

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Szabó Mihály

**Nagyfeszültségű tápegység fejlesztése gamma spektrométerhez**

Konzulens

Dr. Balogh Attila

BUDAPEST, 2023

Tartalomjegyzék

[1 Specifikáció 3](#_Toc152569460)

[2 Fizikai háttér 5](#_Toc152569461)

[3 Hardver 6](#_Toc152569462)

[3.1 Flyback konverter 7](#_Toc152569463)

[3.2 Kisfeszültségű tápegység 10](#_Toc152569464)

[3.3 Mikrokontrolleres vezérlés 11](#_Toc152569465)

[4 PCB tervezés 12](#_Toc152569466)

[5 Szoftver 13](#_Toc152569467)

[5.1 Perifériák konfigurálása 13](#_Toc152569468)

[5.2 Kisfeszültségű tápegység vezérlése 15](#_Toc152569469)

[5.3 Nagyfeszültségű tápegység vezérlése 15](#_Toc152569470)

[6 Mérési eredmények 16](#_Toc152569471)

[6.1 Kisfeszültségű tápegység 16](#_Toc152569472)

[6.2 Nagyfeszültségű tápegység 19](#_Toc152569473)

[7 Irodamoljegyzék 20](#_Toc152569474)

# Specifikáció

Feladatomnak azt választottam, hogy egy gamma spektrométer detektorául szolgáló fotoelektronsokszorozó cső tápegységét készítem el. Az ötlet onnan ered, hogy a BSc szakdolgozatom alatt egy (bár más detektorral) gamma spektrométert fejlesztettem és a bemérés során a Nukleáris Technika Intézettől sikerült egy nagyobb már selejtezésre ítélt fotoelektronsokszorozós detektort szereznem.

A képen fedett pályás, padló, fal, Padlóburkolat látható

Automatikusan generált leírás

‑. ábra A detektor

A detektor szétszedése után arra a következtetésre jutottam, hogy a főbb alkotóelemek: a szcintillátor és a fotoelektronsokszoró cső (PMT) épek, rajtuk külső sérülés nem látható, így csak az elektronikát kell lecserélni. A feladatot bonyolítja, hogy fotoelektronsokszoró csőről nem találtam elérhető adatlapot így a specifikáció során a tápegység paramétereit viszonylag széles tartományon kellett meghatározni, valamint biztosítani kell, hogy a kimenő feszültség könnyen állítható legyen ezzel megkönnyítve a detektor élesztését.

A különböző gyártók által rendelkezésre bocsájtott adatlapokat böngészve a nagyfeszültségű tápegység specifikációit az alábbiakban határoztam meg:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

A nagyfeszültségű tápegység mellett a mérőkártyán elhelyeztem a szakdolgozatban használt kisfeszültségű tápegység módosított verzióját is. Ennek specifikációja az alábbi:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

A két tápegység felhelyezésének oka, hogy Diplomatervezésnek szeretném a szakdolgozat alatt készített spektrométert továbbfejleszteni.

# Fizikai háttér

Az ionizáló sugárzások mérésére több módszer is létezik, az általam birtokolt detektorok mind szcintillációs elven működnek. A szcintilláció során a radioaktív bomlás során létrejövő γ fotonokat rövid kis intenzitású fényimpulzusokká alakítjuk, majd ennek intenzitását erősítjük és elektromos jellé alakítjuk.

A fotoelektronsokszorozó-csőben ezeket a szcintillátorról beérkező fotonokat a fotokatód fotoelektronokká alakítja. Ezek a fotoelektronok kis számuk miatt detektálásra alkalmatlanok, ezért dinódák segítségével megsokszorozzák őket. Ezek után az anód kivezetésre kerülnek, ahol már mérhető (bár még mindig igen kicsi) áramjelek lesznek.

