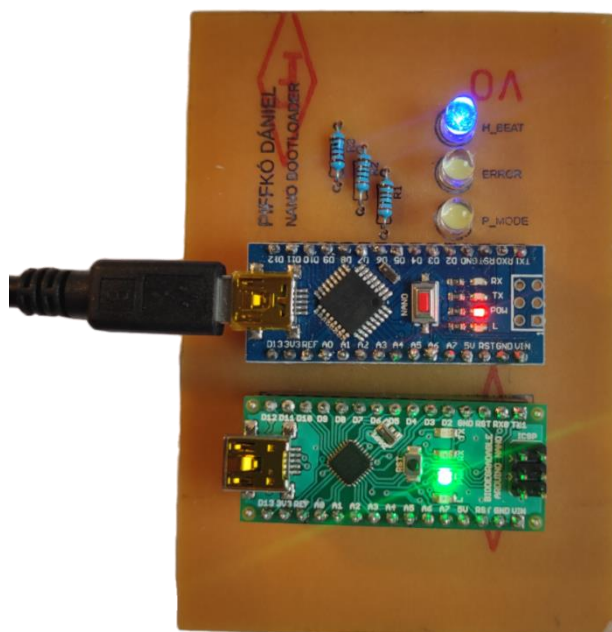
Mivel több kontroller elkészítésével számoltam, a bootloader beégetés folyamatának egyszerűsítésére házi módszerekkel készítettem egy egyszerű áramkört, amely összekapcsolja a mikrokontrollerek megfelelő lábait, továbbá tartalmaz 3 darab állapot visszajelző LED-et. E áramkör használatának előnyei, hogy a megfelelő összeköttetések sokkal gyorsabban kialakíthatóak, hiszen a mikrokontrollereket csak a kijelölt foglalatokba kell beilleszteni, továbbá emiatt az összeköttetések helyességére is csupán az áramkör létrehozásakor kell figyelni. Tapasztalatom továbbá, hogy jumper vezetékeket használva a bootloader égetése sokszor volt sikertelen az esetlegesen gyengén kontaktáló vagy szakadással rendelkező vezetékek miatt. Az elkészített áramkör ezekre a problémára is megoldást jelentett. Az áramkör rajzolatát fényes felületű fotópapír és lézernyomtató használatával juttattam egy egyrétegű FR4-es hordozó felületére, a felesleges rezet pedig sósav és hidrogénperoxid keverékével marattam le.



10.1.2. ábra: A bootloader programozó áramkör kapcsolási rajza.



10.1.3. ábra: Az „otthoni módszerekkel” készített bootloader programozó áramkör.

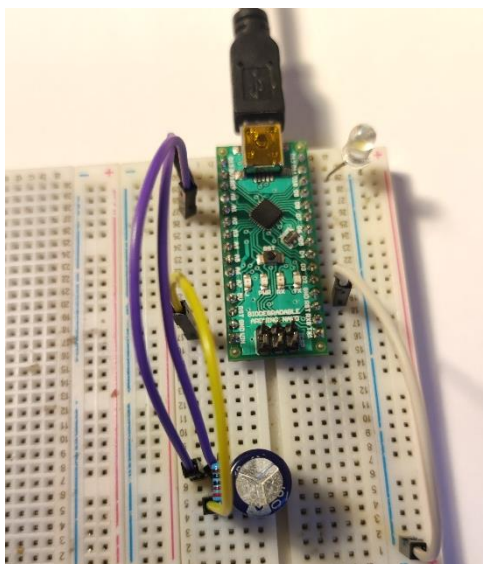


10.1.4. ábra: A bootloader programozó áramkör használat közben.

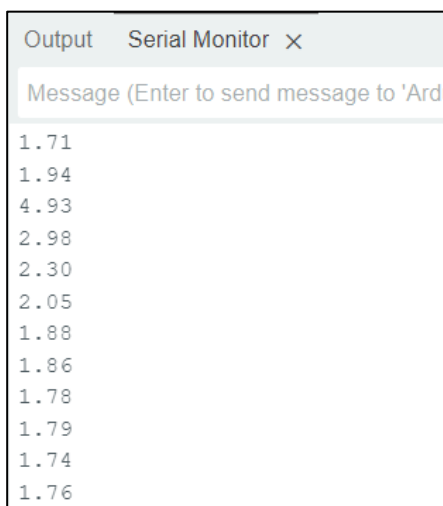
10.2. Példaprogram futtatása:

A mikrokontrollerek működésének legnagyobb bizonyítéka, ha a programok feltölthetőek és futtathatóak rajtuk. Olyan tesztprogram megírása volt a cél, amely a mikrokontroller legfontosabb tulajdonságaira épül és azokat kihasználja. Ezek az általam meghatározott funkciók a digitális és analóg feszültség kiadás, analóg feszültség beolvasás és az USB-n történő soros kommunikáció voltak. Az analóg kimenet aztán később összehasonlítható a két hordozó esetében.

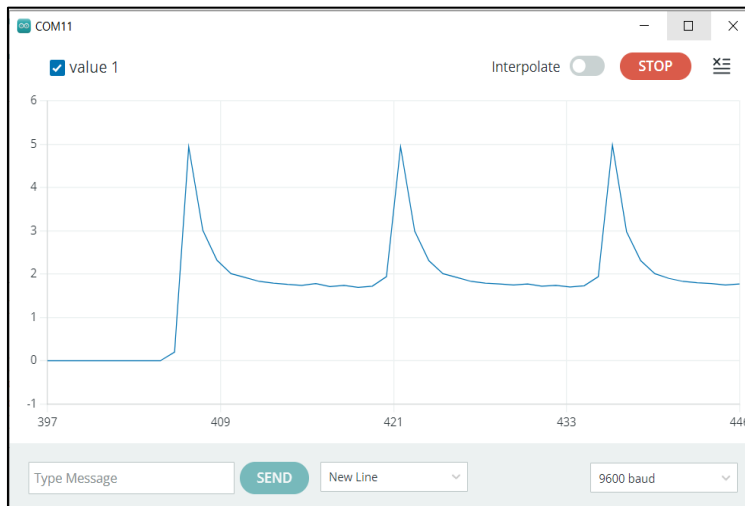
A program másodpercenként egyszer beolvasta egy, az adott bemenetére kötött 1000uF-os kondenzátor feszültségét, amely egy ellenálláson keresztül veszítette el lassan a töltöttségét, emiatt idővel csökkent a feszültsége. 14 másodpercenként egy kimenetű konfigurált lábbal 1 másodpercen át a mikrokontroller újratöltötte a kondenzátort. PWM kompatibilis kimeneti lábra kötöttem egy LED-et. A kimenet mindig a kondenzátoron mért feszültség értékét vette fel, így a LED fényereje fokozatosan csökkent a kondenzátor lassú kisülésével. A mért feszültséget a mikrokontroller az USB-n keresztül is szolgáltatotta, így a számítógépen is követhető volt a feszültség alakulása.



10.2.1. ábra: A tesztprogramhoz összerakott áramkör. A LED erős fényereje rontott volna a kép minőségen, így kikapcsolt állapotban történt a fotó készítése



10.2.2. ábra: A soros porton másodpercenként küldött, mért feszültségértékek



10.2.3. ábra: A mért feszültségek grafikus ábrázolása; tengelyek értékei: X: idő [s], Y feszültség [V]

11. Áramkör létrehozása lebomló hordozón:

11.1. Kezdeti nehézségek és megállapítások:

Kutatásom idején különböző, előre nem látott problémák miatt körülbelül két hónapig nem tudtam hozzájutni a lebomló laminátumokhoz. Itt tartom fontosnak megemlíteni, hogy a csúszás miatt a gyártó cég jelezte, hogy hordozók nem estek át a gyártás utolsó részét jelentő szárítási ciklus teljes egészén, melynek elsődleges oka a hordozóban található, már említett lenolaj kiszáritása lett volna. Azért tartom fontosnak ennek megemlítését, mert véleményem szerint az áramkör elkészítésének következő fázisában is gondot jelentett a nem megfelelően kiszáritott lenolaj a nedveskémiai folyamatok során.

A lebomló kompozit, melynek mindkét oldalára rézfólia került laminálásra, egy megközelítőleg 30x40 cm-es lemez formájában került legyártásra. Mikroszkóppal megvizsgálva a hordozó felületét,

látható, hogy a rézréteg enyhén inhomogén. Kisméretű mélyedések és kitüremkedések voltak megfigyelhetőek. Ennek oka a hordozó szerkezetében keresendő. A merevebb, egyenletes szálátmérőjű üvegszálból homogénebb, sűrűbb és egyenletesebb felületű szövet alakítható ki, mint a lebomló hordozóban található lágyabb, egyenetlen átmérőjű lenszálakból. A lenszövet egyenetlensége jól megfigyelhető a korábban már beillesztett 5.1.-dik ábrán. A PLA-val való kitöltés ellenére tapasztalhatóak lesznek felületi egyenetlenségek, melyek a rézfólia laminálásával sem szűnnek meg. Továbbá a lebomló kompozit felületén megfigyelhetőek voltak kisméretű elkenődött lenolajfoltok. A hordozón található lenolaj halmazállapota jellegre szilárdnak volt mondható.

Ahogy az FR4-es referencia áramköröket is, ezúttal is a UniPCB Kft. gyártott le 12 darab áramkört, a lebontható hordozón. A cég munkatársai már a gyártás folyamán jelezték, hogy a lenolajat nem sikerült eltávolítani a hordozó részfelületéről, de igyekeztek a lemez lehető legtisztább részét kiválasztani az áramkörök gyártásához.

11.2. Lebontható áramkörök optikai és elektromos vizsgálata:

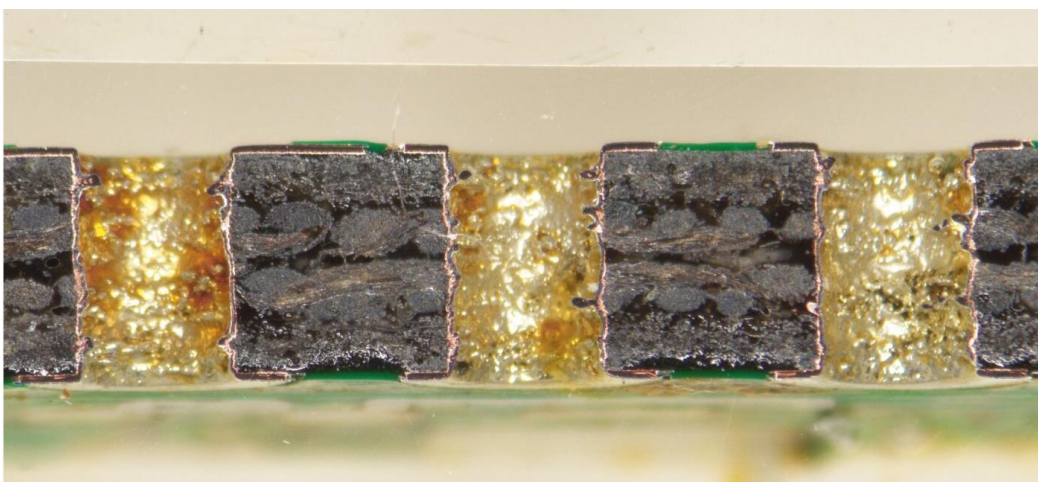
A gyártás nedveskémiai folyamatainak végeztével a 12 áramkör nagyrésznél a felülete erősen szennyezetté vált a lenolajtól. Sok esetben a forrasztásfelületek teljes felületét (11.2.1. ábra) és a furatok, viák teljes térfogatát kitöltötte a szennyeződés (11.2.2. ábra). Egyértelmű volt, hogy a felületek tisztítása nélkül az elkészült áramkörök túlnyomó része nem lesz felhasználható.



11.2.1. ábra: Lenolajjal erősen szennyezett forrasztási felület



11.2.2. ábra: Lenolajjal kitöltött fémezett furat



11.2.3. ábra: Egyenetlen, inhomogén falú, de kötés szempontból jól kialakult furatfémezés.

A BME V1-es épületének laboratóriumában található EFI-Labs cég munkatársainak segítségével 2 hordozó felhasználásával készültek keresztmetszeti csiszolatok. Ezeken szintén megfigyelhető az olykor teljes furatot kitöltő lenolaj, továbbá a furatfémezés nagymértékben egyenetlen felülete, amely jelenség csökkenti a furatok belső átmérőjét. Ennek oka, hogy a furatok elkészítése során a CNC fúrófej nem képes a lágy lenszálak mindegyikét elvágni. Ezt követően az árammentes furatfémezés során a visszamaradó „rojtos” lenszálakkal teli furat falára kerül leválasztásra a fémréteg. Ez a jelenség szembeűnő a 11.2.3.ábrán bemutatott keresztmetszeti csiszolaton. Ennek ellenére az eredmények örvendeteseek, az irodalomban nem jellemeztek még hasonló lemezt ilyen módon, ténylegesen kialakult furatfémezéssel.

Az elkészült lebomló áramköröket nem csupán mikroszkóppal, optikai úton, hanem elektromos szempontból is vizsgáltam egy multiméter szakadásvizsgáló funkciójával. Szekvenciálisan vizsgáltam meg bármely két kimenet közötti rövidzárat vagy szakadást. A 10 darab vizsgált áramkör közül 8 esetén találtam rövidzárat olyan kimenetek esetében, melyek között a layout terv szerint nem kellett volna fémes kontaktust tapasztalnom. Ezek felénél, tehát 4 áramkör esetében ráadásul egynél több rövidzárat találtam. A rövidzárak pontos lokációja optikai mikroszkóppal nem volt meghatározható, még azoknál az áramköröknél sem, melyeknél a kontaktáló kivezetéseket ismerve feltételezhető volt, hogy a rövidzár csak az áramkör egy kisméretű felületén helyezkedik el, ahol az adott kivezetések rézrajzolata egymás mellett található. Nemkíánt szakadást a kivezetések között sehol, semelyik áramkör esetében nem tapasztaltam.

A sorszámmal ellátott áramkörökön elvégzett vizsgálataim eredményét táblázatba rendezve szedtem össze. A „*Megfigyelés*” elnevezésű oszlopban mindenképpen szerepelt információ a hordozó tisztaságával kapcsolatosan, a részlegesen szennyezett hordozók esetében a szennyeződés helyét is megjelöltem. A „*Rövidzár (pin-pin)*” című oszlopban pedig külön-külön sorba rendeztem az adott sorszámú áramkörnél egymással fémesen kontaktáló kimenetek nevét. Az utolsó oszlopban színkóddal jelöltem, hogy egy áramkörből mekkora valószínűséggel készíthető működő mikrokontroller. Ezt annak függvényében határoztam meg, hogy az adott áramkör felülete mekkora mértékben és a funkcionális működése szempontjából milyen fontosságú területe szennyezett. Ezalatt azt értem, hogy amennyiben például egy tápfeszültségen található szűrűkondenzátor forrasztási felülete szennyezett, az sokkal kisebb probléma mintha az USB vezérlő IC, vagy maga az ATmega mikrokontroller IC forrasztási felületei vannak lenolajjal elfedve. Továbbá a színkód függött attól is, hogy az áramkör mely kivezetései között található rövidzár. Például kisebb baj, ha a mikrokontroller két, a felprogramozás szempontjából szükségtelen I/O kivezetés között található a rövidzár, mint például a táp és a földpont között. Természetesen bizonyos I/O lábaknál sem megengedhető a rövidzár. A D13, D12, D11, D10-es lábak fontos kommunikációs szerepet töltenek be a bootloader égetése során.

