

Miskolci Egyetem



GÉPÉSZMÉRNÖKI- ÉS INFORMATIKAI KAR
FIZIKAI ÉS ELEKTROTECHNIKAI INTÉZET

TDK DOLGOZAT

Kis költség, nagy tudomány: Besugárzási tesztek kis költségvetésből
Irradiation tests on a shoe-string budget

KÉSZÍTETTE:

Biró Dóra

villamosmérnök szakos hallgató

BELSŐ KONZULENS:

Prof. Dr. Paripás Béla

egyetemi tanár

KÜLSŐ KONZULENS:

Dr. Kardos Ádám

Miskolc, 2024.

Eredetiség nyilatkozat

"Alulírott Bíró Dóra, a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának hallgatója büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és aláírással igazolom, hogy ezt a dolgozatot saját magam készítettem, a benne leírt vizsgálatokat — ha ezt külön nem jelzem — magam végeztem el, és az ismertetett eredményeket magam értem el. Adatokat, információkat csak az irodalomjegyzékben felsorolt forrásokból használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Miskolc, 2024. április 11.

Bíró Dóra

a hallgató aláírása

A konzulens nyilatkozata

Alulírott, DR. PÁRIPKÓ SÉLIA a Miskolci Egyetem Fizikai és Elektrotechnikai Intézetének oktatója a „Kis költség, nagy tudomány: Besugárzási tesztek kis költségvetésből” című TDK dolgozatot beadásra alkalmasnak ítélem.

Miskolc, 2024. április 13.

Párípkó S.
a konzulens aláírása

TARTALOMJEGYZÉK

Ábrajegyzék	6
Táblázatjegyzék.....	8
Rövidítések.....	9
Rezümé.....	10
Bevezetés.....	11
Ionizáló sugárzási környezetek	12
Sugárzásálló, sugárzástűrő és kereskedelmi forgalomban elérhető elektronikai technológiák	16
Az ionizáló sugárzás hatásai az elektronikában	18
A teljes ionizáló dózis – TID	18
Teljes ionizáló dózis mérése	22
Diszlokációs kár és egyszeri események hatásai	23
Az alkalmazott forrás bemutatása	26
Saját TID mérő rendszer fejlesztésének fázisai.....	29
Hardver tervezés	29
Szoftver tervezés.....	31
A kiválasztott komponensek és elvégzett mérések	38
Feszültségforrás IC-k.....	39
Lineáris feszültségszabályozó	39
Szinkron feszültségcsökkentő.....	41
Teljesítményelektronikai komponensek	43
N-csatornás MOSFET.....	43
Nagyteljesítményű FET-meghajtó	45
Kommunikációs-interfész IC: RS-485 adó-vevő	46
Mikrovezérlő	47
Költségvetések összegzése	49
Összefoglalás.....	50

A Függelék	51
A.1 Függelék: A TID mérés folyamatábrája	51
A.2 Függelék: Az SBC-n futó szoftver folyamatábrája.....	52
B Függelék	53
B.1 Függelék: A mikrovezérlő kapcsolási rajza	53
B.2 Függelék: LDO feszültségszabályozó kapcsolási rajza	54
B.3 Függelék: N-csatornájú MOSFET kapcsolási rajza	55
B.4 Függelék: DC-DC feszültségcsökkentő kapcsolási rajza	56
B.5 Függelék: FET meghajtó kapcsolási rajza	57
B.6 Függelék: RS485 kommunikációs IC kapcsolási rajza.....	58
Irodalomjegyzék.....	59

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: Van Allen sugárzási öv	13
2. ábra: Kereskedelmi forgalomban elérhető és űrtechnikai termékek előállítása	17
3. ábra: Sugárzási hatások típusai	18
4. ábra: Egy MOS-eszköz metszete pozitív kapuelőfeszítéssel, amely az ionizáló sugárzás hatását mutatja töltéshordozókra, azok -szállítására és -csapdázására [8]	19
5. ábra: A SE jelenségek csoportosítása	24
6. ábra: Mérési elrendezés az ATOMKI-ban	26
7. ábra: A ^{60}Co aktivitásának időfüggése	27
8. ábra: A dózisteljesítmény függése a távolságtól.....	28
9. ábra: A TID mérés előkészületeinek fázisai	29
10. ábra: Kiegészítő panelek: FET meghajtóhoz (a); LDO feszültségszabályozó és DC-DC feszültségcsökkentőhöz (b); RS-485 kommunikációs interfészhez (c); N-csatornás MOSFET-hez (d); Mikrovezérlőhöz (e).....	30
11. ábra: felül: Az összeállított mérési elrendezés; alul: DAQ részei: SBC, SMU és a kiegészítő panel	34
12. ábra: Port átirányítása egy gateway szerveren keresztül	35
13. ábra: A használt TID mérőrendszer blokkvázlata.....	36
14. ábra: Logfile tartalma	37
15. ábra: Lineáris feszültségszabályozó beültetett, élesztett változata.....	39
16. ábra: felül: LDO kimeneti feszültsége az eltelt idő és a dózis függvényében; alul: LDO összáramfelvétele az idő és a dózis függvényében	40
17. ábra: DC-DC szinkron feszültségcsökkentő beültetett, élesztett változata	41
18. ábra: DC-DC kimeneti feszültsége az eltelt idő és a dózis függvényében; alul: DC-DC összáramfelvétele az eltelt idő és a dózis függvényében	42
19. ábra: N-csatornás MOSFET beültetett, élesztett változata.....	43
20. ábra: N-csatornájú MOSFET V_{ds} -Id karakterisztikája besugárzás előtt és után	44
21. ábra: N-csatornájú MOSFET kapufeszültsége (V_{gs}) az eltelt idő és dózis függvényében	44
22. ábra: FET meghajtó beültetett, élesztett változata.....	45
23. ábra: FET meghajtó összáramfelvétele az eltelt idő és dózis függvényében	45
24. ábra: RS-485 adó-vevő beültetett, élesztett változata	46
25. ábra: RS485 összáramfelvétele az eltelt idő és dózis függvényében	47
26. ábra: A mikrovezérlő beültetett, élesztett változata.....	47

27. ábra: Mikrovezérlő áramfelvétele az eltelt idő és a feszültség függvényében 48

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat: Sugárzások típusai és LET értékeik [3]	15
2. táblázat: Akkumuláló ionizáló dózis hatása különböző elektronikai technológiákra	21
3. táblázat: SE jelenségek és hatásaik félvezetőkben	25
4. táblázat: A TID mérésekhez szükséges költségek összefoglaló táblázata	49