Ahhoz, hogy a dinódák a fotoelektronokat megsokszorozzák, nagy feszültséget kell rájuk kapcsolni, ezért igényelnek (típustól függően) 800-2000V közötti tápfeszültséget. [1]

A képen szöveg, képernyőkép, Betűtípus, Grafika látható

Automatikusan generált leírás

‑. ábra Fotoelektronsokszorzó felépítése és működése [2]

# Hardver

Ebben a fejezetben áttekintem a rendszer hardveres felépítését, majd a megvalósításhoz szükséges hardveres elemeket. A kapcsolási rajz elkészítésekor az egyes részeket a funkciójuk szerint külön-külön lapokon helyeztem el, ezzel biztosítva a jobb áttekinthetőséget. A részegységek az alábbiak:

* Mikrokontrolleres vezérlés
* Flyback konverter
* Lineáris tápegység
* Tesztterhelés
* Csatlakozók a külvilág felé



## Flyback konverter

A kimeneti nagyfeszültség előállítására flyback konvertert fogok használni. Azért a Flyback topológiát választottam, mivel egyszerű kevés alkatrész felhasználásával elkészíthető. A konverter felépítéséből adódó galvanikus elválasztást nem fogom igénybe venni az egyszerűség kedvéért a primer és a szekunder földje meg fog egyezni. Ebből logikusan következne, hogy ha nincs galvanikus leválasztás nyugodtan használhatnánk egy egyszerűbb boost kapcsolást is. Ez viszont csak elméletileg lenne kivitelezhető, mivel a gyakorlatban boost kapcsolással 3 nagyságrenddel nagyobb kimeneti feszültséget nem tudnánk előállítani.

A klasszikus flyback áramkört a további részegységekkel egészítettem ki:

* Bemeneti feszültség és árammérés
* Flyback kapcsolóelemének meghajtófokozata
* Flyback kimenetén egy feszültségkétszerező kapcsolás

Transzformátornak a Coilcraft által gyártott FL2810-et választottam. Ennek paraméterei (kis méret, nagy menetáttétel) ideálissá teszik erre az alkalmazásra. Egyetlen egy probléma, hogy a szekunder oldali maximális feszültség (1500V) kisebb mint a specifikációban előírt kimeneti feszültség. Ezt úgy küszöböltem ki, hogy a transzformátor kimenetén egy feszültség kétszerezőt helyeztem el. Így a konverterünk kimeneti feszültségének csak fele akkorának kell lennie mint a specifikációban meghatározott kimeneti feszültség, viszont a konverter kimeneti áramának kétszer nagyobbnak kell lennie mint a specifikációban szereplő. Az alkatrészek kiválasztásához először pár értéket ki kell számolnunk, ezek az alábbiak: kimeneti áram, kimeneti feszültség, kimeneti kapacitás, maximális diódafeszültség, maximális kapcsolóáram és feszültség valamint a hatásfok:



‑. ábra Hatásfok a terhelés függvényében

A bemeneti feszültségmérést egy egyszerű feszültségosztóval oldottam meg kiegészítve egy Zener diódával, ami megvédi a mikrokontroller A/D bemenetét abban az esetben amennyiben a bemeneti feszültség túl magas lenne.

A flyback konverter árammérését az INA180 magasoldali árammérő integrált áramkörrel oldottam meg. Az áramkör altípustól függően különböző fix erősítéssel (ez esetemben A=50) rendelkezik és analóg kimenetet szolgáltat, amit a mikrokontroller A/D átalakítójával fogok mintavételezni. A flyback konverternél végzett számításokból látható mekkora áram fog várhatóan átfolyni a sönt ellenálláson. Ezeket figyelembe véve a sönt ellenállás értékét 100mΩ-nak méreteztem.

A FET meghajtó áramkört egy-egy NPN és PNP tranzisztor alkotja amit a mikrokontroller által előállított PWM jel vezérli.



‑. ábra FET meghajtó áramkör

A FET\_DRV jel logikai magas szintje alatt a T1 tranzisztor kinyit, így a T2 MOSFET Gate lába ~9V-ra kerül. Logikai alacsony szintnél T3 tranzisztor kinyit és T1 zár, így a Gate-et földre húzva. Ennek a megoldásnak az előnye a direkt mikrokontrolleres hajtással szemben, hogy a magasabb VGS feszültség miatt a csatornaellenállás csökken, valamint a MOSFET belső kapacitásai is gyorsabban feltöltődnek illetve sülnek ki ezáltal a be- és kikapcsolási idők csökkenek.