A 11.2.4-es ábra kihozatala 10%-os (módosításokkal, utókezeléssel 50%), ami megfelel az alapkutató ezen szakaszában elvárt technológiai készültségtől.

Az alkalmazott színkódok jelentései:

ZÖLD: Minimális beavatkozással vagy anélkül, a többi áramkörhöz képest legnagyobb valószínűséggel megvalósítható belőle egy működő mikrokontroller.

NARANCSSÁRGA: Mindenképpen szükséges valamilyen mértékű beavatkozás, hogy megvalósítható legyen belőle működő egy mikrokontroller.

PIROS: Nagymértékű beavatkozás szükséges ahhoz, hogy az áramkörből működő mikrokontroller készülhessen.

Sorszám	Megfigyelés	Rövidzár (pin-pin)	Működhet?
1	Erősen szennyezett felület	D11-D12	✖
	D13, A3 furat szennyeződéssel kitöltött	GND-RST-A4-A5-A6-A7-5V	
2	Tiszta felület	GND-D13	✔
3	Foltokban szennyezett (MCU, ISCP, Regulator)	-	✔
4	Erősen szennyezett felület	-	✔
	D12, D8 furat szennyeződéssel kitöltött		
5	Tiszta felület	GND-RST	✔
6	Foltokban szennyezett (MCU thermo pad)	GND-D3-D11-D13	✖
		D9-D10	
7	Tiszta felület	GND-RX0-VIN	✖
		A5-A6-A7	
8	Foltokban szennyezett (L led, MCU thermo pad)	A3-A6	✔
9	Erősen szennyezett felület	GND-RST	✖
	USB pad emelkedett		
10	Tiszta felület	GND-RST-D11-D13	✖

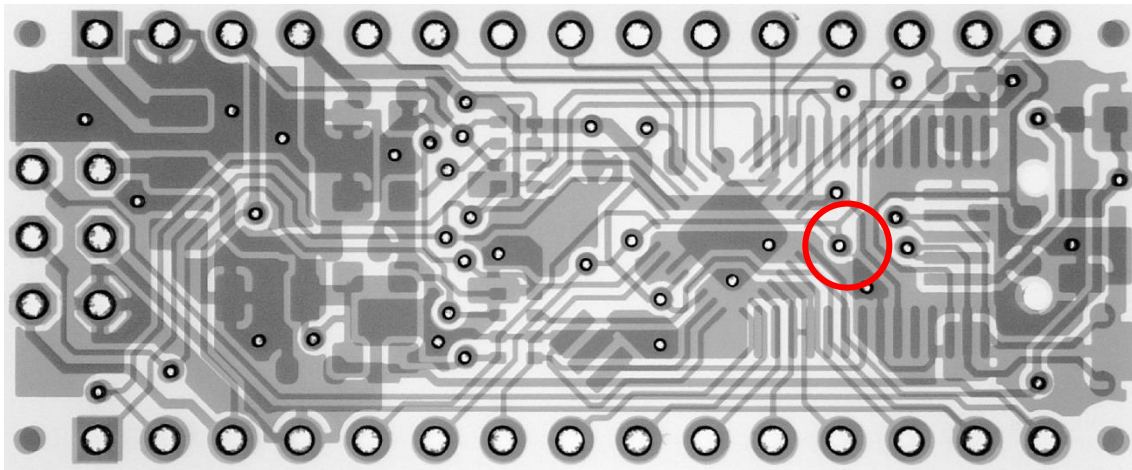
11.2.4. ábra: Táblázatba rendezett megfigyeléseim az elkészült lebomló hordozóról

11.3. Rövidzárok lokalizálása, javításuk:

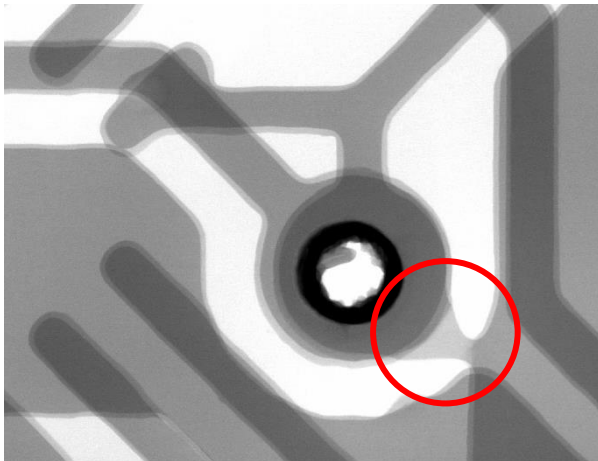
Ahogy említettem, a rövidzárok optikai mikroszkóppal nem voltak fellelhetőek, még azokban az esetekben sem, amikor kikövetkeztethető volt, hogy melyik vezeték mely (néhány milliméteres) szakaszán kell lennie a rendellenes kontaktusnak. A rövidzárok megtalálására röntgenmikroszkópos vizsgálatnak (Dage Xidat berendezés) vettem alá az áramköröket. 6 darab áramkör lett ilyen módon vizsgálva. Minden áramkör nagy nagyításban lett végigpásztázva. A fellelt rövidzárakról dokumentációs és az utójavítást segítő céllal fotók készültek.

A vizsgálatot követően a beazonosított rövidzárakat először áram áthajtásával próbáltam megoldani. Az elképzelés az volt, hogy ha nagy áramot vezetek át kis keresztmetszetű vezetőkön, mint például egy rövidzár, akkor a leadott elektromos teljesítménnyel kiegészíthető lenne a nemkívánt fémes kontaktus. Sajnos az általam talált legnagyobb teljesítményű tápegység maximális áramerőssége 3A volt, amely nem bizonyult elégnek a rövidzár kiegészítéséhez. Ezt kövözően a rövidzárakat mechanikailag szüntettem meg. A beavatkozást követően már nem volt semelyik, addig kontaktáló kivezetés között fémes kapcsolat tapasztalható.

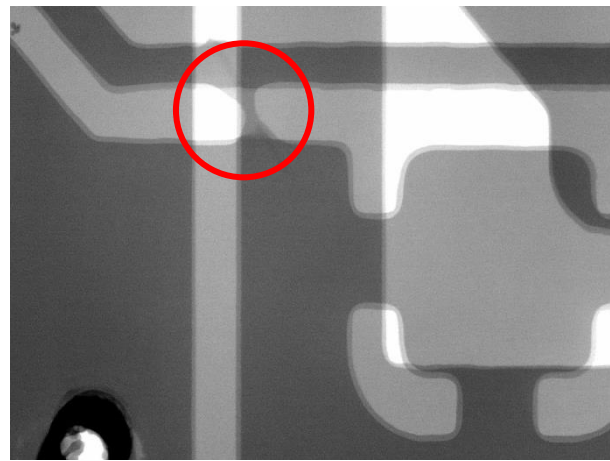
Kezdeti magyarázatom a rövidzárak meglétére a réz marási idejének rövidege volt. Ebben az esetben azonban azt kellene tapasztalnom nagy valószínűséggel, hogy a röntgenképeken látható rövidzárakat alkotó fém csíkok nem rendelkeznek nagy kontraszttal, hiszen a réz vastagsága nem ugrásszerűen változna, hanem fokozatos vastagsággal tűnnének fel a szigetelő felületen. Továbbá a megvizsgált hordozóknál egy-, maximum két rövidzár volt található. Ha ezek a marás idejének rövidegéből származnának, csekély valószínűséggel tapasztalnánk ennyire kevés és ilyen jól körülrajzolható rövidzár helyeket, amíg az áramkör többi pontján a különböző vezetékek rézrajzolata jól elkülönülnek egymástól és nagy kontrasztarányúak a vezető-szigetelő határfelületek. A felsorolt indokok miatt véleményem szerint a tapasztalható rövidzárak oka az áramkörök elkészítése előtti kismértékű, de a felületet szennyező lenolaj. Az apró foltokban jelenlévő lenolaj a réz maratása során maszkként funkcionálhatott, így az olaj alatt lévő részfelület kisebb mértékben érintkezhetett a maró folyadékkal, ezért lassabban, vagy egyáltalán nem maródott le a hordozóról.



11.3.1. ábra: Röntgenkép egy rövidzárat tartalmazó áramkőről.



11.3.2. ábra: Rövidzár a D13-as kivezetés és a GND között



11.3.3. ábra: Rövidzár az RST és GND között

11.4. Lebomló áramkörök forraszthatósági tesztje:

Hasonlóan az FR4-es hordozón létrehozott mikrokontroller esetében, a pasztát most is lézervágott proto-stencil segítségével juttattam az áramkörre. Ugyanakkor a tanszéki laboratóriumban, a lebomló hordozón végzett korábbi tesztekéből tudható volt, hogy e hordozó esetében a forrasztási hőmérséklet nem emelhető 200°C fölé. Egyértelmű volt, hogy ebben az esetben nem lesz alkalmas a SAC forraszpaszta, hiszen annak olvadási hőmérséklete megközelítőleg 220°C körül van, ami bőven meghaladja a maximálisan beállítható hőmérsékletet a lebomló hordozó esetében.

A választás egy bizmutot tartalmazó pasztára esett (Sn42/Bi57.6/Ag0.4). Ennek a két komponensű pasztának az olvadáspontja 138°C-nál van, ami bőven a kitűzött maximum hőmérséklet alatt van.

A forrasztás egy eC-reflow-mate újraömlasztó kemencével történt. A kemence előnye, hogy egyszerűen és gyorsan kezelhető, de hátránya, hogy nem rendelkezik semmilyen aktív, hűtést elősegítő

egységgel, valamint, hogy az ajtajának automatikus nyílásakor, a végállapotban történő ütközés miatt leeshetnek az áramkörök, vagy rosszabb esetben a rajtuk található alkatrészek is, amennyiben a forraszkötések még nem hűltek le a paszta olvadáspontja alá.

11.5. Hőprofil:

A megfelelő forrasztáshoz egy olyan forrasztási hőprofil alkalmazása szükséges, amely elég magas hőmérsékletű a paszta megömléséhez, de nem eléggé magas hőmérsékletű és hosszan tartó ahhoz, hogy kárt tegyen a hordozó anyagában. Az optimális hőprofil áramkörök alkatrészek nélküli forrasztásával határoztam meg.

Egy tipikus újraömléses forrasztás hőprofilja az időben 4 részre osztható:

Előmelegítés: Az előmelegítés során a kemencét a paszta olvadáspontjához közeli, de még az alatti hőmérsékletre melegítjük fel. A szakasz tipikus hossza: 60-150 másodperc.

Hőntartás: A hőntartásnak leginkább a nagy kiterjedésű áramkörök forrasztása esetén van szükség. Mivel a hordozó, a hőkapacitása miatt nem képes a kemence hőmérsékletének azonnali átvételére, ezért időre van szükség, hogy a hordozó hőmérséklete is elérje a paszta olvadáspontjánál valamivel alacsonyabb hőmérsékletet. Amennyiben a forrasztás ezen szakasza rövid idejű vagy alacsonyabb hőmérsékletű, úgy előfordulhat, hogy a következő szakaszban, a hordozó nem éri el a paszta megolvadásához szükséges minimális hőmérsékletet. Ekkor a forraszkötések vagy nem alakulnak ki, vagy csak részlegesen. A szakasz tipikus hossza 60-120 másodperc.

Újraömlés: A forrasztás ezen szakaszában ismételten növeljük a kemence hőmérsékletét, általában pár tíz fokkal a paszta olvadáspontja fölé. A paszta ezen szakasz közben olvad meg és terül szét a forrasztási pontokon. A szakasz tipikus hossza 20-60 másodperc.

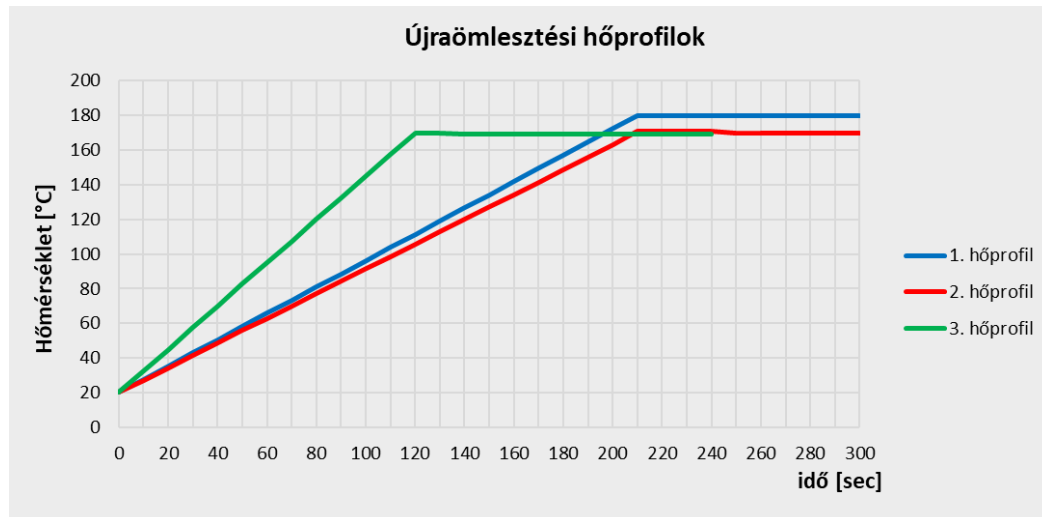
Hűtés: A paszta megömlését követően megkezdhető a kemence és az áramkör hűtése. Ez történhet aktív módon, például ventilátorok alkalmazásával, vagy passzív módon a fűtés megszakításával. A paszta olvadási hőmérséklete alá érve, a forrasztóanyag megszilárdul és létrejönnek a szilárd fémes forraszkötések. A szakasz tipikus hosszát nem időben szokták megadni, hanem a hűtés sebességében. Ez általában 4-5 °C/s.

A fentebb ismertetett általános forrasztási hőprofiltól a lebomló áramkörre való forrasztás során több pontban is eltértem. A változtatások során a fő szempont az idő minimalizálása, valamint a lehető legalacsonyabb maximális hőmérséklet beállítása volt.