RÖVIDÍTÉSEK

ATE – Automated Test Equipment, Automatizált mérőeszköz

COTS – Commercial off-the-shelf, Kereskedelmi forgalomban kapható

DAQ – Data-Acquisition, Mérésadatgyűjtés

DD – Displacement Damage, Szerkezeti dózishatás

DUT – Device Under Test, Mérendő eszköz

ESA – European Space Agency, Európai Űrügynökség

GCR – Galactic Cosmic Rays, galaktikus kozmikus háttér sugárzás

IC – Integrated Circuit, integrált áramkör

LDR – Low-Dose Rate, alacsony dózisteljesítmény

LET – Linear Energy Transfer, lineáris energiaátadás

LHC – Large Hadron Collider, Nagy Hadronütköztető

MOS - Metal-Oxide-Semiconductor, fém-oxid félvezető

NASA - National Aeronautics and Space Administration, Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal

NYÁK – Nyomtatott Áramkör

SBC – Single Board Computer, egypanelés számítógép

SE – Single Event, egyszeri esemény

SMU – Source Measure Unit, forrás-mérő egység

TID – Total Ionizing Dose, Teljes ionizáló dózis

REZÜME

A teljes ionizáló dózis monitorozása napjainkban létfontosságú feladat a sugárzási körülmények között alkalmazott eszközök körében. Legyen szó úrkutatásról, vagy ember alkotta sugárzási környezetről, az eszközöknek szigorúan helyt kell állniuk. Az elektronikai eszközökben tapasztalható sugárzási hatások típusa és mértéke jelentősen függ az adott eszköz tulajdonságaitól és a környezetbeli sugárzási viszonyoktól. A sugárzásálló eszközök gyártása és validálásuk sokkal költségesebbek, mint a kereskedelmi forgalomban kapható eszközök használata.

Megvizsgáltam a gamma-sugárzás hatását hat különböző, teljesen más feladatot betöltő kereskedelmi forgalomban elérhető alkatrészre, amelyek együttesen akár egy teljes elektronikai rendszert is alkothatnak. Három különböző vizsgálatot végeztem, hogy megállapítsam a komponensek sugárzástűrését. Az első referenciamérésként szolgál, ahol sugárzásmentes környezetben normál működés alatt vizsgáltam meg a választott, később besugározni kívánt eszközt. A második és harmadik vizsgálattal a gamma-sugárzás akkumulálódó hatását figyeltem meg. Komponenstől függően más-más működési paramétert vettem figyelembe, ezen paraméterek degradálódását ábrázoltam a besugárzás függvényében. Az eredmények azt mutatják, hogy a félvezetőkben a besugárzás során egy telítődési folyamat olyan eltolódást okozhat az eszköz paramétereikben, amely akár irreverzibilis károkkal jár, ha az eszköz nem rendelkezik megfelelő túláram védelemmel vagy sugárzást árnyékoló anyaggal. A felmerült költségek összegzésével elmondható, hogy nem szükséges milliókat költeni a mérőműszerekre és gyártó által validált sugárzásálló eszközökre, alacsony költségvetésből is lehet tudományt „csinálni”.

BEVEZETÉS

Az ionizáló sugárzás elektronikai áramkörökre gyakorolt hatásainak tanulmányozása a 60-as évek elejére nyúlik vissza. Ennek egyszerű történeti oka van: ekkor ugrott meg az igény olyan elektronika iránt, amely képes túlélni akár egy nukleáris robbanás hatását. A nukleáris fegyverkezési versennyel párhuzamosan a korai űrkutatás is elkezdődött, a Van Allen és Vernov által felfedezett sugárzási övek ellen szükség volt sugárzásálló alkatrészekre. Számos nagy esemény köthető ehhez az időszakhoz, amelyek újabb szintre emelték az elektronikai technológiai fejlődést: az első műhold (Szputnyik 1, 1957), az első germánium integrált áramkör (1958), a fém-oxid- félvezető (MOS) tranzisztor 1960-ban született, ekkor készült az első bolygóközi űrszonda, a Pioneer. Az Apollo-programban már használták az első 256 bites számítógépes memóriát is.

Számos olyan terület létezik, ahol nagyfokú sugárzástűrésre van szükség: űr- és repüléstechnikai alkalmazások, nagyenergiájú gyorsítók, nukleáris erőművek, orvosi diagnosztikai képalkotás és terápia, ipari képalkotás és anyagfeldolgozás. Ilyen környezetben történő üzemszerű működés során az adott eszközzel kölcsönhatásba lépnek a sugárzási tér részecskéi, ezáltal elektromos tulajdonságaik lehetséges megváltozása a rendszer meghibásodását okozhatja.

A sugárzás típusától és jellemzőitől függően különböző, akár reverzibilis, vagy irreverzibilis hatások léphetnek fel. Az elektronikai eszközök sugárzásra adott válaszában háttérben álló mechanizmusok ismerete kiemelkedő fontosságú, ezért olyan biztonsági eljárások kidolgozása szükséges, amelyek garantálják, hogy a vizsgált eszközök megbízhatóan működnek a célkörnyezetben. Összességében, egyes speciális alkalmazásokhoz olyan sugárzásálló áramköröket és tervezési technikát kell biztosítani, amelyek javítják az eszközök tűrési képességeit az ionizáló sugárzás bizonyos hatásai ellen.

Dolgozatom célja, hogy méréseimmel alátámasztva hozzájáruljak az ionizáló sugárzás okozta mechanizmusok és degradációs folyamatok megismeréséhez a kereskedelmi forgalomban elérhető elektronikai eszközökben. Az elkészült rendszer példájából hardver-, szoftverfejlesztés és adatfeldolgozás révén részletesen bemutatok egy költséghatékony megoldást a teljes ionizáló dózis indirekt mérésére kommersz elektronikai eszközök segítségével.

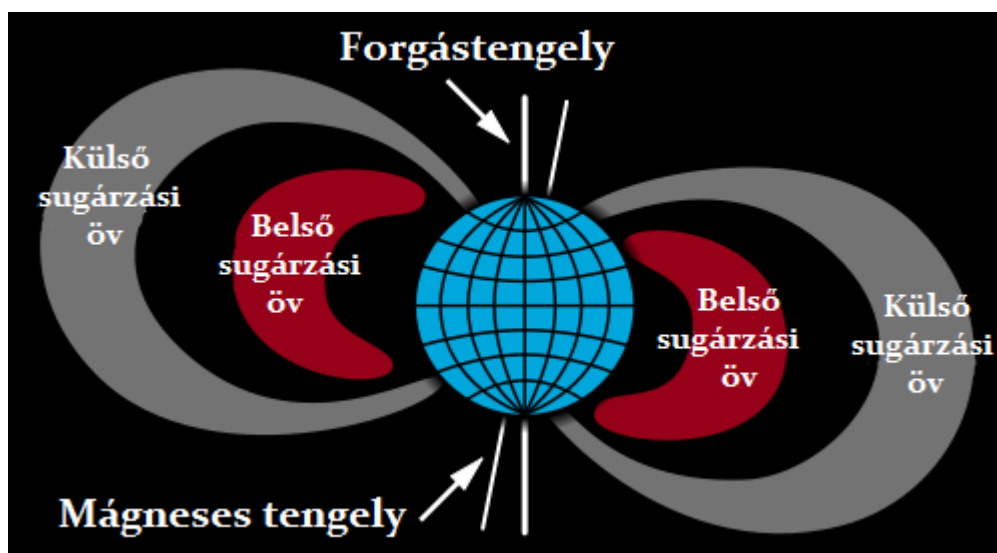
IONIZÁLÓ SUGÁRZÁSI KÖRNYEZETEK

A félvezető eszközöket és integrált áramköröket manapság számos olyan környezetben alkalmazzák, amelyek kihívást jelentenek. Az elektronikai eszközökben tapasztalható sugárzási hatások típusa és mértéke jelentősen függ az adott eszköz tulajdonságaitól és az adott környezet sugárzási viszonyaitól, amelyben az eszközt működtetjük.