‑. ábra Flyback konverter

## Kisfeszültségű tápegység

A szakdolgozatom alatt használt félvezető alapú fotonsokszorozó tápegységét, hivatott leváltani. A cél itt is egy szoftveresen szabályozható tápegység létrehozása 25-40V közötti feszültségtartományban maximális ~10 mA terhelő áram mellett. Fontos követelmény, hogy a kimeneti feszültség stabilitása minél nagyobb legyen.

Célszerű megvalósítás lehetne egy soros áteresztő tranzisztoros megoldás, viszont a maximális kimeneti áram olyan kicsi, hogy azt akár egy jobb műveleti erősítő is ki tudja adni, így a kapcsolás is egyszerűbb lesz.

A műveleti erősítő neminvertáló bemenetére a mikrokontroller D/A kimenetét kötöm egy aluláteresztő szűrőn keresztül. Az erősítő kimenete és az invertáló bemenet között történik az erősítés állítása. Annak ellenére, hogy a félvezető alapú detektor fogyasztása kicsi szükséges pufferkondenzátorokat elhelyezni, viszont a műveleti erősítők jellemzően ettől begerjedhetnek. A megoldás egy kis értékű soros ellenállás a műveleti erősítő kimenete és a pufferkondenzátorok között. Természetesen a kimeneti feszültséget itt is mérem a mikrokontroller A/D átalakítójával így lehetőségünk van az erősítési hibát futásidőben kompenzálni.



## Mikrokontrolleres vezérlés

A mikrokontroller kiválasztásánál az alábbi szempontokat vettem figyelembe:

* Legalább 4 db 12 bites A/D csatorna legalább 1 us mintavételi idő
* Legalább 1 db 12 bites D/A átalakító
* UART és I2C buszok a vezérléshez
* PWM csatornák

Ezen paraméterek alapján az STM32F301K6T6 típusú mikrokontrollert választottam ami 15 darab A/D csatornával rendelkezik. Egy csatorna konverziós ideje 0.2 us. Rendelkezik egy darab D/A átalakítóval és egy belső komparátorral. A mikrokontrollerben 9 időzítő található, mindegyik képes PWM előállításra. A mikrokontrollert SWD buszon keresztül lehet programozni, ehhez külső programozók az interneten már 1000 Ft-tól beszerezhetőek és használhatók az STMCubeIDE ingyenes fejlesztői környezettel.



# PCB tervezés

Mivel az áramkört egy demonstrációs mérőpanelnek készítem, ezért prioritás volt a minél könnyebb összeszerelhetőség valamint , hogy minél könnyebb legyen a validációs mérések elvégzése. Ebből következően az áramkör minél kisebb méretre való tervezése nem volt prioritás, természetesen az ésszerű mérethatárokat betartva. A megtervezett PCB egy 90\*65 mm-es 2 rétegű panel lett, amit a JLCPCB-től rendeltem meg. A tervezésnél az áramköri rajzolatot megpróbáltam úgy kialakítani, hogy a TOP rétegen legyen az alkatrészek és a vezetősávok nagy hányada, a BOTTOM rétegen pedig nagyrészt egybefüggő föld legyen. Ezen kívül a nagyfeszültségű részegységeknél az alapértelmezett vezetők közti távolságot a 10x értékre emeltem. [3]

A képen szöveg, diagram, Betűtípus, térkép látható

Automatikusan generált leírás

‑. ábra PCB TOP oldal

A képen szöveg, képernyőkép, Grafika, áramkör látható

Automatikusan generált leírás

‑. ábra PCB BOTTOM oldal

# Szoftver

A szoftvert az STMicroelectronics integrált fejlesztői környezetében az STMCubeIDE-ben készítettem el. A szoftver 3 fő komponensből áll, a nagyfeszültséget előállítást vezérlő komponensből, a kisfeszültség előállítást vezérlő komponensből valamint egy kommunikációt biztosító komponensből.