Mivel egyszerre egy áramkör került forrasztásra, valamint a hordozó mérete kicsi, és nagy hőkapacitású alkatrészeket sem tartalmaz, ezért a hőntartás szakasznak kevés jelentősége van, hiszen a hordozó a feltételezések szerint jól le tudja követni a kemence beállított hőprofilját. Ennek elhagyásával csökken a hordozó magas hőmérsékleten töltött ideje is. A hőntartás elvételét valamelyest kompenzálva, meghosszabbítottam az előmelegítés idejét, ezáltal biztosítva, hogy a hordozó a hőmérséklet lassabb emelkedése során jobban le tudja követni a kívánt hőmérsékletet. Kezdetben a maximális hőmérsékletet 180°C-ban határoztam meg. Mivel az eC-reflow-mate nem

rendelkezik aktív hűtéssel, így a hűtési szakasz meghatározása felesleges. Elektronikai módon vezérlése ennek nem lehetséges, de a kemence ajtajának kinyitásával korlátozott módon beavatkozhatunk a hűtés folyamatába.

A forrasztási tapasztalatokat figyelembe véve, azokat felhasználva 3 valamelyest eltérő forrasztási profil került tesztelésre (11.5.1. ábra). Sajnos a forrasztás végeztével a kemencét vezérlő és azt monitorozó szoftver többször is lefagyott, emiatt csupán az utolsó hőprofilról készült a valós hőmérsékletet ábrázoló idődiagramm (11.5.2. ábra).



11.5.1. ábra: Tesztelt hőprofilok



11.5.2. ábra: A 3. hőprofilhoz tartozó valós hőmérséklet diagramm.

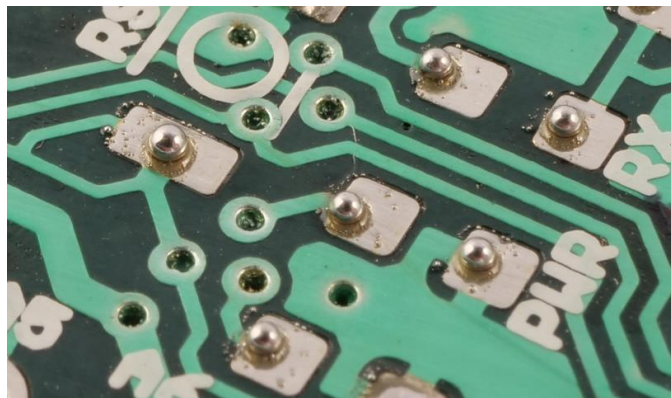
11.6. Forrasztás utáni tapasztalatok:

Közvetlenül a forrasztás végeztével, a még magas hőmérsékletű hordozó jelentősen rugalmassá lágult. A forrasztás vizsgálatával, az áramkör mozgatásával egészen annak lehűléséig vártam, kerülve az ellágyult hordozón esetlegesen bekövetkező rézrajzolat roncsolódást, szakadást. Az 1. hőprofil esetében (melynél 3,5 perc volt a felfűtési idő, valamint 180°C a maximális forrasztási hőmérséklet 1,5 percen át) azt tapasztaltam, hogy az áramkörön nagyméretű lenolajcseppek jelentek meg a furatok, viák vagy a forrasztásgátló maszk pórusain keresztül. Ebből kiindulva a 2. hőprofil esetében 10°C-al alacsonyabb, tehát 170°C lett meghatározva maximális hőmérsékletként. A teszt forrasztás végén szintén tapasztalható volt a lenolaj nagy cseppekben történő kiszivárgása a hordozó felületére, megközelítőleg ugyan akkora mértékben, mint az 1. hőprofil alkalmazva.

Ezt kövően a 3. hőprofil esetében a forrasztási idő csökkenésével próbáltam meg javítani az eredményeket. Ebben az esetben 2 perces felfűtési időt állítottam be, valamint a jóval rövidebb felfűtési idő miatt kicsivel hosszabb, 2 perces, 170°C-os forrasztási szakaszt hagytam. A 3.

hőprofiltesztet követően azt tapasztaltam, hogy az eredetileg is jelen lévő szennyeződésen kívül, szemmel láthatóan nem szivárgott több lenolaj az áramkör felületére.

A forrasztási tesztek másik fontos tapasztalata, hogy a forrasztandó felületeket szennyező lenolaj nagymértékben gátolta a megömlött paszta nedvesítését és ezáltal a terülését. Az alkatrészeken kívül forrasztott áramkörök forrasztandó felületein a megolvadt paszta nem terült el, hanem apró gömbökké húzódott össze. Ez egyértelmű jele a forrasztfelületek rossz nedvesíthetőségének. További nem kívánt jelenség, hogy az így keletkezett forrasztgömbök gyenge mechanikai behatásra, például mikroszkóp alatt csipesszel történő gyenge erőfelfejtés következtében elváltak a hordozótól. Több esetben a forrasztgömbök nem is közvetlenül a forrasztandó fém felülettel érintkeztek, hanem egy azon elterülő vékony, megszilárdult lenolajrétegbe ágyazódva maradtak a fém felületén.



11.6.1. ábra: A felületi szennyeződés miatt a megolvadt forrasztaszta gömbökké húzódott össze.

A teszteknek egyértelmű tanulsága, hogy a hordozón felületét szennyező lenolaj jelentős mértékben akadályozza a forrasztások kialakítását az újraömlesztéses technológiával. Mivel az adott hordozóból kell kiindulnom, amely már szennyezett a lenolajjal, így ennek tisztítására kell megoldást találni.

12. Lenolaj eltávolításának lehetőségei:

Ahogy azt már említettem, a lebomló kompozit gyártásának utolsó lépése egy szárítási ciklus, mely ugyan az általam használt széria esetében nem fejeződött be, de a hordozót szennyező lenolaj szobahőmérsékleten így is inkább mondható amorf szilárd halmazállapotúnak, mintsem folyékonyak. Több különböző módszert próbáltam ki a lenolaj eltávolítására:

Szike alkalmazása: Első ötletként a hordozó felületén elterülő, milliméteres nagyságrendű olajcseppeket próbáltam meg szike segítségével lekaparni. Sajnos a szennyeződés erősen tapadt akár a forrasztásgátló maszkréteghez, akár magához a forrasztandó fémfelületekhez. A próbálkozásaim alkalmával három esetben a lakk vagy a fémezés is leszakadt a lenolajjal együtt. A módszer további hátránya volt, hogy nem jelentett volna megoldást a vékony, mikroszkóp alatt sem feltűnő, egyenletesen elterülő szennyeződéssel szemben.

Melegítés és törlés: Következő lépésként megpróbáltam meglágyítani, folyóssá tenni a lenolajat, hogy azt követően valamilyen módon letörölhető legyen. A hordozót hőszugárzó fokozatos közelítésével melegítettem fel. Azt tapasztaltam, hogy a részben kiszáritott lenolaj, csak magas hőmérséklet hatására lágyul meg, ennél a hőmérsékletnél azonban a hordozóban található lenolaj is elkezd a felszínre szivárogni, ami tovább rongja a hordozó tisztaságát. A felmelegített hordozó törlés hatására gyorsan lehűlt, így a lenolaj is megszilárdult.

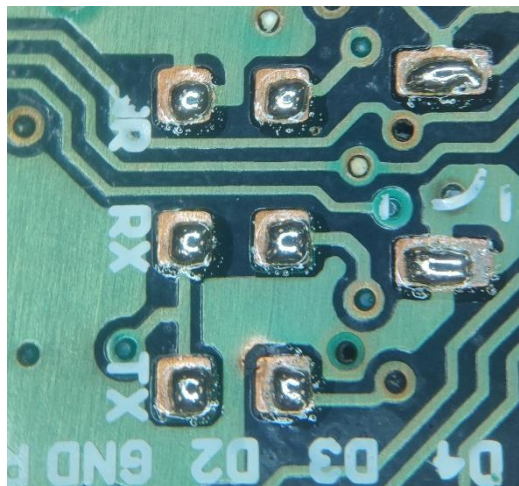
Benzines tisztítás: Vegyész szakember tanácsára próbáltam ki a gyógyszerári, nagy tisztaságú benzint alkalmazását. Szőszmentes törlőkendőt itattam át, mellyel hosszú időn át, megközelítőleg 15 percen keresztül dörzsöltem a szennyezett hordozót. A lenolaj tisztítása kis mértékben sem sikerült benzint alkalmazásával.

Kárpit folteltisztító spray: Hasonló eredményt kaptam folteltisztító spray használata után is. Alaposan befújva a hordozót és elég időt adva az esetleges oldó hatás kifejtésének, majd erős dörzsölés hatására sem oldódott le lenolaj az áramkör felületéről.

Aceton használata: Az előző kísérletekkel ellentétben az acetonnal sikerült eltávolítanom a hordozó felületét szennyező lenolajat. Acetonnal átitatott szőszmentes törlőkendővel dörzsölve az áramkör felületét, a lenolaj körülbelül egy perc alatt eltávolítható volt a felületről.

A lenolaj sikeres eltávolítását követően ismételt elvégeztem az alkatrész nélküli forrasztási tesztet azt vizsgálva, hogy a hordozó acetonos tisztítását követően továbbra is fennál-e a lenolaj miatti rossz forraszthatóság, esetleg merülnek-e fel az aceton alkalmazása miatti új problémák.

Ahogy az a 12.1. ábrán is jól megfigyelhető, a tisztítást követően a megolvadt forraszpaszta nagyobb felületen elterült, mint a tisztítást megelőző forraszthatósági teszt esetében (11.6.1. ábra). A kötések már nem voltak kézzel ledörzsölhetők.



12.1. ábra: A felület acetonos tisztítása után a paszta nagyobb felületen terült el.

13. Lebomló áramkörök szerelése:

Mielőtt ismertetném a lebomló hordozón elkészített mikrokontroller létrehozásának lépéseit és tapasztalatait, fontosnak tartom megemlíteni, hogy a lebomló lemez gyártásának kezdeti csúszása, valamint a kutatás dokumentációjának közelgő határideje miatt egyre sürgetőbbé vált, hogy ténylegesen megvalósuljon egy funkcionálisan működő, vagy ellenkezőleg, egy összeszerelt, de nem működő mikrokontroller, melyből egyaránt lehet következtetéseket levonni jelen dolgozatban. Éppen ezért a megfelelő hőprofil meghatározását kövően rögtön a mikrokontrollerek megvalósítása volt a kitűzött cél. Emiatt az alábbi áramkörök szerelésekor, a már ismertetett felületi tisztítási eljárást még nem ismertem, így nem tudtam alkalmazni. A tisztítás megfelelő módját csak a mikrokontroller létrehozását követően határoztam meg. Ennek következménye, hogy az áramkörök, melyeken a mikrokontrollerek megvalósultak, nagy mértékben szennyezettek voltak a lenolaj által.

Összesen 3 darab lebomló áramkör esetében ültettem és forrasztottam be az alkatrészeket. A szerelt áramkörök közül **egy mikrokontroller működésre volt bírható, azonban ez is jó kihozatalnak**

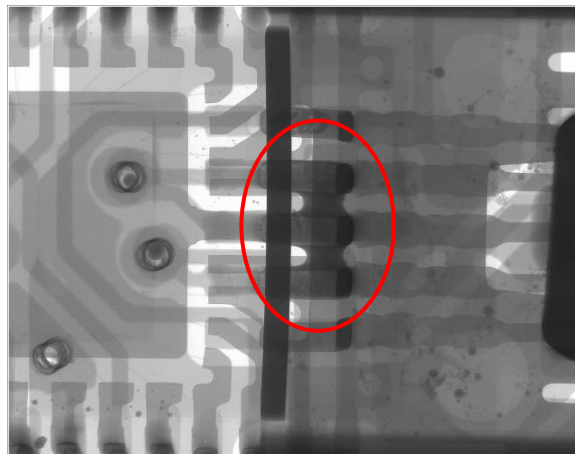
számít, és ilyen komplexitású áramkör elérése komoly eredmény. A továbbiakban ezekre *BIO_1*, *BIO_2* és *BIO_3* elnevezésekkel fogok utalni. (BIO, mint Biodegradable, azaz lebomló.)

Hasonlóan az FR4-es hordozón megvalósított mikrokontroller létrehozásához, ezekben az esetekben is papír stencil alkalmazásával került a már ismertetett bizmutos forraszpaszta a lebomló hordozók felületére. Az alkatrészek ebben az esetben is mikroszkóp segítségével, kézzel kerültek beültetésre. Elsőként a ATmega mikrokontroller IC felőli oldalak kerültek beültetésre és forrasztásra, ezt követően pedig az átellenes oldalak. A forrasztáshoz a már ismertetett 3. számú hőprofil lett felhasználva.

14. Eredmények a szerelt lebomló áramkörök esetében:

14.1. BIO_1-es sorszámú panel:

A hordozó nagymértékű szennyeződése miatt, az alkatrészek forraszkötései sok helyen egyáltalán nem alakultak ki. A lenolaj miatt sok forrasztási pontnál nem tudott fémes kontaktus kialakulni az adott alkatrész kivezetése és a forrasztási fémfelület között. Ezek a forrasztási hibák mikroszkóp nélkül sokszor észrevehetetlenek maradtak a lenolajréteg vékonysága és áttetszősége miatt. Az USB csatlakozó, valamint az USB vezérlő IC lábainál a relatív nagymennyiségű paszta csupán az alkatrészek lábait tudta nedvesíteni, a forrasztási felületet nem, emiatt a lábakra felfutó olvadt paszta rövidzárat alkotott ezen alkatrészek kivezetései között (14.1.1. ábra)



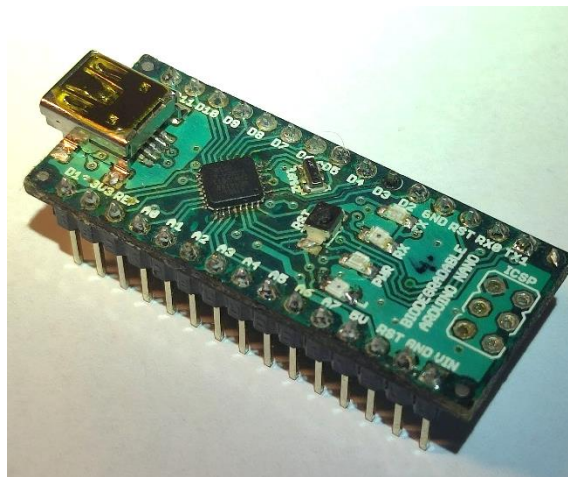
14.1.1. ábra: Röntgenmikroszkópos kép az USB csatlakozó kivezetései között található rövidzárról.

Az említett hibajelenségek kijavítása sok időt vett igénybe. Berényi Richárd segítségével kézi forrasztópákával és folyasztószer alkalmazásával a sok alkatrészt újraforrasztottuk. Figyelni kellett arra, hogy a már meglévő, jó forrasztások megmaradjanak, valamint, hogy a hordozót a lehető legkisebb mértékű hőhatás érje a kézi forrasztás során. A javított forraszkötéseket multiméteres szakadásvizsgáló funkcióval ellenőriztem. A javításokat követően beforrasztásra kerültek a mikrokontroller IC lábainak kivezetéseiként szolgáló tűskesorok is. Ezek behelyezésekor problémát okozott a már említett furatfémezési egyenetlenség. A furatok fémezése során a fém a furatok belső falából kilógó lenszálakat is bevonta, ezáltal jelentősen csökkentve ezek belső átmérőjének méretét. A méretcsökkenés miatt a tűskesor csatlakozó nem fért bele a fémezett furatokba. A hiba javítása egy 1mm átmérőjű CNC fúrószerű kézi használatával történt, mellyel könnyedén el lehetett távolítani a felesleges fém-lenszálakat. Sajnos ennek használata során az egyik I/O lábhoz tartató furat fémezése és a hozzá csatlakozó vezeték kizakadt a hordozóból. Szerencsére a kivezetés hiánya nem okoz problémát a mikrokontroller funkcionális működésében.