Naprendszerünk fő sugárzási forrásai a galaktikus kozmikus háttérsugárzás, a Napból jövő részecskék, valamint a Naprendszer bolygóinak sugárzási öve. A kozmikus sugárzás, vagy másnéven GCR (Galactic Cosmic Rays) főként nagyenergiájú protonokból áll és hatol be a Naprendszeren kívülről. A kozmikus sugárzás az energiák széles spektrumát fedi le, viszonylag nagy fluxussal a 100 MeV és 10 GeV közötti tartományban, 500 MeV körüli csúcserővel. Amikor kozmikus részecskék ütköznek a Föld légkörét alkotó atomok atommagjaival, úgynevezett részecske záport indítanak el, amelyek neutronokat, protonokat, müonokat, elektronokat és gamma-sugarakat hoznak létre.

A Nap sugárzása hadronokból, leptonokból és fotonokból áll, amelyet a Nap folyamatosan kibocsát minden irányba. Ez az úgynevezett napszél. A napszél mellett megemlítendő a sokkal nagyobb energiával és fluxussal rendelkező napkitörés, amely intenzív részecskekitöréseket generál időszakosan [1].

A Földet és közvetlen környezetét a légkör védi, amely félig áteresztő pajzsként működik, átengedi a fényt és a hőt, ugyanakkor megállítja a sugárzást és az UV-sugárzást; mivel az űrben nincs ilyen védelem, az embereknek és az elektronikának a Föld körül keringő műholdak, űrszondák fedélzetén meg kell birkózniuk az ebből eredő kihívásokkal. A Föld geomágneses terében elektromosan töltött részecskék esnek csapdába a napszél következtében, ezek egy tórusz alakú övet alkotnak, amely egy dupla réteg. Ezt az öveget Van Allen sugárzási öveknek [2] is nevezik (1. ábra: Van Allen sugárzási öv). Az energia elérheti a 30 MeV-ot a csapdába esett elektronok esetén, körülbelül 400 MeV-ot a protonok esetén.



1. ábra: Van Allen sugárzási öv

Az elektronikai eszközök meghibásodásának forrásait földi környezetben három sugárforrás uralja:

- Alfa-részecske sugárzás, amelyet az instabil izotópok, például az urán, a tórium és izotópjaik természetes radioaktív bomlása bocsát ki;
- Neutronsugárzás, amely a Föld légkörébe kerülő nagy energiájú protonok és a Föld légkörében lévő nitrogén és oxigénatomok mellékterméke. Az így létrejövő neutronfluxus függ a tengerszint feletti magasságtól, szélességtől, hosszúságtól és a naptevékenységtől;
- Kis energiájú kozmikus neutronok kölcsönhatása a bór radioaktív izotópjával (^{10}B).

Mindezen környezetek mellett fontos megemlíteni még további olyan területeket, amelyek mesterséges, ember által alkotta sugárzási környezetek: nukleáris erőművek, orvosdiagnosztikai alkalmazások, nagyenergiájú gyorsítók, fegyver- és hadipar.

Az elektronikai eszközökben leggyakrabban előforduló hibákat az SE jelenségek okozzák, például ilyen a memóriákban és a szekvenciális logikában a bitek átbillenése, ahol egyetlen részecske-esemény hatása visszafordíthatatlanul tönkre teheti egy memóriaegység részeit. Ezzel szemben a teljes ionizáló dózis és a diszlokációs kár nem tekinthető jelentős hatásnak földi környezetben, mivel a neutron és az alfa-részecske események aránya túl alacsony ahhoz, hogy az eszközök élettartama alatt (évtizedek) jelentős dózisz felhalmozódást okozzon.

A CERN Nagy Hadronütköztető (LHC, Large Hadron Collider) részecskegyorsítójában működő kísérletek adatkiolvasó és indító rendszerében használt elektronika szintén magas

sugárzásnak van kitéve. Ez a sugárzás maradandó károkat okozhat a rendszerben, mint például sugárzás következtében megsérülhet az adat.

A dozimetriában a lineáris energiaátvitel (LET) az az energiamennyiség, amelyet az ionizáló részecske egységnyi távolságonként átad az anyagnak, és ez leírja a sugárzás hatását az anyagra. Ez megegyezik az anyagon áthaladó töltött ionizáló részecskére ható fékezőerővel. A LET függ a sugárzás típusától, valamint az anyagtól, amelybe az ionizáló részecske belép. Általában a lineáris energiaátadást Gy/cm vagy Gy/um egységekben adják meg, képlete a következőképp írható fel:

$$LET = \frac{dE}{dx}$$

A LET értéke meghatározza, hogy a részecske által hordozott energia mennyire koncentrálódik egy adott területre, ami befolyásolja az anyagban lévő ionizációs és degradáló hatások mértékét. Az elektronikai eszközök tervezése során fontos figyelembe venni az LET értékét, mivel a nagyobb LET értékű részecskék nagyobb károsodást okozhatnak az eszközökben. Ezenkívül a lineáris energiaátadás paramétere segíthet az elektronikai komponensek árnyékolástechnikájának megtervezésében, a védőréteg és anyagok kiválasztásában is, mivel ezeknek a részecskéknek az energiaelnyelő képességét befolyásolja. Az energiaátadás értéke változik a részecske pályája mentén, a vége felé éri el a csúcsot, majd, miután a részecske lefékeződik/elnyelődik, megszűnik.

Az 1. táblázatban az ionizáló sugárzás típusaira vonatkoztatott energia és lineáris energiaátadás értéke jelenik meg. Jól látható, hogy a nagy tömeggel és töltéssel rendelkező alfa-sugárzás adja le a legtöbb energiát környezetének egységnyi úthosszon. Elmondható, hogy az alfa-sugárzás a leginkább kölcsönhatásra képes sugárzás fajta. Nehéz töltött részecskék esetén a LET értéke nagyobb, könnyű töltött részecskék esetén kisebb. Az elektron- és az elektromágneses sugárzás energiájukat nagyon hosszú útszakaszon adják le, nehezen tudnak kölcsönhatásba kerülni környezetükkel, finomszerkezeti állandójuk kicsi értéke miatt. A LET mértékegysége keV/ μm .