## Perifériák konfigurálása

A perifériák konfigurálását a fejlesztői környezet által biztosított grafikus felületen keresztül lehet elvégezni ezzel a folyamatot jelentősen egyszerűsítve.

A képen szöveg, képernyőkép, szoftver, Számítógépes ikon látható

Automatikusan generált leírás

‑. ábra STMCubeIDE grafikus konfigurációs felülete

A konfiguráció során először a megfelelő óra jelet kell beállítani a mikrokontroller számára, majd a Debug interfész beállítása után már tölthetünk is fel kódot a mikrokontrollerbe tesztelve a működést.

A képen szöveg, diagram, képernyőkép, szám látható

Automatikusan generált leírás

‑. ábra Mikrokontroller órajelhálózatának beállítása

Miután megbizonyosodtunk a helyes működésről elkezdhetjük a perifériák konfigurálását és az általuk elvégzendő funkciók implementálását.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ‑. ábra A/D átalakító konfigurálása | | ‑. ábra D/A átalakító konfigurálása |
|  |  | |

|  |  |
| --- | --- |
| ‑. ábra Timer1 konfigurálása PWM előállítására | ‑. ábra Timer2 konfigurálása 50kHz frekvenciájú megszakítás előállítására |

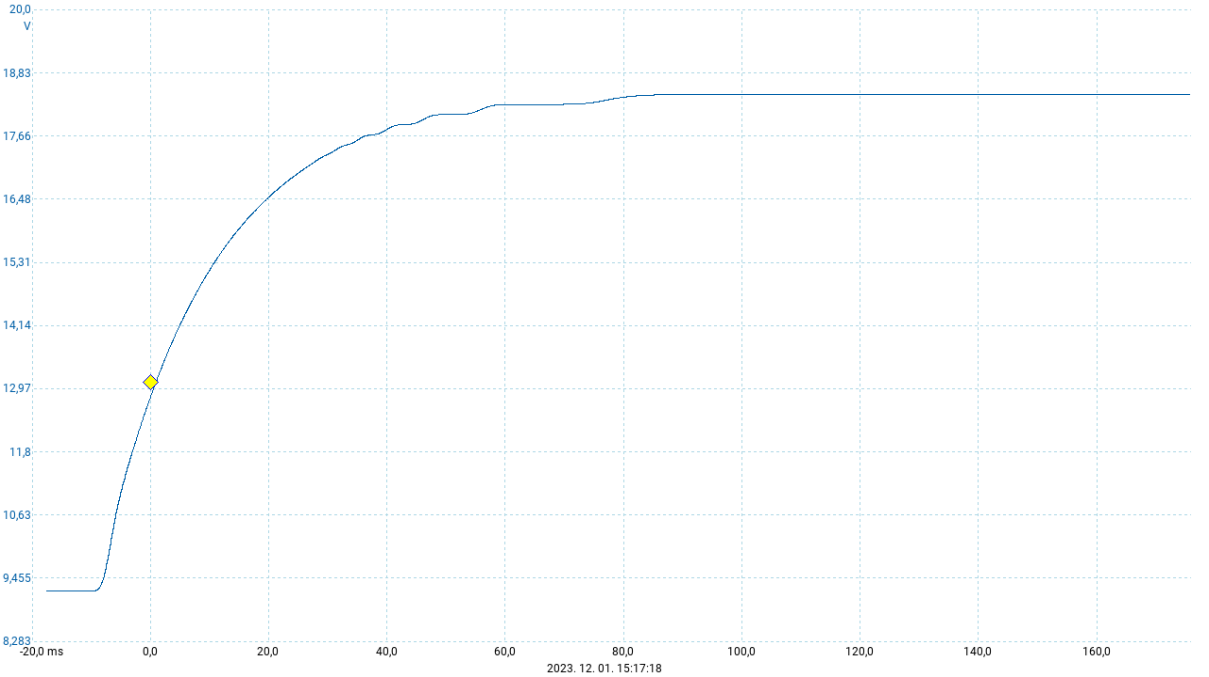
## Kisfeszültségű tápegység vezérlése

## Nagyfeszültségű tápegység vezérlése

# Mérési eredmények

## Kisfeszültségű tápegység

A kisfeszültségű tápegységet 30V-os labortápegységről teszteltem változtatható 1.5kΩ vagy 1kΩ-os terhelésekkel.