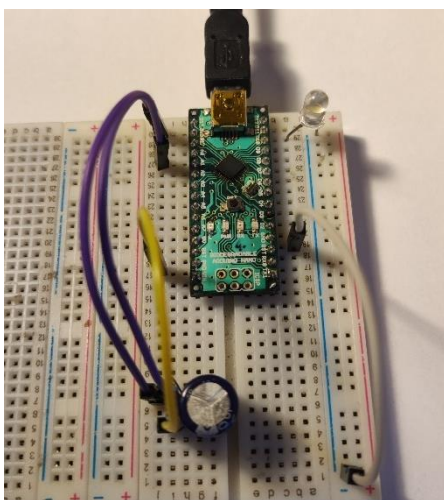
A forrasztások fokozatos javításával a panel funkcionális szempontból vált egyre használhatóbbá. Először az USB-t csatlakoztatva a számítógép nem érzékelte a bedugott eszközt. Ezt megoldva nem világított a tápfeszültséget jelző LED, majd ennek orvoslását követően nem volt beégethető a bootloader program, majd legvégül, amikor az ezt a hibát okozó forraszkötések is javítva lettek, már csupán pár I/O kimenete maradt a mikrokontroller IC-nek, amelyek nem érintkeztek a kivezetéseket jelentő tűkesorral.

A javítási feladatok végeztével az ATmega mikrokontroller IC három I/O kimenete nem volt elérhető a tűkesoron keresztül. Ezek közül egy, a fentebb említett furatfémzés kiszakadása miatt, kettő pedig a mikrokontroller IC adott I/O lábainál nem megfelelő forraszkötések miatt. Ezek nem kerültek javításra, félve attól, hogy a szomszédos, jól kontaktáló lábak forraszkötése szakad meg.

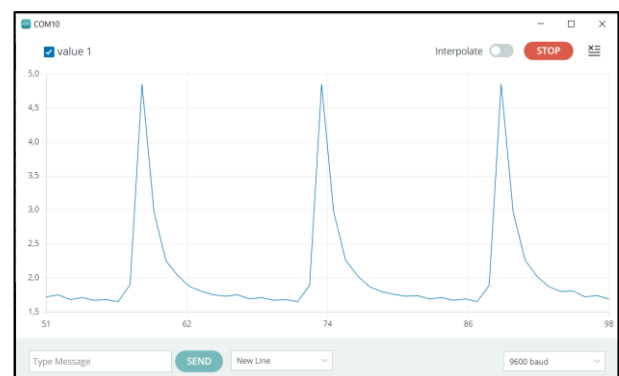
A BIO_1-es mikrokontrollerre a már bemutatott bootloader égetést segítő áramkör segítségével sikeresen feltölthető volt a bootloader program, ezt követően pedig a már bemutatott, az FR4-es hordozóra is feltöltött tesztprogram.



14.1.2. ábra: A működő BIO_1-es panel



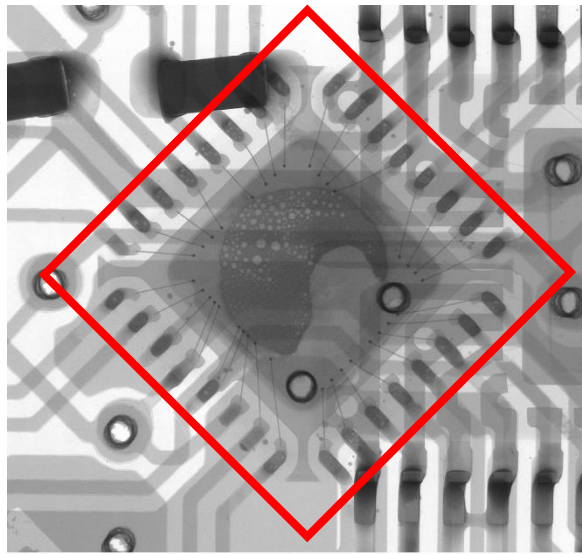
14.1.3. ábra: BIO_1-es panel a tesztprogramot futtatva. A nincsen tápforrásra kötve, mert a LED rontotta a kép minőségét



14.1.4. ábra: Soros porton kapott eredmény; tengelyek értékei: X: idő [s], Y feszültség [V]

14.2. BIO_2-es sorszámú panel:

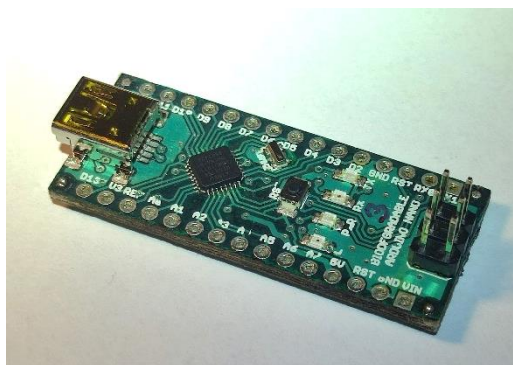
Ennek a panelnek a forrasztása első ránézésre jól sikerült, szabad szemmel nem voltak láthatóak rövidzárat alkotó vagy fémes kontaktot nem kialakító forraszkötések. Azonban az áramkör alaposabb, optikai és röntgenmikroszkóppal való elemzése során derült ki, hogy valójában a forrasztást követően sok alkatrész kivezetés nem kontaktált az áramkörrel. A legtöbb hibás kötés a mikrokontroller lábainál volt fellelhető. A 14.2.1. ábrán látható röntgenképen jól kivehető, a mikrokontroller IC lábainál található forraszspasza erős kontúrvonallal rendelkezik. Ezek a körvonalak jelzik, hogy nagy eséllyel az adott kivezetés nem kontaktál a hordozón található forrasztási felülettel. A jó kötések körvonala elmosódó, kis kontraszttal rendelkezik.



14.2.1. ábra: Röntgenkép a BIO_2-es panel ATmega IC forraszkötéseiről

A BIO_2-es mikrokontroller esetében több hasonló rosszul beforradt kötetést is találtam, például a rezonátor, az ellenálláslétra, az USB csatlakozó, valamint az USB vezérlő IC esetében is.

Az első körben detektált rossz forrasztási pontok kézi javítását követően, a panelt számítógéphez csatlakoztatva, már visszajelzést kaptunk arról, hogy a gép érzékelte az USB vezérlő IC-t. Ennek ellenére a bootloader égetése minden próbálkozás alkalmával sikertelen volt. Az panel másodjára is röntgenmikroszkópos elemzésnek lett alávétve. Kijavításra került az összes forrasztással bekövetkezett rövidzár, vagy annak fémes kontaktálás hiánya, valamint a hordozó vezetékében fellelt esetleges rövidzárak, de az összes javítási lépés elvégzésével sem vált felprogramozhatóvá az áramkör a kutatás dokumentációjának elkészítéséig.



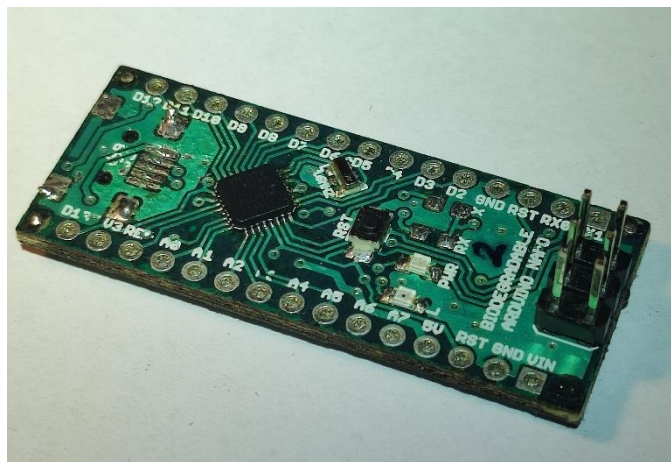
14.2.2. ábra: A BIO_2-es panel

14.3. BIO_3-as sorszámú panel:

Ez a panel is sajnos hasonló végeredménnyel zárult, mint a BIO_2-es mikrokontroller; nem lett üzembe helyezhető. Ahogyan azt korábban említettem, a használt újraömlesztő kemence egyik problémája, hogy a forrasztási ciklus befejezésével az ajtó kinyitása és így az áramkörök kiadásának mozgatása hirtelen ütközéssel és megállással fejeződik be. Ez nem jelent nagy problémát, ha a kialakított forraszkötések már megszilárdultak, vagy egy ott álló személy a kezével koordinálja a kemence ajtónyitásának folyamatát. Sajnos ennek a panelnek a forrasztása során a forraszpaszta még megolvadt állapotban volt és a kemence ajtónyitása is ütközéssel zárult. Ennek következménye volt, hogy az áramkör leesett a tartó keretéről és több alkatrész is leesett vagy elmozdult a helyéről, melyeknél a kiadás pillanatában még nem alakult ki szilárd forraszkötés.

A forrasztást követően a legtöbb alkatrész forraszkötését kézzel kellett korigálni vagy teljes egészében létrehozni. A javítások elvégzése után számítógépre kötve a panelt a számítógép figyelmeztető üzenetet adott ki, mely szerint impulzus teljesítményfelvétel történt az USB csatlakozón keresztül. Ez az USB csatlakozó táp és földpontja közötti rövidzárra utalt. Ezt a multiméteres rövidzár vizsgálat is kimutatta. A hiba helyének meghatározásához ismételten egy röntgenmikroszkópos vizsgálatra volt szükség. A lokalizált rövidzárat az addigra bevett módon, szike alkalmazásával szakítottam meg.

Az összes fellelt forrasztási hiba javítását követően sem sikerült programozhatóvá tenni az eszközt. A számítógép a rövidzár javítását követően nem adott hibaüzenetet impulzus teljesítményfelvételről, de nem is tudta érzékelni a panelen található USB vezérlő IC-t. Feltételezésem, hogy a rövidzár következtében valamilyen módon ez a vezérlő IC sérülhetett meg, hiszen tápfeszültség hatására az ennek meglétét jelző LED nem, de a soros kommunikációt jelző LED folyamatosan világít, az USB csatlakoztatása és valódi kommunikáció megléte nélkül is.



14.3.1. ábra: A BIO_2-es panel

15. A szerelés során szerzett tapasztalatok összesítve:

Ahogyan már leírásra került, a BIO_1, BIO_2 és BIO_3-as hordozók szerelésükkor, forrasztásukkor és elemzésükkor még nem végeztem kísérleteket arra vonatkozóan, hogy milyen módszerekkel lehet elérni, hogy az áramkörök felületén található nagymértékű lenolaj szennyeződés eltüntethető, leoldható legyen. Ennek oka, hogy mindenképpen rendelkeznek az áramkörök

létrehozásával kapcsolatos tapasztalatokkal, melyek a mikrokontroller lebomló hordozón történő tényleges megvalósítási kísérletéből adódnak.

A három kísérleti áramkörre vonatkozó közös tapasztalat, hogy a legnagyobb problémát az alkatrészek beforrasztásának lenolaj általi akadályozása okozza. Ezen áramkörök felülete már a nedveskémiai gyártás végeztével szennyezett volt, és a tisztítás hiányában a forrasztási felületeket bevonó lenolaj drasztikusan rontotta a forrasztási felületek paszta általi nedvesíthetőségét, valamint a kialakuló fémes kötés minőségét.

Mivel a hordozó gyártásának megkésése, valamint az elkészített áramkörök kísérletek általi elhasználása miatt nem kerülhetett sor a már tisztított áramkörök szerelésére, forrasztására és vizsgálatára, így az ez esetben születendő eredményekre csak következtetni tudok. Véleményem, hogy a tisztított áramkörök 3. számú hőprofillal történő forrasztása esetén a forrasztási felületek tisztasága miatt ezen felületek paszta általi nedvesíthetősége sokkal jobb, mint a nem tisztított hordozók esetében. A forrasztás rövid időtartamának és alacsony csúcshőmérsékletének következtében az áramkör felületére csak minimális mennyiségben, vagy ahogy a forrasztási teszt esetében, egyáltalán nem szivárog lenolaj, ezáltal érintetlenek maradnak a kialakulóban lévő forraszkötések.

A felsorolt okok miatt feltételezésem, hogy acetonnal tisztított áramköröket alkalmazva növelhető a működő áramkörök kihozatala, de ahogyan a BIO_1-es hordozó is mutatja, szennyezett hordozón sem lehetetlen a funkcionálisan működő mikrokontroller létrehozása.

16. Biológailag lebomló hordozók vizsgálata HAST kamrában:

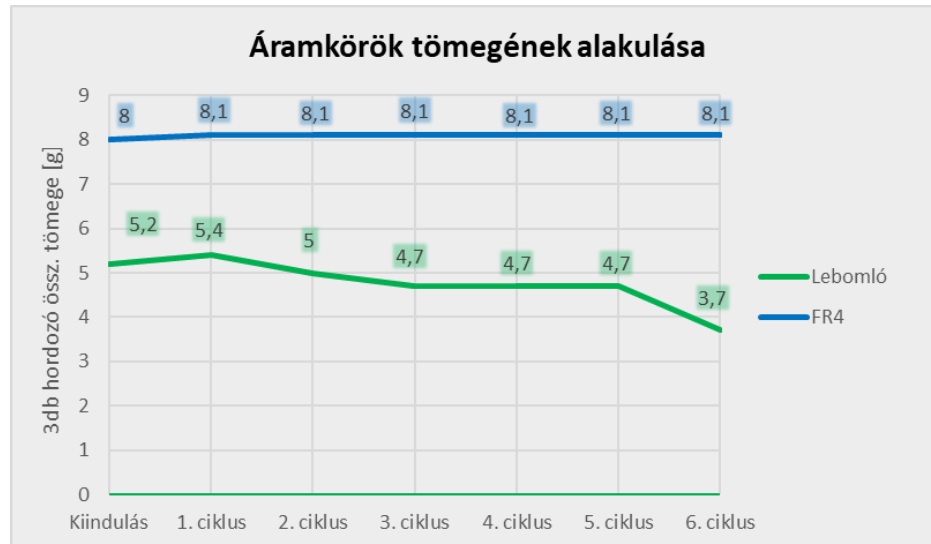
16.1. A vizsgálat menete:

Az áramkörök, hordozók vizsgálatának elterjedt, gyakran alkalmazott módjai a gyorsított élettartam vizsgálati módszerek. A különböző módszerek alkalmazásával képesek az adott áramkör meghibásodási tényezőinek vagy várható élettartamának meghatározására, olyan módon, hogy a vizsgálat során kialakított körülményekkel előidézzük a fizikai folyamatok lezajlásának gyorsítását. Módosított környezeti tényező lehet a hőmérséklet, páratartalom, nyomás vagy különböző mechanikai behatások.