LET-érték	Sugárzás típusa	Energia (MeV)	LET (keV/ μm)
magas	α -részecske	5	90
	gyors neutron	6.2	21
	proton	2	17
alacsony	H-3 β -sugárzás	0,02	0.3
	Co60- γ	1.25	0.3
	röntgensugár	0.2	2.5
	elektronok	10	-

1. táblázat: Sugárzások típusai és LET értékeik [3]

SUGÁRZÁSÁLLÓ, SUGÁRZÁSTŰRŐ ÉS KERESKEDELMI FORGALOMBAN ELÉRHETŐ ELEKTRONIKAI TECHNOLOGIÁK

Egy egységes rendszert alkotó elektronikai alkatrészek kiválasztásakor nagy figyelmet fordítanak a megbízhatóság kérdésére. Az irodalom megkülönböztet két fő csoportot, sugárzásálló és sugárzástűrő típusú komponenseket, illetve beszélhetünk a kereskedelmi forgalomban elérhető alkatrészek halmazáról. Ezen alkatrészek nem sugárzási környezetbe lettek tervezve, mégis mérések által meghatározható tűréshatáraik vannak.

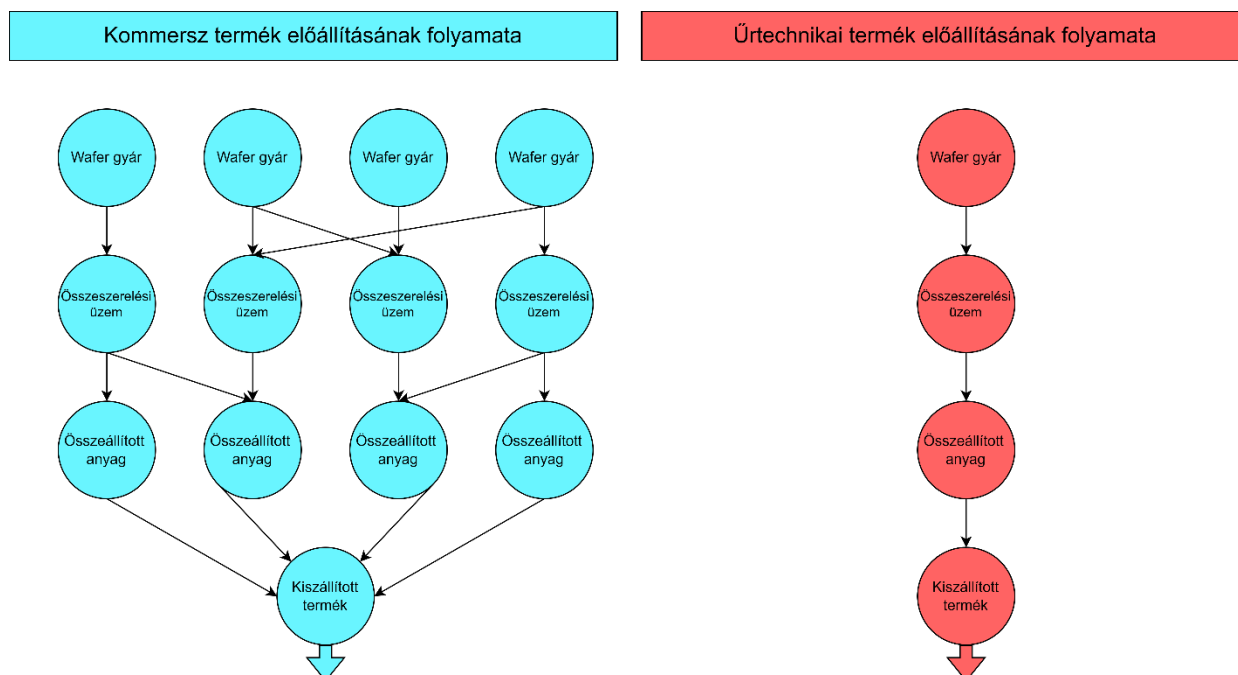
A sugárzásálló, vagy űrminőségű komponenseket a gyártók gondosan, előírások szerint úgy tervezik, hogy a sugárzással szemben sokkal ellenállóbbak legyenek, mint egy ugyanazon szerepet betöltő kereskedelmi forgalomban elérhető alkatrész. Előállításának kezdeti fázisában, már a szilícium waferek gyártására specializálódott üzem szintjén technológiai változtatásokra van szükség. A sugárzásálló alkatrészek szigorú minőségellenőrzésen mennek át, mint például egy adott dózisa vonatkozó előírásokhoz szükséges alátámasztó bemérések.

Léteznek olyan szabványok és bemérésre használt mérési elvek, amelyek világszerte elismertek és alkalmazottak. A Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatalnak (NASA, National Aeronautics and Space Administration) és az Európai Űrügynökségnek (ESA, European Space Agency) is külön minőségi szabványokat határoztak meg annak érdekében, hogy egy komponenst sugárzásállónak minősítsenek, például a *NASA-STD-8739* [4], az *ECSS-Q-ST-60-15C* [5] és a *MIL-PRF-38535* [6]. Természetesen nem minden alkatrésznek létezik sugárzásálló megfelelője.

A sugárzásálló komponenseknek 100 krad-tól 1 Mrad-ig terjedő névleges sugárdózis-toleranciával kell rendelkezniük, a Single Event (SE) jelenségekre karakterizálva vannak, magas a beszerzési költségük és nincs raktári készlet a gyártóknál, mint egy átlagos alkatrész esetén, ami azt jelenti, hogy növeli mind időben, mind pénzben a tervezési költségeket. A Texas Instruments űrminősített termékei is egyetlen gyártási folyamatot alkalmaznak. Ha egy termék átkerül egy másik gyárba, a sugárzási minősítést újra meg kell ismételni. A 2. ábra szemlélteti a kereskedelmi forgalomban elérhető és az űrbe készülő komponensek gyártásai közötti különbséget a Texas Instruments esetében. Szembetűnő a különbség, ugyanis ebből kijelenthető, hogy a kereskedelmi forgalomban elérhető termék-előállítási módszerben kisebb az esély arra, hogy ugyanarról a wafer-ről származnak az előállított eszközök, ez nem kritikus egy általános felhasználás alatt, de kritikus lehet például űrbéli körülmények között [7].