‑. ábra Kimenet beállása 1024->2048 kódugrásra

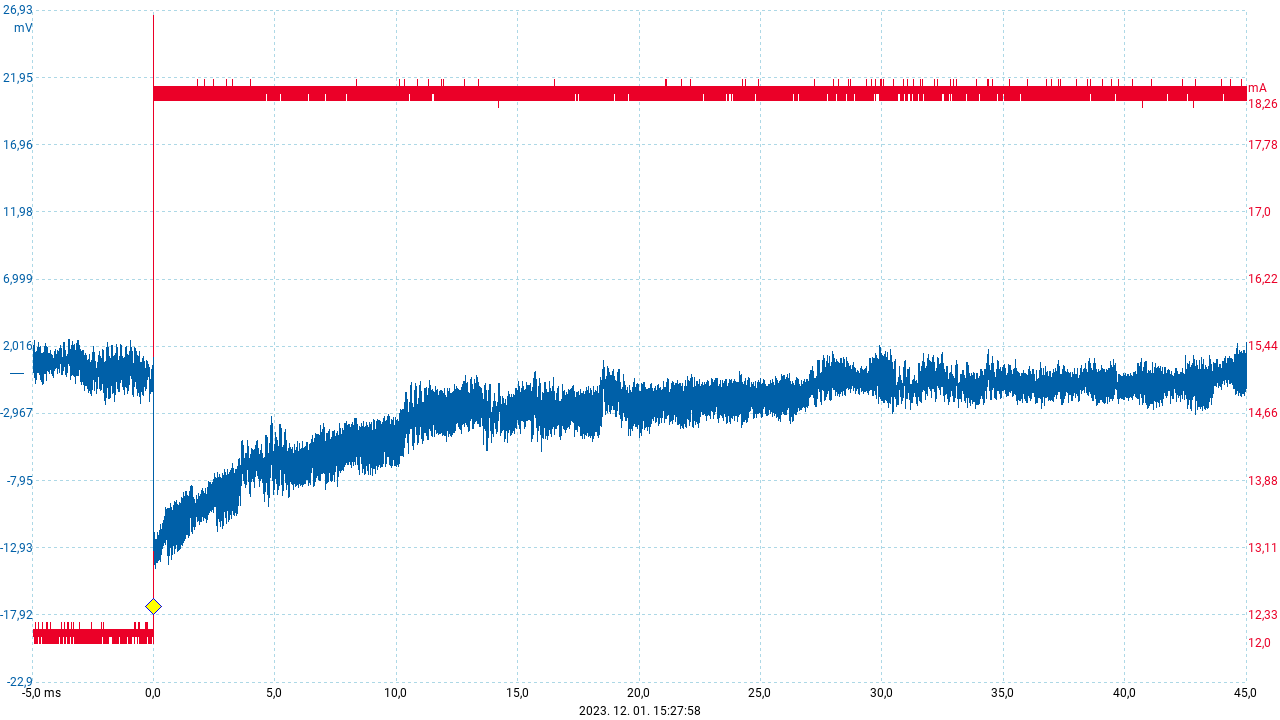


‑. ábra Kimeneti feszültség hisztogram

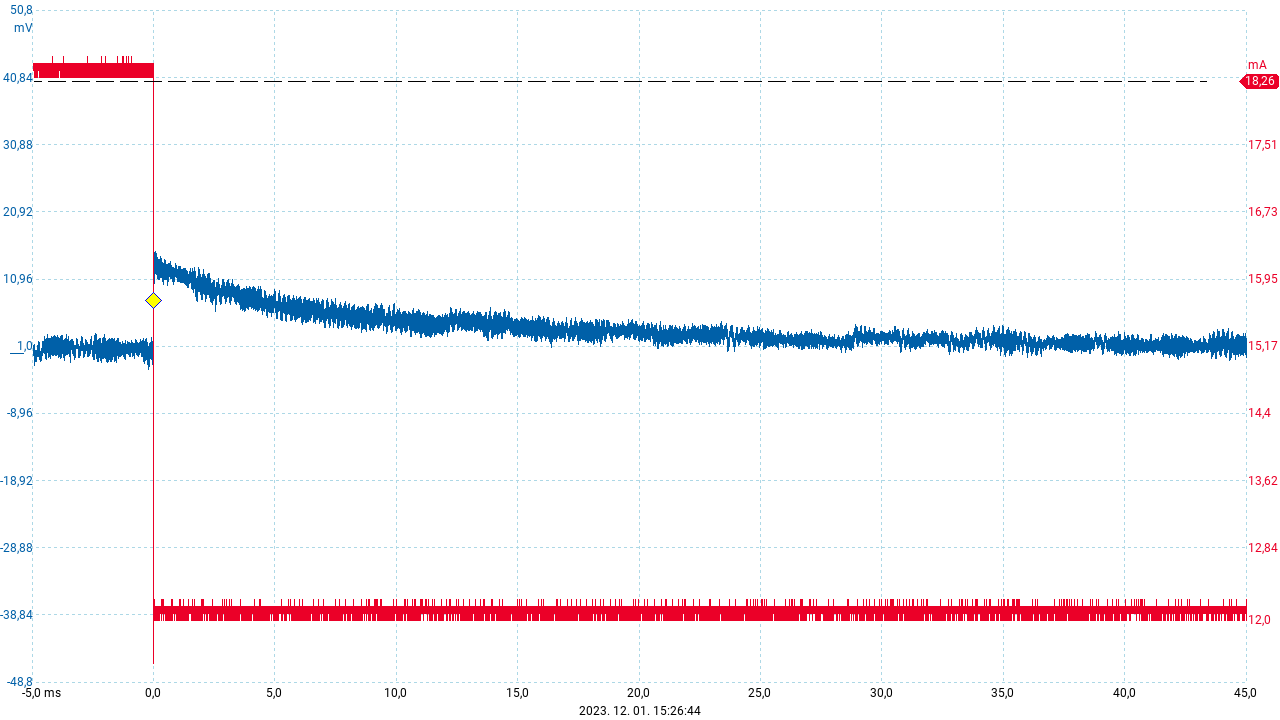


‑. ábra Kimeneti feszültség függése a D/A átalakító kimeneti regiszterének értékétől

Az ábra bal alsó és jobb felső részében tapasztalható nemlinearitást az okozza, hogy a kapcsolás át lett alakítva áteresztő tranzisztoros kapcsolássá a sima műveleti erősítős alapkapcsolás helyett. Valamint a kapcsolás ~40V-os maximális feszültség kiadására lett méretezve, viszont a bemérés során csak egy 30V-os labortápegység állt rendelkezésemre. Viszont a rendelkezésre álló adatokból is látszik, hogy középső szakaszon a feszültség emelkedése lineáris jelleget mutat és nem látható nagy eltérés a különböző terheléseknél sem.



‑. ábra Kimeneti áram(piros) növekedésének hatása a kimeneti feszültségre (kék)



‑. ábra Kimeneti áram(piros) csökkenésének hatása a kimeneti feszültségre (kék)

## Nagyfeszültségű tápegység

# Irodamoljegyzék

1. D. Bódizs, Atommagsugárzások méréstechnikái,  
   Budapest, Typotex, 2006, pp. 95-121. ISBN-13:978-963-9664-31-9
2. Qwerty123uiop, PhotoMultiplierTubeAndScintillator.svg 30. November 2013.. https://tinyurl.com/bddkc85h (2022.11.04)
3. <https://jlcpcb.com/>