A legtöbb ilyen típusú vizsgálat egyik fő paramétere az úgynevezett gyorsítási faktor. A gyorsítási faktor azt mutatja meg, hogy a vizsgálati körülmények hatására a fizikai jelenségek hányszor gyorsabban zajlanak le, mint a természetes körülmények hatására. A gyorsított élettartam vizsgálatok nagy előnye, hogy például egy áramkör várható élettartamának meghatározásához nem szükséges kivárni a meghatározni kívánt időt.

A gyorsított élettartam vizsgálati típusok egyik, a többi vizsgálati módszertől valamelyest eltérő fajtája az úgynevezett HAST (Highly Accelerated Stress Test) ciklus. Ez a vizsgálati módszer teszi ki a legszélsőségesebb környezeti paramétereknek a vizsgált áramköröket. Sok esetben olyan fizikai folyamatok indulhatnak be a vizsgálati tárgyban, melyek a hétköznapi használat során nem fordulhatnak elő hosszú éveken át tartó használat hatására sem. Éppen ezért a HAST ciklusra nem szokás gyorsítási faktort megadni, hiszen a vizsgált tárgy extrém körülményeknek van kitéve.

A HAST ciklust sokkal inkább szokták konkrét fizikai jelenségek előidézésére, vagy különböző áramkörök összehasonlítására használni. Az ETT tanszék tulajdonában lévő HAST kamrát én is ez utóbbi célra használtam fel. A HAST teszttel arra kerestem a választ, hogy a szélsőséges körülményeknek kitett biológiailag lebomló, és a tesztnek szintén alávetett FR4-es hordozók összehasonlításával milyen különbségek mutatkoznak a teszt végén. Az vizsgálatban alkatrészek nélküli szereletlen áramköröket vizsgáltam.



16.1.1. ábra: Áramkörök tömegének alakulása a HAST ciklusok során.

A szélsőséges körülményeknek a hordozók összesen 6 napig voltak kitéve. Mivel ezeken a hordozókon még senki sem végzett el hasonló tesztet, az áramkörök állapota napi rendszerességgel lett ellenőrizve. Ekkor dokumentálva lett a lebomló és nem lebomló hordozók összesített tömege (16.1.1.ábra), valamint fotók készültek a roncsolódó áramkörökről. A ciklus paramétereiként a minimálisan beállítható 105°C hőmérséklet, valamint 100%-os páratartalom került beállításra. A kamra úgy működik, hogy a kívánt hőmérséklet és páratartalom eléréséhez automatikusan állítja be a szükséges nyomást. A beállított paraméterekhez tartozó nyomásérték a légköri nyomás 120%-a volt, ami megközelítőleg 121kPa.

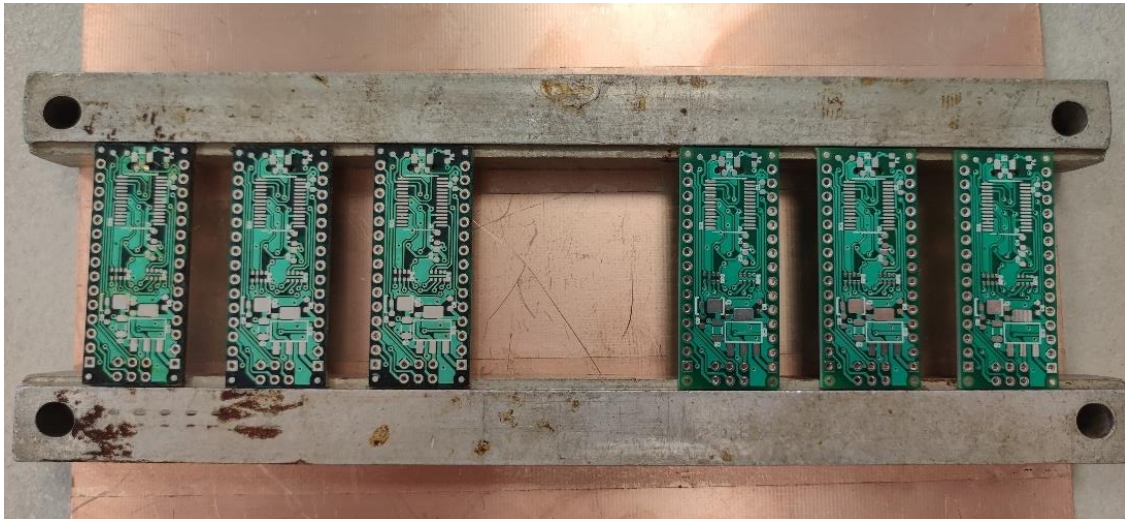
16.2. A HAST vizsgálat eredményei:

Összehasonlítva az első ciklus előtt (16.2.2.ábra), valamint az utolsó (6.) ciklus után (16.2.3.ábra) készített képeket az áramkörökről, azonnal szembetűnő a lebomló hordozók jelentősen nagyobb mértékű elváltozása. Észrevehető rajtuk szerkezetüket alkotó rétegek delaminációja, a forrasztásgátló lakk, valamint a szerelést segítő rajzolatok lepergése, a réz felületek oxidációja, valamint a hordozó szerkezetének egyik fő összetevője, a PLA fehér, porózus anyagként jelent meg az áramkörök felületén. Megvizsgálva a tálcát, melyre a hordozók a HAST kamrában voltak elhelyezve, észrevehető, hogy a lebomló hordozók felőli oldalán nagymértékben szennyeződött a tartótálca. A lebomló hordozók tömegének csökkenését mutatják ki a mérési eredmények is (16.1.1.ábra). Látható, hogy a ciklusok során, egy kezdeti, minimális tömegnövekedést követően, amit az áramkörök 100%-os páratartalom miatti vízfelvétele jelenthetett, a tesztelés ideje alatt a hordozók tömege monoton csökkent.

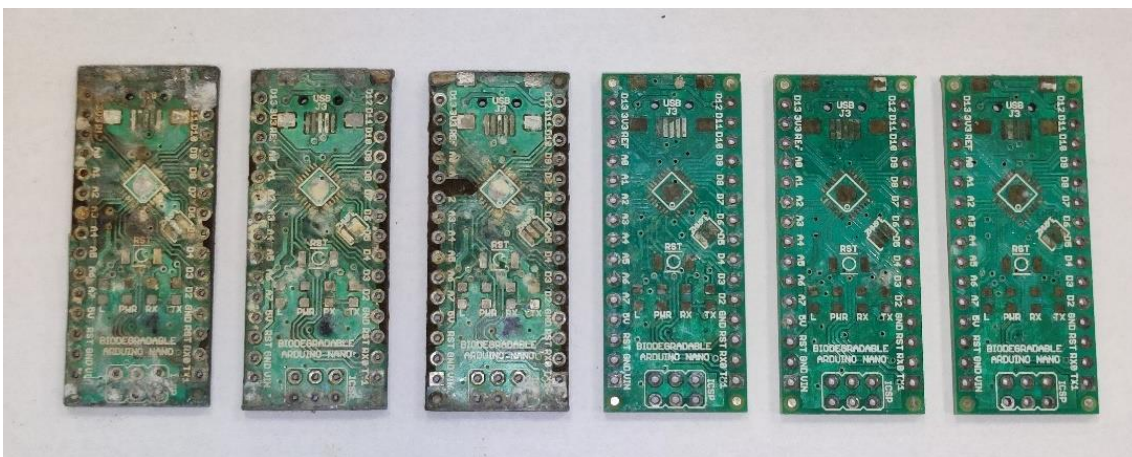
Az FR4-es alapú áramkörök esetében nem beszélhetünk jelentősen nagy degradálódásról. A ciklusok között megfigyelhetőek voltak, az oxidálódó rézfelületek, valamint a hordozó zöld színének kismértékű elhalványulása. Ezeken kívül nem volt tapasztalható jelentős fizikai elváltozás. Ez igazolják a tömegmérések is, hiszen egy kezdeti kismértékű tömegnövekedés után a 3 darab hordozó összömege nem változott.



16.2.1. ábra: Áramkörök a HAST kamrában



16.2.2. ábra: A HAST ciklus előtt (balra: lebmoló; jobbra: FR4)



16.2.3. ábra: A HAST 6. ciklusa után (balra: lebmoló; jobbra: FR4)

A vizsgálat alátámasztja, hogy az FR4-es kompozit anyag sokkal nagyobb mértékben ellenáll a környezeti hatásoknak, mint a tanulmányozott lebomló kompozit anyag. Jelen esetben ez pozitív hír, hiszen a fenntartható elektronikai ipar szempontjából egy olyan lebomló hordozó létrehozása a cél, amelyen az elektronikai eszköz élettartama során megbízhatóan működik az áramkör, de nem áll ellen hosszú évszázadokon át a környezeti tényezőknek.

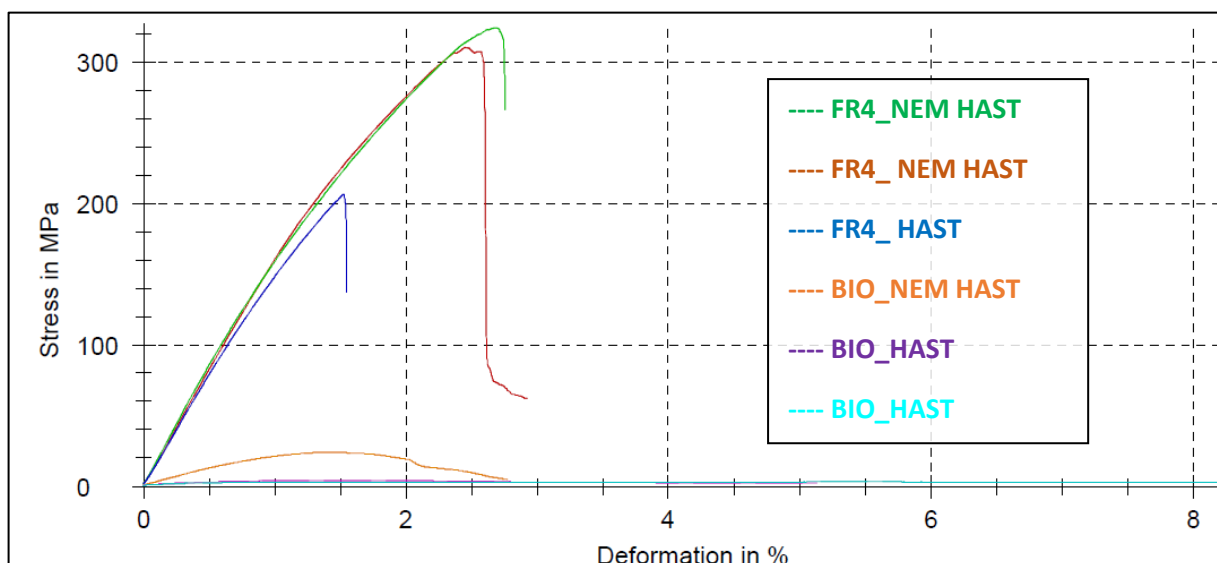
17. Három pontos hajlítási teszt:

A HAST ciklus során tesztelt áramkörök közül 2 darab lebomló, illetve 2 darab FR4-es, valamint további, addig érintetlen 1 darab lebomló és 2 darab FR4-es áramkört küldtünk el 3 pontos hajlítási vizsgálatra. Ezzel a cél az volt, hogy szemléletessé váljon és kvantitatív módon megmért adatunk legyen arról, hogy a HAST ciklus során mennyivel gyengült a kísérletben alkalmazott hordozók szerkezete.

Az eredményként kapott grafikonról (17.1. ábra) egyértelműen leolvashatóak a változások. A grafikon függőleges tengelyéről olvasható le a hordozóra kifejtett nyomás (Stress) MPa mértékegységben, vízszintes tengely mentén pedig a hordozó nyomás hatására bekövetkező deformációja lett ábrázolva.

Az látható, hogy a nyomásnak leginkább ellenálló hordozók a HAST ciklus által nem vizsgált áramkörök voltak. A görbék jellege arra utal, hogy a tesztek ezeknél a hordozóknál azok törésével értek véget, hiszen hirtelen letöréssel esik vissza az alkalmazott nyomóerő. Hasonló jelenség figyelhető meg az HAST cikluson átesett FR4-es áramkör esetében is, de itt a maximálisan elviselt nyomás megközelítőleg az előzőek 2/3-a.

A HAST ciklussal tesztelt lebomló hordozókról a görbe alapján elmondható, hogy azok már a mérés megkezdése előtt alkalmazott kezdeti 1N súlyú terhelés hatására is eltörtek. A gép nem tapasztalt ellenállást a nyomással szemben, így a megrajzolt 2 görbe nem tér ki a függőleges tengely mentén. A HAST ciklussal nem vizsgált lebomló hordozó töredék akkora ellenállást fejtett ki a nyomó karral szemben, mint bármelyik FR4 alapú hordozó. A görbe alakja arra utal, hogy a lebomló hordozó ellenben az FR4-es hordozókkal szemben nem tört, hanem folyamatosan görbült és egy adott ponton túl egyre kisebb nyomást fejtett ki a mérőkarral szemben.



17.1. ábra: 3 pontú hajlítási vizsgálat eredménye. (Az angol tengelyfeliratok jelentése: *Stress in MPa* → Feszültség MPa-ban megadva; *Deformation in %* → Deformáció %-ban kifejezve)

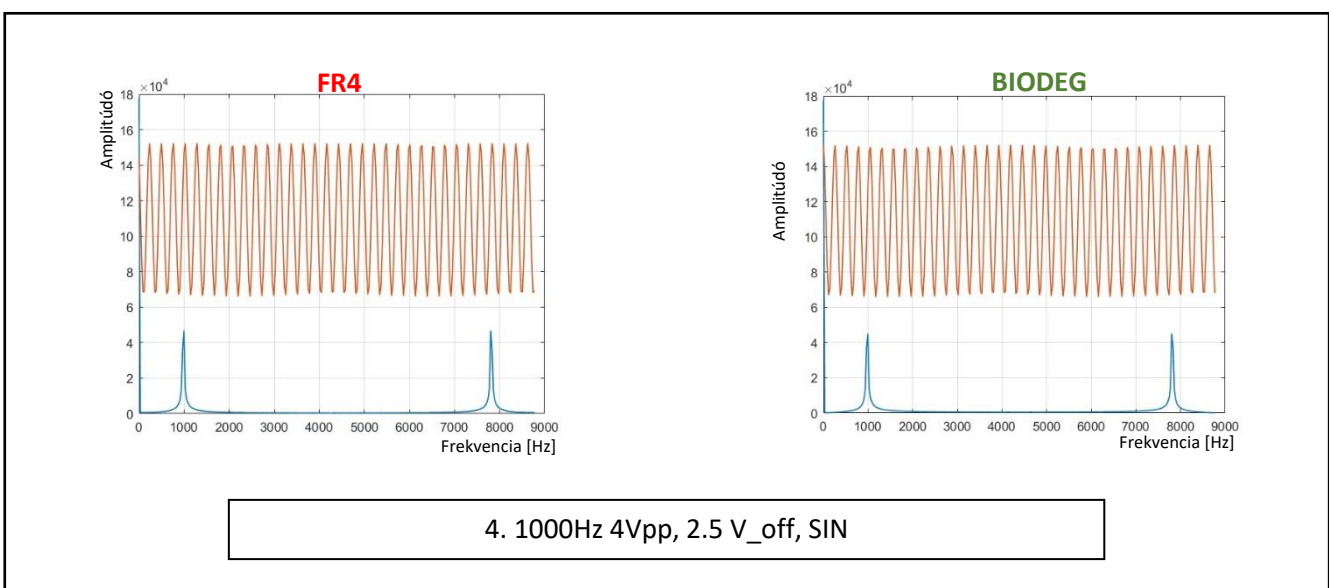
A hajlítási vizsgálat szintén azt mutatta meg, hogy a mechanikailag egyébként is gyengébb lebomló hordozón megvalósított áramkörök a HAST ciklust követően, szinte semekkora mechanikai szilárdsággal nem rendelkeznek és elveszítik rugalmasságukat.