A National Semiconductor a 90-es évek végén bezárta azt a gyárat, ahol az ürminőségű, 100 krad dózist elbíró műveleti erősítőjüket és differenciál komparátorukat gyártották, a technológiát egy másik, új gyárba helyezték át. A TID-teljesítmény az új gyárakban 30 krad alá esett. A cég jelentős mennyiségű időt és kutatást fordított az okok megértésére mire újra elérték a 100 krad tűrést az új gyárakban. [8]

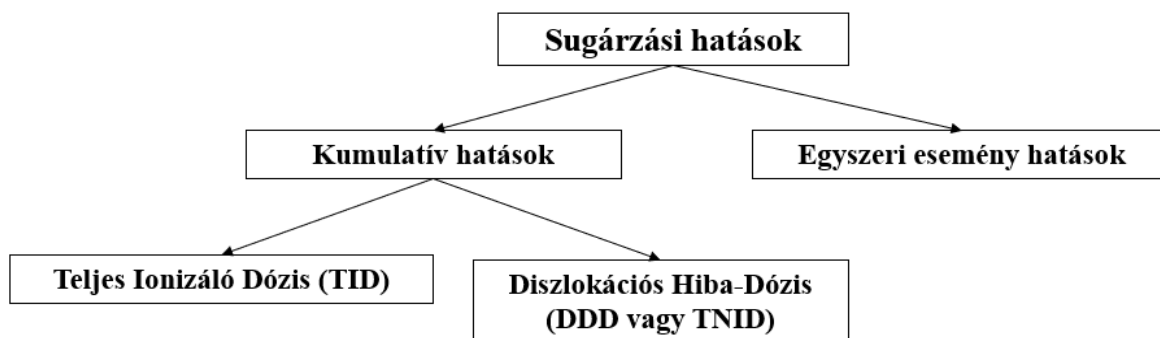
A sugárzásállóság másik alternatívája, hogy olyan kereskedelmi forgalomban elérhető integrált áramköröket alkalmaznak, melyekről sugárzási térben mérésekkel alátámasztva megbizonyosodtak megbízható működésükről. A legtöbb kereskedelmi forgalomban kapható alkatrész 50 Gy dózisértékig sugárzástűrő. Ezek egy része 200 Gy vagy ennél több dózist is képes elviselni. Mérések nélkül lehetetlen előre meghatározni, hogy melyik alkatrész milyen kategóriába sorolható. Általánosan 100-1000 Gy közötti TID dózis tűrésére elmondható, hogy az adott kereskedelmi forgalomban elérhető alkatrész sugárzás tűrő, míg 1000 Gy fölötti TID dózis mellett sugárzásállónak mondható az eszköz. Ezek ellenőrzése kritikus fontosságú, mivel a gyártók megváltoztathatják időközben gyártási eljárásaikat, vagy a szilícium wafer üzemet is. Előfordulhat, hogy egy tavaly gyártott IC még sugárzástűrő, míg az idén gyártott már nem.



2. ábra: Kereskedelmi forgalomban elérhető és űrtechnikai termékek előállítása

AZ IONIZÁLÓ SUGÁRZÁS HATÁSAI AZ ELEKTRONIKÁBAN

Amikor egy részecske (foton, ion, elektron stb.) áthalad az anyagon, különböző módon adhatja le energiáját. Az anyagban végbemenő töltés szétválasztódása függ a sugárzás típusától, energiájától, pályájától és tulajdonságaitól. Hogyan léphet kölcsönhatásba a sugárzás az anyaggal, és mit tesz az elektronikai eszközökkel? Az eszközökben megfigyelhető hatásokat két fő kategóriába sorolhatjuk. Az egyik az úgynevezett dózishatás, és a szerkezeti károsodással kapcsolatos dózishatások. A sugárzásnak való kitettség idővel lassan eltolja az eszköz paramétereit, amíg az eszköz már nem működik. Példaként vegyünk egy műholdat, amely a Föld körül kering 10-20 évig egy adott pályán és minden órában megkerüli a Földet. Ha ez a műhold a keringési és működési ideje alatt sugárzásnak van kitéve, idővel a dózishatások érvényesülni kezdenek a működésében.



3. ábra: Sugárzási hatások típusai

Ezzel éles ellentétben a másik kulcsfontosságú mechanizmus az egyszeri események hatása, amikor egyetlen részecske vagy sugárzási esemény időben meghatározott egyszeri vagy teljes áramköri meghibásodást okoz. Ezen események hatásai pillanatszerűek, az eszköz bármely részébe, bármikor változást generálhatnak (3. ábra).

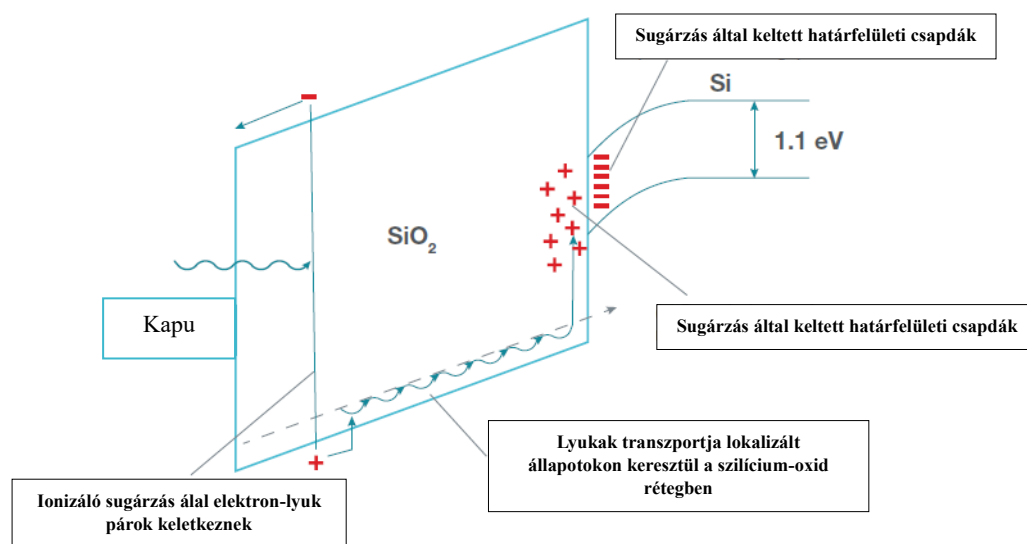
A TELJES IONIZÁLÓ DÓZIS – TID

A TID, azaz a teljes ionizáló dózis (total ionising dose) definiálható úgy, mint az ionizáló sugárzásnak kitett anyag tömegegységére jutó elnyelt energia, melynek mértékegysége a rad. A félvezetők alkalmazásában a teljes ionizáló dózist rad-ban adják meg, viszont a nemzetközi SI mértékegység a gray (Gy), amelyben $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} = 1 \text{ J/kg}$. A teljes ionizáló dózis fokozatos, globális degradációt okoz az eszközök paramétereiben.