18. Hordozók összehasonlítása mintavételezési program által:

Ahogy az már kiderült, a BIO_1-es áramkörrel sikerült megvalósítani a mikrokontroller működését. Lehetséges a programok feltöltése és futtatása a lebomló alapú mikrokontrollerre. Ezt kihasználva fontosnak tartottam elektromos szempontból is összehasonlítani ezt, az FR4-es hordozón megvalósított mikrokontrollerrel. A mikrokontroller egyik fontos tulajdonsága az analóg feszültség olvasás. Képes 8,8kHz-el mintavételezni az analóg bemeneteit, amely bár nem sok, a kísérlet végrehajtása szempontjából megfelelő.

Függvénygenerátorral ismert frekvenciájú, feszültség értékű és alakú jelet kötök a mikrokontroller egyik analóg bemeneti lábára és egy általam írt kóddal mintavételezem a bemenetre adott jelet. Csupán a maximális megengedett számú minta beolvasása után iratom ki a kapott mintavételi pontokat, hiszen a soros kommunikáció jelentősen csökkentené, és a kiírt adat hosszától függően változtatná a mintavételi frekvenciát. A kapott adatokból a MATLAB FFT (Fast Fourier Transform) funkciója segítségével rajzoltatom meg a jel frekvenciaösszetételét. A MATLAB scriptje valamint az összes mérés eredménye a függelékben megtekinthető.

Ahogy az a 18.1. ábrán, egy példamérés látható. A **narancssárga** görbe ábrázolja a mintavételi pontokat (csupán jelalakra és nem értékre pontosan), az alsó **kék** görbe pedig a mintavételi pontokból képzett jel frekvenciaösszetételét (spektrumát) mutatja meg. Az példaként bemutatott esetben egy 1000Hz-es, 4V peak-to-peak és 2,5V offset feszültégű szinuszos jelet adtam a lebomló és FR4-es hordozókon létrehozott mikrokontrollerek bemeneteire. A vártnak megfelelően a frekvencia spektrumon kiugró érték látható 1000Hz-nél, valamint a mintavételezés szabályainak megfelelően 7800Hz-nél is. Látható, és általános tapasztalata a kísérletnek, hogy a mintavételi adatokból, a hordozótól függetlenül meglehetősen pontos és egymástól nem eltérő eredményeket kaptam. Megállapítom tehát, hogy a funkció szempontjából az analóg áramköri elemzés sem mutatott ki különbségeket. Az eredmények ismeretében elmondható, hogy a vizsgált áramkörök hordozóinak különbözősége az általam vizsgált frekvenciatartományon belül nem okoz jeltorzulást.



18.1. ábra: Példamérés eredménye.

19. Fenntarthatósági kérdések:

A munka során áramkörtervező szoftver segítségével megállapítottam, hogy a szubsztrát a térfogat szerint ~95 térfogat%-ot (vol%), a tömeg szerint pedig ~90 tömegszázalékot (wt%) tesz ki az áramkör szerkezetben. Ez azt jelenti, hogy az FR4-alapú NYÁK-ban ezek az arányok magához az epoxi-üvegszál kompozithoz tartoznak, amelyet nehéz és nem környezetbarát feldolgozni, amikor hulladékká válik. A tanulmányozott anyagunk teljesen helyettesíti ezt a kompozitot a fenti mennyiségi jellemzéssel.

Ezek a számok valóban egy diszruptív, forradalmi változásra utalnak az e-hulladék hatásában és fenntarthatóságában, és a jelenlegi eredmények (bár csak 2 rétegű PCB-vel) javulást jelentenek a (Khrustalev et al., 2022) által bemutatott ~70%-os értékekhez képest. Várható, hogy a vol% és wt% értékek (a PCB vastagság megtartása mellett) a rézrétegek mennyiségének növelésével (pl. 4-6 réteg) csökkenni fognak.

Az ENSZ fenntarthatósági céljai (SDG, Sustainability Development Goal pontok)(19.1. ábra) alapján [18] leginkább a 9-es ponthoz (ipar, innováció és infrastruktúra) kapcsolódik a kutatás, mivel mindhárom fogalom mentén fenntarthatóságra törekszünk, azonos gyártóinfrastruktúrák mellett. Emellett az E-hulladék drasztikus csökkentése a 12-es SDG pontot erősíti (felelős fogyasztás és termelés), tovább görgetve a fogyasztói oldal vonzó mivoltát ("zöld elektronika"), és a termelés alapanyaghasználatának felelős mivoltát, ami a 13-15 SDG pontokig kihathat több mindenre (13. Fellépés az éghajlatváltozás ellen, 14. Óceánok és tengerek védelme, 15. Szárazföldi ökoszisztémák védelme). Amennyiben az Arduino eszközt oktatási célra vetnénk be, úgy a 4-es pont (Minőségi oktatás) is szintet léphetne. Az eszköz ugyanis elképzelhető tantermi körülmények között, közép- és felsőoktatási intézményekben, mint zöld-elektronika demonstrátor, egy érzékeny és fogékony célközönséget megcélozva.



19.1. ábra: ENSZ fenntarthatósági célok. [PIC_5]

20. Összegzés:

Végeredményben a kutatás eredményét sikeresnek ítélem meg, hiszen egyfelől sikerült létrehozni egy működő panelt a már megismert természetes eredetű és biológiailag lebomló kompozit hordozón. Képesek vagyunk program futtatására a megépített panel által. Másfelől az áramkör elkészítése során rengeteg tapasztalat gyűlt össze, melyek által folyamatosan optimalizálni, fejleszteni lehetett a kutatás lépéseit.

Az egyik fő megállapításként elmondható, hogy a hagyományos FR4-alapú (üvegszálás, epoxigyanta) lapok helyettesítésével a mi hordozónkkal a teljes NYÁK mintegy 90%-os térfogat- és tömeghányadát fenntartható, környezetbarát, természetes forrásból származó és biológiailag lebomló alternatívára lehetne cserélni, ami a NYÁK-ok általunk ma ismert e-hulladék hatását tekintve a szakirodalom által többször is diszruptív, forradalmi mértékű változást mutattam be.

A jövőben a réz és az alkatrészek szétválasztása lehetővé tenné a nem lebomló alkatrészek könnyebb visszaforgatását. Az anyag alkalmazásával a *Ryan (2023) [8]* által bemutatott FR4 e-hulladék ökológiailag igényes feldolgozása átállítható lenne környezetbarátabb megoldásokra, teljesen lebomló hordozóval.

A fő ellenérv a technológia alkalmazásával szemben a kissé csökkent minőség és megbízhatóság, a környezetállóság gyenge mivolta. Ezeket a tényezőket még tovább kell vizsgálni, azonban az eredmények javítanak az irodalomban található legtöbb hasonló munkán, elkerülve a vízoldhatóságot (*Arroyos et al. (2022)[21]*), és fenntartva a lebonthatóságot és a stabilitást.

A munka eredményei egy jelenleg beadott EU Horizon Pathfinder pályázati anyagban is megjelennek, amely pályázat célja a TRL4-es/TRL5-ös (Technological Readiness Level, technológiai készültségi szint: TRL4-5 laboratóriumban validált technológia, pilot teszt) megvalósítása a fenti koncepciónak. A jelenlegi kihozatal (10-50% a nyákgyártásnál, 30% a szerelésnél) nem elég a tömeggyártáshoz, de a TRL3-4 szintet már eléri.

21. Szakirodalom, források:

[1] <https://www.statista.com/statistics/1067081/generation-electronic-waste-globally-forecast/>

[2] <https://theroundup.org/global-e-waste-statistics/>

[3] Kang Liu, Quanyin Tan, Jiadong Yu, Mengmeng Wang: A global perspective on e-waste recycling

[4] Biswajit Debnath, Priyankar Roychowdhury, Rayan Kundu: Electronic Components (EC) Reuse and Recycling – A New Approach towards WEEE Management

[5] Devin N. Perkins BS, Marie-Noel Brune Drisse MS, Tapiwa Nxele MS, Peter D. Sly MD: E-Waste: A Global Hazard

[6] Brundtland-report: Our Common Future (Brundtland-jelentés: Közös jövőnk)

[7] Khrustalev, D., Tirzhanov, A., Khrustaleva, A. et al. 2022. A new approach to designing easily recyclable printed circuit boards." Sci Rep 12, 22199. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26677-y>

[8] Yvonne Ryan-Fogarty, Cornelis Peter Baldé, Michelle Wagner, Colin Fitzpatrick: Uncaptured mercury lost to the environment from waste electrical and electronic equipment (WEEE) in scrap metal and municipal wastes (2023)

- [9] Schramm, R., Reinhardt, A., Franke, J. 2012. Capability of biopolymers in Electronics Manufacturing. 2012 35th International Spring Seminar on Electronics Technology [Preprint]. <https://doi.org/10.1109/isse.2012.6273157>
- [10] Mattana, G., Briand, G., Marette, A., Vásquez Quintero, A., de Rooij, N. F. 2015. Polylactic acid as a biodegradable material for all-solution-processed organic electronic devices. *Organic Electronics*, 17, pp. 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2014.11.010>
- [11] Henning, C. et al. 2020. Realization of double-sided wiring boards of biopolymer. 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE) [Preprint]. <https://doi.org/10.1109/isse49702.2020.9121011>
- [12] Hong, F., Myant, C., Boyle, D.E. 2021. Thermoformed circuit boards: Fabrication of highly conductive freeform 3D printed circuit boards with heat bending. *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* [Preprint]. <https://doi.org/doi:10.1145/3411764.3445469>
- [13] Larguech, S., Triki, A., Ramachandran, M. et al. 2021. Dielectric Properties of Jute Fibers Reinforced Poly(lactic acid)/Poly(butylene succinate) Blend Matrix. *J Polym Environ* 29, 1240–1256. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01927-0>
- [14] Kumar, V., Gupta, M. 2021. Comparative study of different natural fibre printed circuit board (PCB) composites. *Materials Today: Proceedings*, 44, pp. 2097–2101. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.182>
- [15] Yedrissov, A., Khurstalev, D., Alekseev, A., Khurstaleva, A., Vetrova, A., 2022. New composite material for biodegradable electronics. *Materials Today: Proceedings*, 49, pp. 2443–2448. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.053>
- [16] Bharath, K.N., Puttegowda, M., Yashas Gowda, T.G. et al. Development of banana fabric incorporated polymer composites for printed circuit board application. *Biomass Conv. Bioref.* (2023). <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04249-y>
- [17] Sudheshwar A., et al, Assessing sustainability hotspots in the production of paper-based printed electronics , 2023 *Flex. Print. Electron.* 8 015002
- [18] Sudheshwar A., Malinverno N., Hischier R., Nowack B., Som C., The need for design-for-recycling of paper-based printed electronics – a prospective comparison with printed circuit boards, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 189, February 2023, 106757
- [19] Kovács, B., Géczy, A., Horváth, G., Hajdu, I., Gál, L. 2016. Advances in Producing Functional Circuits on Biodegradable PCBs. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 60(4), pp. 223–231, 2016. <https://doi.org/10.3311/PPee.9690>
- [20] Li, J., Liu, J., Lu, W., Wu, Z., Yu, J., Wang, B., Ma, Z., Huo, W., Huang, X. 2021 Water-sintered transient nanocomposites used as electrical interconnects for Dissolvable Consumer Electronics.” *ACS Appl. Mater. Interfaces*. <https://doi.org/10.1021/acsmi.1c07102.s001>
- [21] Arroyos, V., Viitaniemi, M. L. K., Keehn, N., Oruganti, V., Saunders, W. Strauss, K., Iyer, V., Nguyen, B. H. 2022. A tale of two mice: Sustainable electronics design and Prototyping.” *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems Extended Abstracts* [Preprint]. <https://doi.org/10.1145/3491101.3519823>

[PIC_1] <https://www.jivamaterials.com/technology/>

[PIC_2] <https://lucept.com/2019/07/02/jiva-materials/>

[PIC_2] <https://hackaday.com/2013/12/13/3d-printed-solderless-circuits/>

[PIC_2] <https://laserdepaneling.lpkfusa.com/applications/fr4-materials>

[PIC_2] <https://www.ajbh.hu/-/enz-fenntarthato-fejlodesi-celok-sustainable-development-goal-sdg->

22. Köszönetnyilvánítás:

Ezúton szeretnék köszönetet mondani **Dr. Berényi Richárdnak**, a BME ETT tanszék egyetemi docensének, hogy heti rendszerességgel, sok idejét rászánva, lehetőséget biztosított a laboratóriumi munka végzésére. Ötletei, szakmai tanácsai, meglátásai, valamint a feladatok elvégzésében nyújtott rengeteg segítsége nélkül talán meg sem valósulhatott volna ez a kutatási munka.

Köszönöm **Kovács Róbertnek**, az EFI-Labs mérnökének, hogy segítségemre volt a HAST kamra kezelésében.

Az alapanyag szolgáltatásáért köszönet a **Meshlin (Csiszár András)** munkájáért és támogatásáért. Az alapanyag szubsztrátjának szubtraktív kialakításáért az **UniPCB Kft.** munkatársainak mondok köszönetet.