A vezető és félvezető anyagokban, mint például fémekben vagy szilíciumban, az ionizáló sugárzás áthaladásakor keletkező többlet töltés nagyrészt rekombinációval kompenzálódik, vagy diffúzió által eloszlik rövid időn belül, közelítően 100 ps idő alatt. Ezek a rövid idejű

töltés-tranziensek számos SE jelenséget okozhatnak, de ez a TID szemszögéből nem számottevő.

A szigetelő anyagok esetén teljesen mást tapasztalunk. Ezen anyagokban a vezető- és vegyérték sávot egy széles tiltott sáv választja el, és az elektronoknak nem áll rendelkezésükre elegendő energia ahhoz, hogy egyik energiaszintről a másikra ugorjanak [8].



4. ábra: Egy MOS-eszköz metszete pozitív kapuelőfeszítéssel, amely az ionizáló sugárzás hatását mutatja töltéshordozókra, azok -szállítására és -csapdázására [8]

A félvezető eszközökben a leggyakoribb szigetelő anyag a szilícium-dioxid (SiO_2), amelyet izolációs rétegek készítésére használnak fel. Például, a MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) tranzisztorok kapuinak kialakítására SiO_2 réteget alkalmaznak. A sugárzásból származó energia elnyelése számos olyan hatást vált ki az oxidban, amely rontja az eszköz teljesítményét és funkcionalitását is. A sugárzás által létrehozott felesleges többségi hordozók kezdeti koncentrációja csökken, mivel az elektron-lyuk párok rekombinálni kezdenek (4. ábra). Ha a töltések mozdulatlanok lennének, akkor a TID sem jelentene problémát, mivel az összes elektron-lyuk pár rekombinálna transzportálás előtt, így nem lenne csapdába esett töltés és kialakuló határfelület. Azonban az oxidokban az elektronok mozgékonyasága sokkal nagyobb, mint a lyukaké, így a diffúzió és az elektromos tér hatására rövid időn belül távozik a felhalmozódott elektronmennyiség. A fentmaradó rekombinátlan lyuktöltés aránya erősen függ a sugárzás típusától és a kapu-oxidban lévő elektromos mezőtől, és a közegben egységnyi úthosszon leadott energiától (LET). A nehezebb, nagyobb töltésű részecskék sokkal több töltést generálnak egységnyi távolságonként, mivel nagyobb LET-tel rendelkeznek.

A legjobb körülmények között növesztett SiO_2 -ban az oxid és a szilícium közötti határfelülete is rendelkezik felületi szerkezeti hibákkal. Egy tömbi szilíciumban minden szilíciumatom kovalens kötésben van a négy legközelebbi szomszédjával. A SiO_2 -ban a szilícium és az oxid közötti átmenetkor az oxidoldalon egy üresedési, úgynevezett vakancia-réteg alakul ki. Ezen a határrétegen a szilíciumatom csak három másik szilíciumatomhoz kötődik, a negyedik szabadon lógó kötés elektromosan aktív, és kölcsönhatásba léphet a szilícium szubsztrátban lévő hordozókkal a határfelület közelében. A félvezetők gyártása során a hidrogén passziválás elrejtje ezeket a hibákat, amikor a hidrogén stabil kötést képez. Azonban, ha protonok érkeznek a határfelülethez, befolyásolhatják a kötött hidrogént, ami a hidrogén leválását eredményezheti a kötésből és így a szabadon lógó kötés képes újra befolyásolni a félvezető anyag elektromos tulajdonságait. A besugárzás által kiváltott felületi csapdák a szilícium- SiO_2 határfelületen - az előfeszítéstől függően pozitív vagy negatív - feszültségfüggő küszöbeltolódásokat okoznak. Mind a csapdába esett lyukak töltése, mind a határfelületen kialakuló állapot is dózisfüggő határértékeket okoz mind a MOS- és bipoláris eszközökben.

A töltésállapotok ezen összetett halmaza magyarázza a TID által kiváltott küszöbfeszültségeltolódását, amelyet a MOS-tranzistorokban a sugárzásnak való kitettség után az előfeszítés és a hőmérséklet függvényében figyelhetünk meg.

A besugárzási mérésekhez kulcsfontosságú a dózisteljesítmény ismerete, amely függ a besugárzás idejétől és intenzitásától, és általában a következő kategóriákba sorolható: alacsony dózisintenzitású besugárzás (LDR, Low Dose Rate), magas dózisintenzitású besugárzás (HDR, High Dose Rate) és extrém alacsony dózisintenzitású besugárzás (ELDR, Enhanced Low Dose Rate). A HDR-nek nevezett TID-tesztben a dózis 50 rad/s és 300 rad/s között változik. Az alacsony dózisú besugárzási méréseknél 10 mrad/s-nál kisebb vagy azzal egyenlőnek tekinthető dózist kap a mérés alatt álló eszköz.

Egyes eszközök lényegesen nagyobb mértékben károsodnak, ha alacsony dózisteljesítménnyel (LDR) történik a besugárzás. Ezen eszközöknél a lassan felhalmozódó dózis sokkal nagyobb degradációt okozhat, mintha ugyanazt az eszközt magas dózisteljesítménnyel (HDR) sugározták volna be. Az LDR és ELDRS-re való fokozott érzékenység bizonyos bipoláris eszközöknél megfigyelhető jellemző. Az ELDRS tesztelés egyik fő problémája a nagyon hosszú besugárzási idő. A HDR mérések körülbelül 100 rad/s tartományba eső tipikus dózisteljesítmény mellett közelítően 20 percet vesz igénybe.

A teljes ionizáló dózis megállapításához szükséges méréseket általában radioaktív forrásokkal végzik, például a kobalt-60 (^{60}Co) és a cézium-137-es izotópok (^{137}Cs) használatával. A ^{60}Co a leggyakrabban használt radioaktív forrás, a kobaltnak egy olyan nem stabil izotópja, amelyet kereskedelmi céllal állítanak elő gyorsítók segítségével, vagy nukleáris reakciók melléktermékeként jön létre. Két gamma fotocsúcsa van, melyek energiái 1,173 MeV és 1,333 MeV, felezési ideje 5,27 év. A cézium-137 a nukleáris reaktorokban történő nukleáris hasadási folyamatok mellékterméke, 30 éves felezési idővel; két β -sugarat sugároz ki 0,51 és 1,17 MeV-en, valamint egy γ -csúcsot, 0,662 MeV-en.

Gyakran használnak ionizáló dózis mérésekhez röntgen sugárzást is, viszonylag alacsony költségeik miatt, különösen elfogadottá váltak az alacsony energiájú (10 keV) röntgengenerátorok, ahol a teljes dózisértékek a 10 Mrad nagyságrendbe esnek (katonai és nagy energiájú fizikai alkalmazásokban).