23. Függelék:

23.1. Általános teszt program kódja:

```
double meas_true;
double meas_8bit;
int time = 0;

void setup() {
  pinMode(11, OUTPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(A0, INPUT);
  digitalWrite(11,0);
  digitalWrite(13,0);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  delay(1000);
  if(time == 14)
  { pinMode(13, OUTPUT);
    digitalWrite(13,1);}
  else if(time == 15)
  { time = 0;
    pinMode(13, INPUT);}
  meas_true=analogRead(A0)/1024.0*5;
  meas_8bit=analogRead(A0)/1024.0*255;
  analogWrite(11,(int)meas_8bit);
  Serial.println(meas_true);
  time++;}
```

23.2. FFT-t ábrázoló MATLAB script:

```
A=[ ] % 300 elemű mintatároló vektor
Y=fft(A)
Fs = 8800;
k = 300
plot(Fs/k*(0:k-1),abs(Y),Fs/k*(0:k-1),(A+500)*100,"LineWidth",1)
grid on;
```

23.3. Mintavevő program kódja:

```
void setup() {
  pinMode(A1,INPUT);           //Bemenet konfigurálása
  //pinMode(A1,INPUT_PULLUP); //Bemenet konfigurálása
  Serial.begin(9600);
  pinMode(13,OUTPUT);
  digitalWrite(13,0);
  delay(200);
  for(int i = 0;i<3;i++){      //Program futásának kezdeté jelző ciklus
    digitalWrite(13,1);
    delay(100);
    digitalWrite(13,0);
    delay(100);
  }
}
void loop() {
  int meret = 300;            //Minták számának meghatározása
  int fesz[meret];           //300 elemű tömb a mintavétel eredményeinek

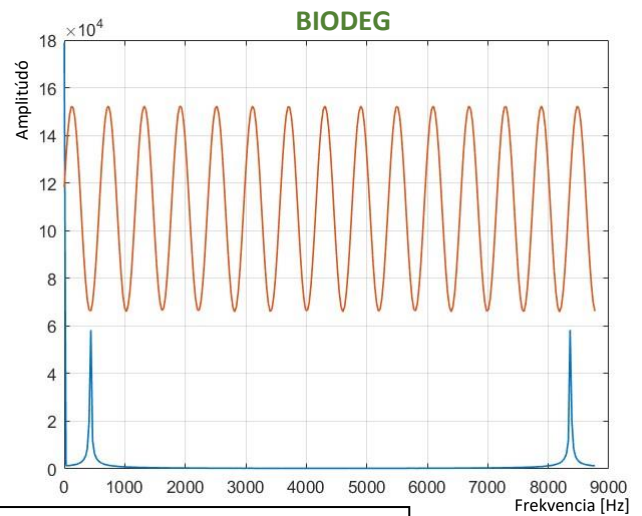
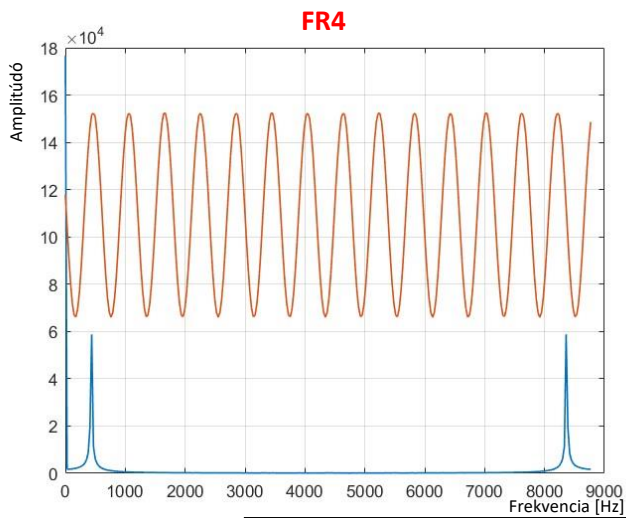
  for(int i = 0;i<meret;i++){
    fesz[i]=analogRead(A1);   //Mintavételezés
  }

  for(int i = 0;i<meret;i++){
    Serial.println(fesz[i]); //Eredmények plot kompatibilis kiírása
  }
  Serial.println("");
  Serial.print("A=");
  for(int i = 0;i<meret;i++){ //Eredmények kiírása MATLAB vektorként

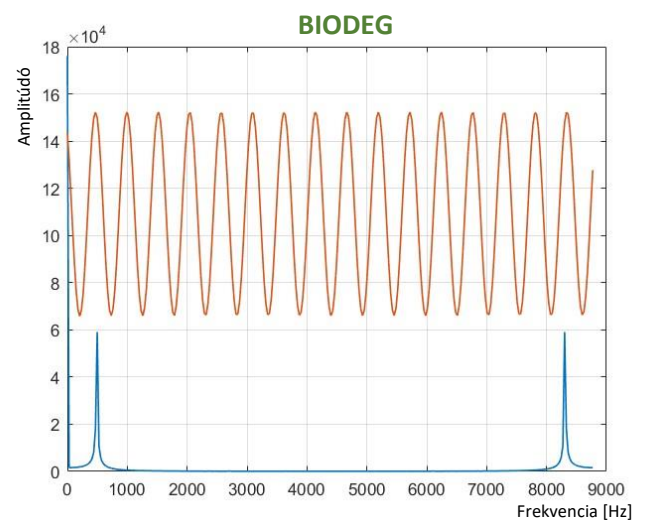
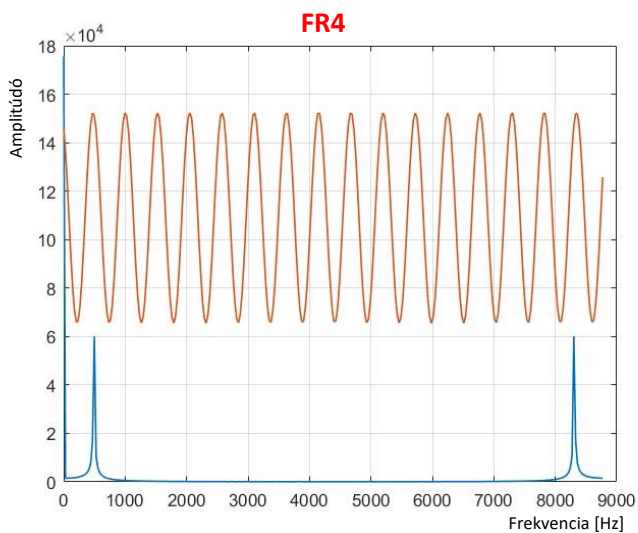
    Serial.print(fesz[i]);
    Serial.print(" ");
  }
  Serial.println("]");

  digitalWrite(13,1);        //Program vége jelzőled
  while(1){}
}
```

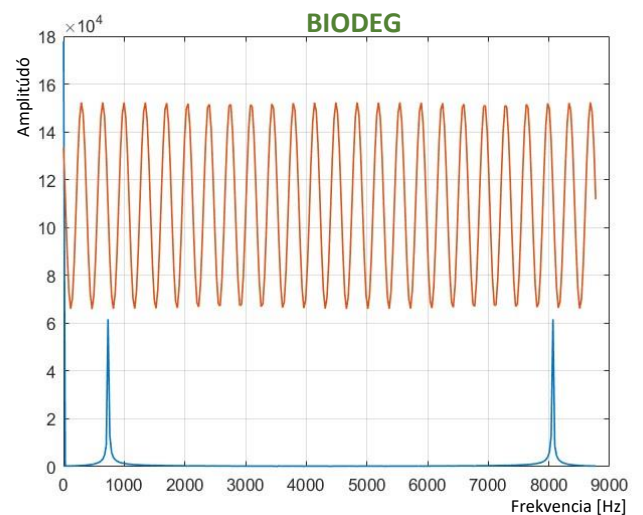
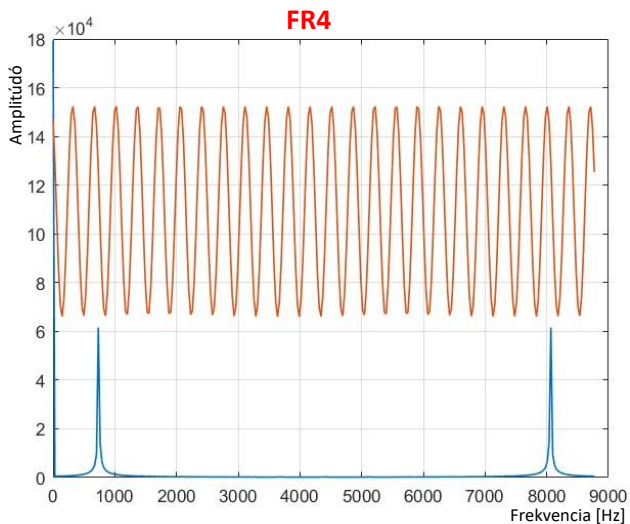
23.4. FFT elemzés képei:



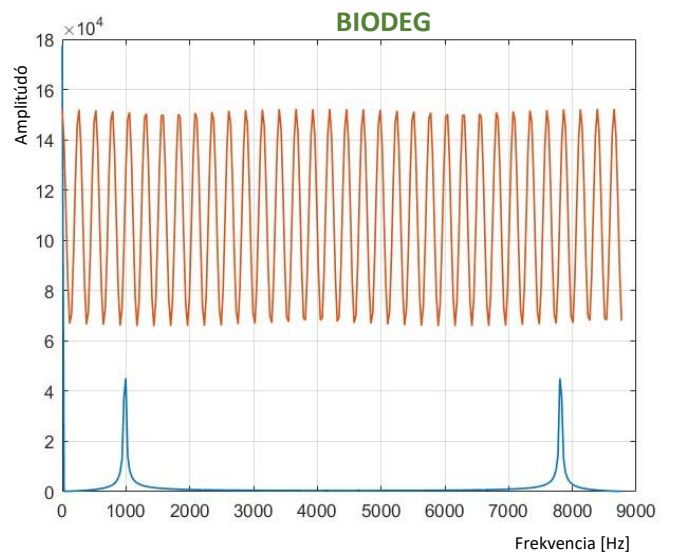
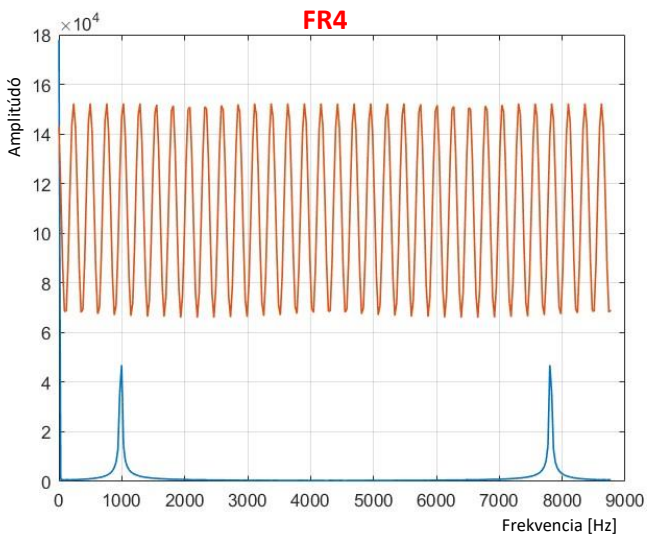
1. 440Hz 4Vpp, 2.5V_off, SIN



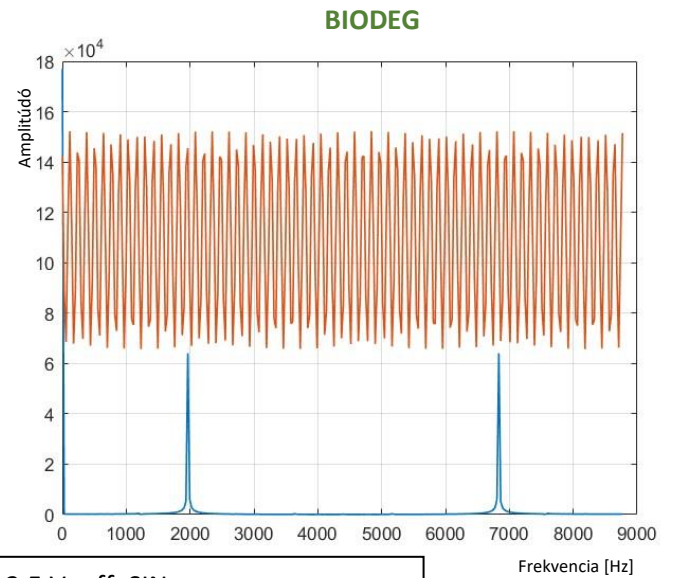
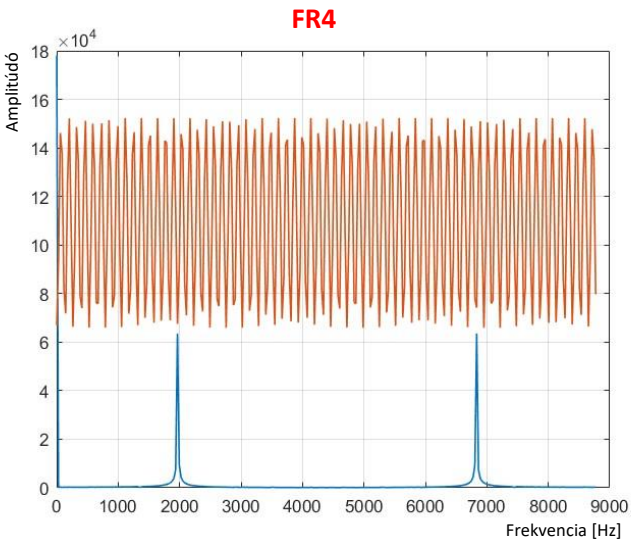
2. 500Hz 4Vpp, 2.5 V_off, SIN



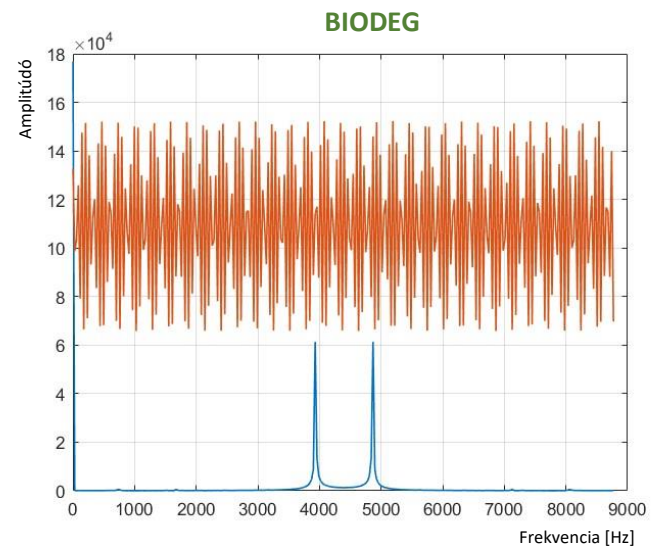
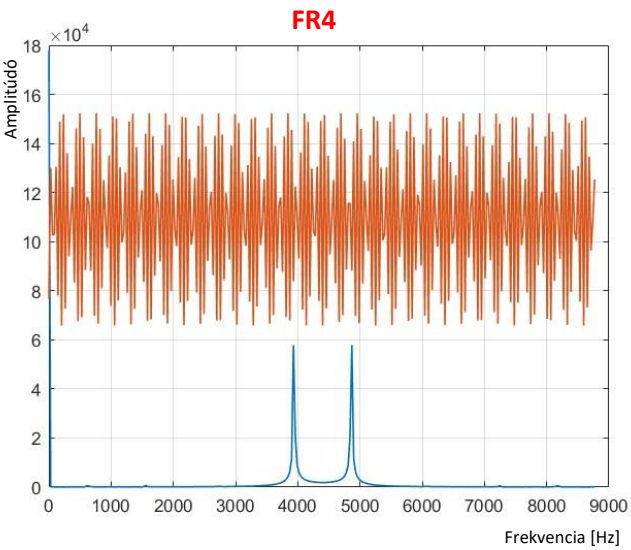
3. 750Hz 4Vpp, 2.5 V_off, SIN