A 2. táblázat az ionizáló sugárzás különböző technológiákra gyakorolt hatásait mutatja be. Az ionizáló sugárzás által okozott károsodások különböző típusú mikroelektronikai eszközöknél különbözőek lehetnek. Az egyes technológiák esetében bemutatott hatások közé tartozik a küszöbfeszültség eltolódása, a vezérlőáram csökkenése, a kapcsolási sebesség csökkenése, a szivárgó áram növekedése. Ezek a hatások fontos szerepet játszanak az elektronikai eszközök megbízhatóságának szempontjából, és fontos figyelembe venni őket az ionizáló sugárzás okozta károk csökkentése érdekében.

Technológia	Alkategória	Ionizáló sugárzás hatásai
MOS	NMOS	Küszöbfeszültség eltolódása
	PMOS	Vezérlőáram csökkenése
	CMOS	Kapcsolási sebesség csökkenése
	CMOS/SOS/SOI	Szivárgó áram növekedése
BJT		Hfe erősítési tényező degradálódása
JFET		Fokozott szivárgó áram a forrás-nyelő (source-drain) között
Analóg mikroelektronika		Ofszet feszültség és áram eltolódása
Digitális mikroelektronika		Fokozott szivárgó áram, digitális kapuk logikai hibái
Kvarekristály		Frekvencia eltolódás

2. táblázat: Akkumuláló ionizáló dózis hatása különböző elektronikai technológiákra

TELJES IONIZÁLÓ DÓZIS MÉRÉSE

Az ionizáló sugárzásnak számos különböző forrása lehet. Az űrben a TID-sugárzás nagy részét protonok és elektronok generálják, míg az orvosi alkalmazásokban a gamma- vagy röntgensugárzás lehet a forrás. Az űrben vagy katonai alkalmazásokban használt elektronika esetében az elnyelt dózist általában rad(Si) -ként írják fel, amely a szilíciumra vonatkoztatott elnyelt dózist jelöli. A TID-besorolást általában krad (Si)-ban fejezik ki, vagy Gray-ben. A TID-méréseknél nagy dózisteljesítménynek, HDR-nek nevezik azt az értéket, amelynél a dózis 0,5 Gy (50 rad/s) és 3 Gy (300 rad/s) között változik. Az alacsony dózisteljesítményű méréseknél (LDR) a dózismennyiség 0,001 Gy-nél (10 mrad/s) kisebb vagy azzal egyenlő. A TID-vizsgálatokhoz leggyakrabban ⁶⁰Co forrásból származó gamma-sugárzást használnak.

A TID-vizsgálat alapvető menete szabvány szerint a következő:

1. A mérendő egységek összeállítása csomagok szerint, feltételezve, hogy a vásárolt komponensek ugyanazon szilícium-wafer-ről érkeztek
2. Egy tesztelőállomás (Automated Test Equipment, ATE) segítségével meggyőződünk a besugározni kívánt eszközök (Device Under Test, DUT) működéséről, és ellenőrizzük, hogy a DUT-ok megfelelnek-e az adatlapon megadott határértékeknek.
3. A komponenseket hőkezelní kell, majd újra meggyőződni működésükről.
4. DUT előkészítése a besugárzásnak, tápfeszültség alá helyezése
5. Besugárzás szobahőmérsékleten, névleges TID értékig.
6. A besugárzás végével a besugárzott eszközt ki kell venni a sugártérből.
7. Bevizsgálás a mérőállomáson, meggyőződés arról, hogy az egységek még mindig működőképesek-e, és hogy a kritikus paraméterek nem haladják-e meg az adatlapon szereplő határértékeket.
8. Ha a 7. ponton átmént a komponens, akkor hőkezelést hajtunk végre, ez eszköztől változó hőmérsékletű és idejű hőkezelési folyamat lehet.

A tokozás, a foglalatok, az üvegszállal megerősített epoxigyantából (FR4-ből) készült nyomtatott áramkört lapok általában nem árnyékolják a forrásokat. Nem szükséges a tokozást felnyitni¹ ahhoz, hogy a chipet közvetlenül kitegyük az ionizáló sugárzás forrásnak. Néhány vastag alumíniumfedéllel ellátott foglalat némi árnyékolást biztosít, ezeket kerülni kell. A TID-mérésre szolgáló előfeszítő áramkör tervezésekor fontos, hogy ne használjunk TID-re érzékeny

¹ Vannak esetek, amikor szükséges felnyitni a tokozást, SE jelenség vizsgálatoknál, lásd: 19.old.

félvezető eszközöket, különösen akkor, ha a nyomtatott áramköri lapot újra felhasználják. Az olyan passzív elemek, mint az ellenállások és a kondenzátorok nem TID-érzékenyek, de az olyan aktív komponensek, mint a tápegységek igen.

Megjegyzendő, hogy a mérendő alkatrészek közé legalább egy darab tiszta, nem besugárzott, úgynevezett "kontroll" eszközt be kell vonni. Ez a kontrolleszköz hasznos a mérési elrendezés kipróbálásához és az összehasonlításokhoz. Statisztikailag jelentős mennyiségű eszközt kell megmérni, ha ez lehetséges, és minden eszköznek ugyanazzal a dátummal/tételkóddal kell rendelkeznie. Ha az eszközök egy bizonyos TID-küszöbértéknél teljes meghibásodást is mutatnak, a működőképesség egy bizonyos ideig tartó „pihentetés” vagy hőkezelés után visszatérhet. A meghibásodott eszközökön mindig célszerű besugárzás után is funkcionális vizsgálatot végezni egy bizonyos idő elteltével annak megállapítására, hogy a teljes vagy részleges funkcionálitása visszatér-e.

DISZLOKÁCIÓS KÁR ÉS EGYSZERI ESEMÉNYEK HATÁSAI

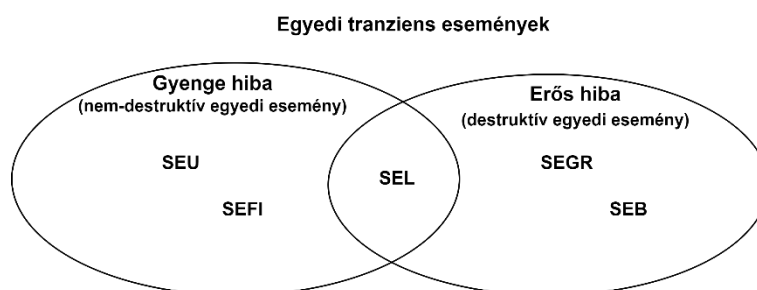
Az ionizáló sugárzásnak kitett félvezető anyagban a károsodás nem csak a felszínen halmozódhat fel, hanem a teljes térfogatban is megfigyelhető. Míg a teljes ionizáló dózis esetén a csapdába esett töltések felhalmozódnak és a határfelület kiszélesedik, addig a diszlokációs kár (DD, Displacement Damage) egy térfogati hatás, amiben a szilícium teljes térfogata károsodást szenved. Az ionizáló részecskéknek elegendő energiájuk van ahhoz, hogy elmozdítsa vagy akár deformálja az anyag atomjait a kristályrácsban, ezek az elmozdulások és deformációk szerkezeti hibákat hoznak létre a félvezetőben. Ezek a hibák az anyag mechanikai tulajdonságait befolyásolhatják, például a szilárdságát és rugalmasságát.