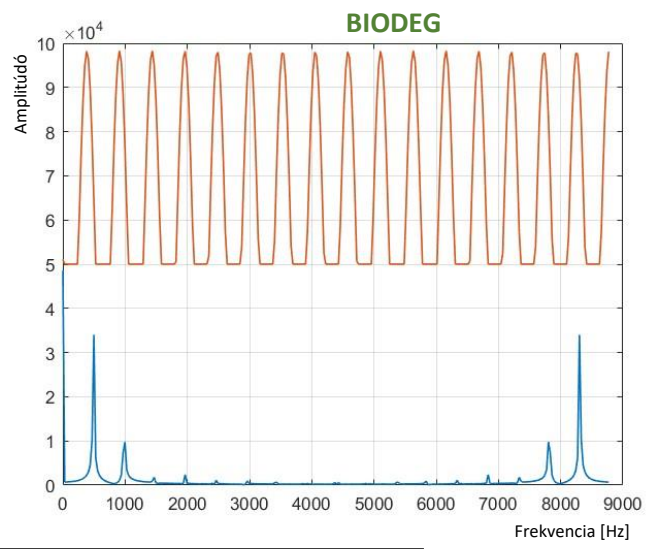
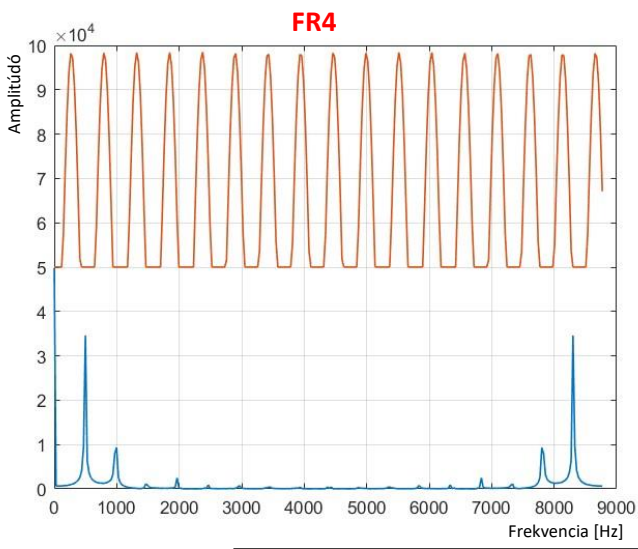
4. 1000Hz 4Vpp, 2.5 V_{off}, SIN



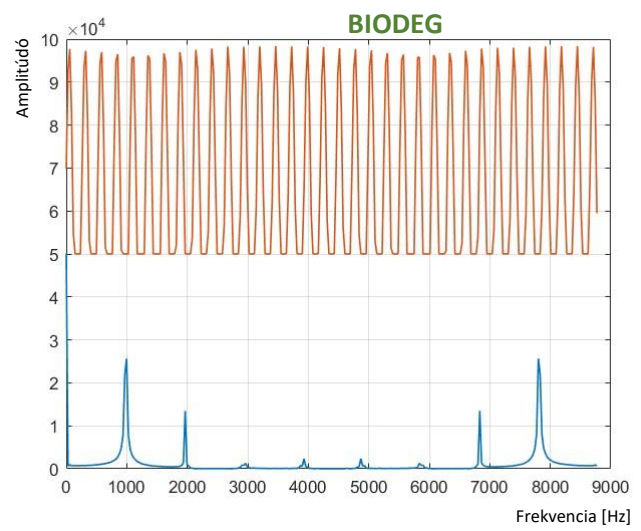
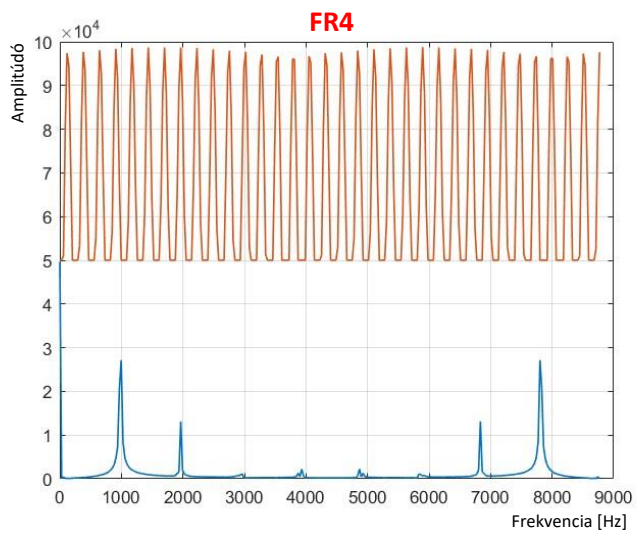
5. 2000Hz 4Vpp, 2.5 V_{off}, SIN



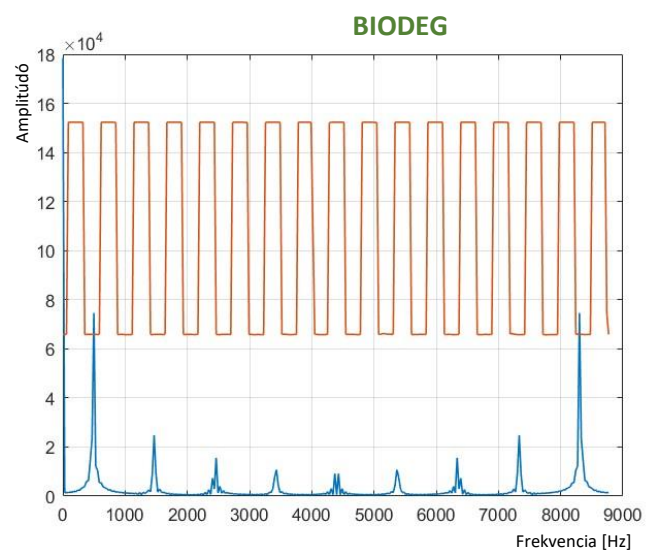
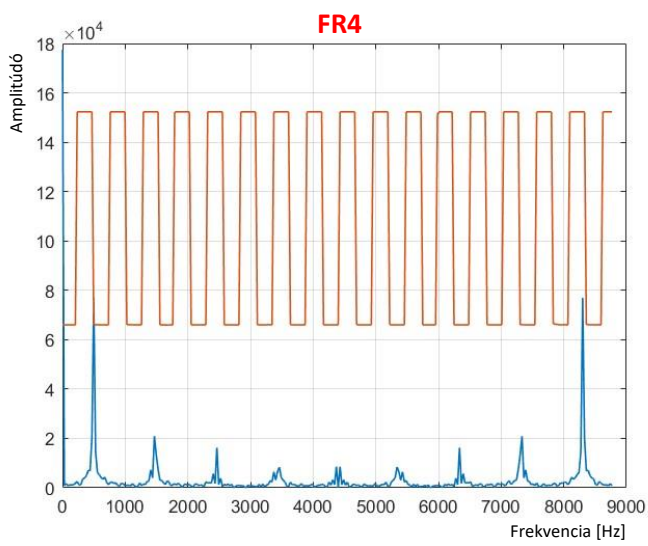
6. 4000Hz 4Vpp, 2.5 V_{off}, SIN



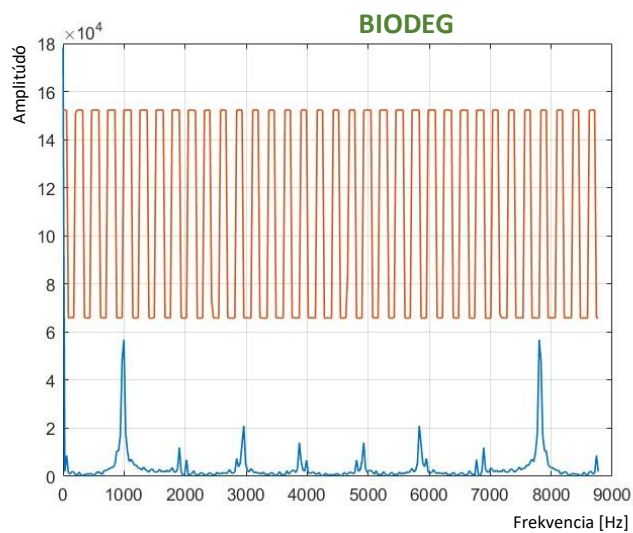
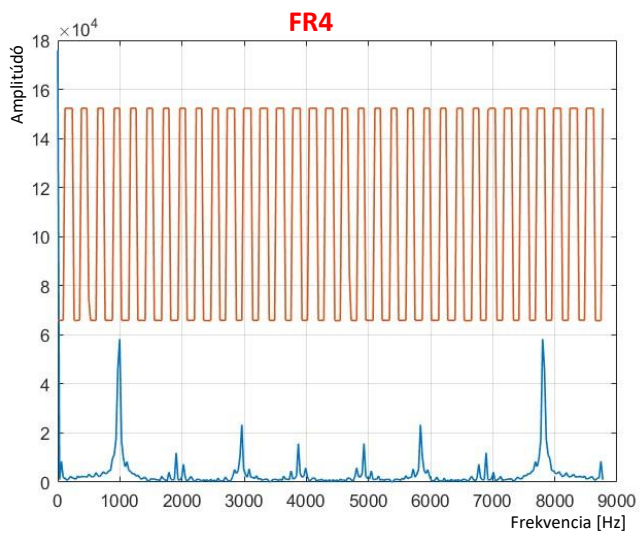
7. 500Hz 4Vpp, 0 V_off, SIN



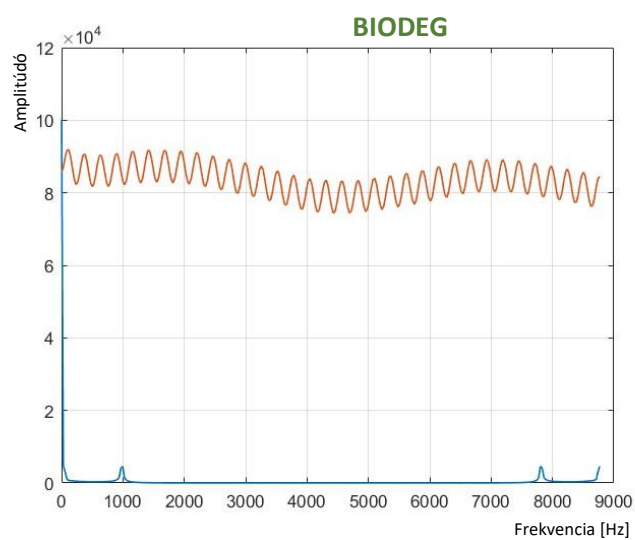
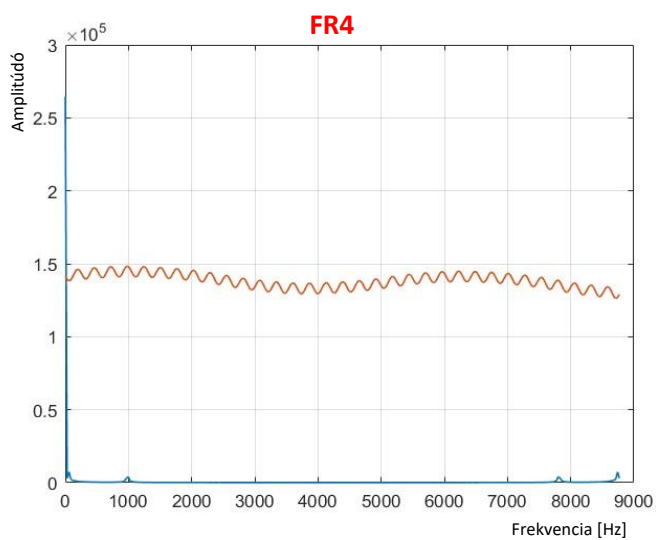
8. 1000Hz 4Vpp, 0 V_off, SIN



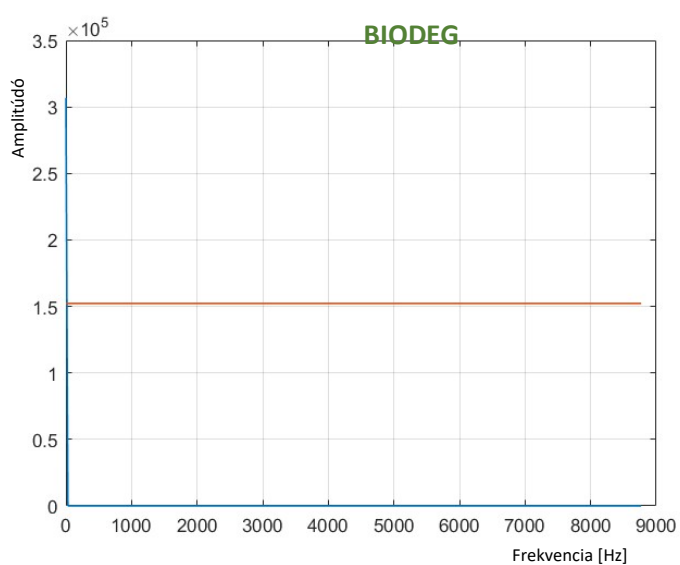
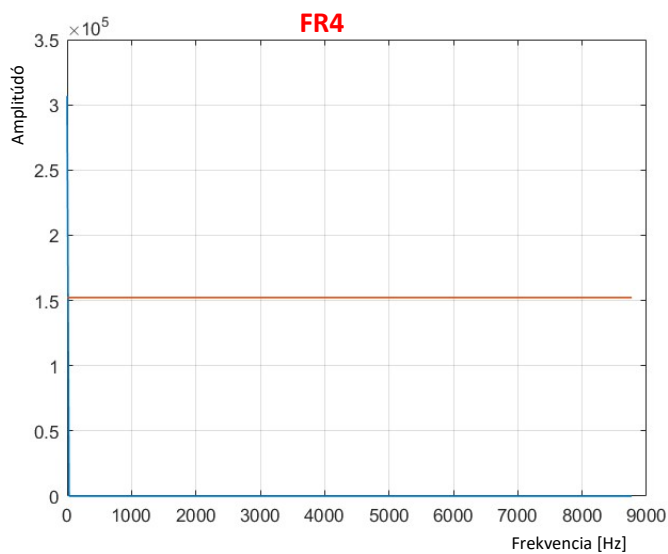
9. 500Hz 4Vpp, 2.5 V_off, SQUARE



10. 1000Hz 4Vpp, 2.5 V_{off}, SQUARE



11. 1000Hz 4Vpp, 2.5 V_{off}, SIN, A0-->SIGNAL-IN



12. 1000Hz 4Vpp, 2.5 V_{off}, SIN, A0-->SIGNAL-IN, PULLUP