A SE jelenség olyan hibahatást kelt, amely megzavarja egy áramkör normál működését, tranziens jelenséggént (SET, Single Event Transient) is említi az irodalom. Ezt egyetlen ion áthaladása okozza az áramkör egy érzékeny csomópontjában vagy annak közelében. Alapvető folyamatok, amelyek SEE hatást okozhatnak:

1. A beeső ion kölcsönhatásba lép az anyaggal, és szabad töltéshordozókat (elektronokat és lyukakat) hoz létre
2. Az elektronok és lyukak diffúzióval mozognak az anyagon (oxidok és félvezetők) keresztül egy érzékeny csomóponthoz, miközben szintén rekombinálódnak

3. További töltéstöbblet megváltoztatja a feszültséget, ami végül egyedi eseményhatásokhoz vezet. A feszültség változásában megjelenő hibák terjedhetnek az áramkörön keresztül.

Az egyszeri eseményhatás lehet destruktív vagy nem destruktív hatású. A destruktív hatások durva hibakeltő eseménynek tekinthetők, állandó és maradandó változást okoznak a félvezető eszközökben, ami hosszútávú meghibásodáshoz is vezethet. A nem destruktív hatások általában átmeneti gyenge hibákat okoznak, rövidtávú zavart az eszköz működésében, tehát nem vezetnek tartós károsodáshoz. A külső beavatkozás, vagy önjavító helyreállítási folyamat esetén az eszköz vissza térhet a normális működési állapotába, ami azt jelenti, hogy a félvezető eszköz a nem destruktív hatással szemben ellenállóbb.



5. ábra: A SE jelenségek csoportosítása

A gyenge hibákat okozó SE effektusok közé tartozik az egyszeri események okozta zavar (SEU, Single Event Upset), és az egyszeri esemény okozta funkcionális megszakítás (SEFI, Single Event Functional Interrupt). A visszafordíthatatlan, erős hibákat okozó SEE effektus pedig az egyszeri esemény által okozott kapu meghibásodás (SEGR, Single Event Gate Rupture) vagy az egyszeri események által okozott kiégés (SEB, Single Event Burnout) (5. ábra).

Az SE jelenség méréseikhez általában gyorsítókat használnak, amelyek ionokkal sugározzák be az egész eszközt, egyes esetekben levegőben, más esetekben vákuumban. A tokozást alacsony energiájú ionnal történő sugárzás esetén meg kell nyitni. Más tesztelési módszerek is léteznek: fókuszált ionnyaláb és fókuszált, pulzált lézerfényvel is méréseket lehet végezni és SEE hatást kelteni.

A 3. táblázat röviden összefoglalja az egyedi esemény típusokat és a hozzájuk tartozó hatásokat a félvezető eszközökben.

SEU	UPSET	A memória vagy a vezérlőbit ideiglenes megváltoztatása
SEL	LATCHUP	Az eszköz egy állapotba ragad
SEB	BURNOUT	Az eszköz nagy áramot vesz fel, míg tönkre nem megy
SEGR	GATE RUPTURE	A teljesítmény FET-ek Gate-jei megsemmisülnek
SEFI	FUNCTIONAL INTERRUPT	A vezérlési útvonalat megsértette egy ideiglenes upset-esemény

3. táblázat: SE jelenségek és hatásaik félvezetőkben

AZ ALKALMAZOTT FORRÁS BEMUTATÁSA

Az előkészületek részét képezte a teljes ionizáló dózis méréséhez szükséges forrás kiválasztása, amely előtt mindegyik kiválasztott alkatrész áramfelvételét és feszültségét monitorozzuk. Ehhez a debreceni Atommagkutató Intézetéhez (ATOMKI) tartozó hitelesített, nagy intenzitású ^{60}Co forrását használtuk fel (6. ábra). A forrás egy ólomházba ágyazva, egy izolált mérőszobában található. A forrás az ólomházból kiemelhető, kiemelés után egy kónusz alakban az aktív forrás fotonjai kilépnek a térbe. Annak érdekében, hogy a besugárzásért felelős személyt ne érje a megengedettnél nagyobb sugárzási dózis, egy automatizált rendszer segítségével a forrást ki lehet emelni a helyéről, és távolról el lehet indítani a besugárzást jól meghatározott időtartamokra. Amikor a megadott idő letelt, véget ér a besugárzási mérés, a forrást a rendszer visszatolja a helyére.



6. ábra: Mérési elrendezés az ATOMKI-ban

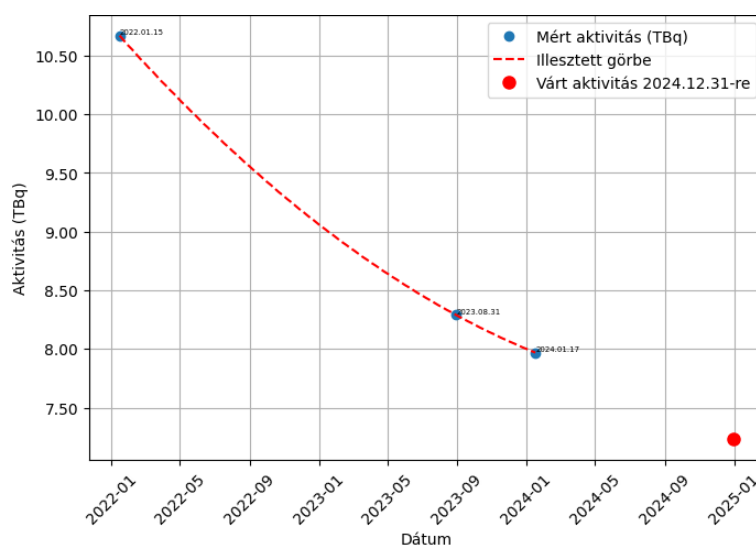
A 2014-ben hitelesített forrás aktivitása 2014. március 25-én 28,7 TBq értékű volt. Mivel ez idő alatt két felezési idő is eltelt, ezért négyszer kisebb a forrás aktivitása, mint amilyen tíz évvel ezelőtt volt. Az ATOMKI ^{60}Co forrásának időfüggését a 7. ábra mutatja be.

Az aktivitás időbeli változása a következő képlettel adható meg:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

ahol:

- A az aktuális aktivitás értéke,
- A_0 a kezdeti aktivitás értéke,
- λ a bomlásállandó,
- t az idő



7. ábra: $A^{60}\text{Co}$ aktivitásának időfüggése

A képletben szereplő exponenciális tag egyértelműen jelzi azt, hogy az aktivitás az idővel exponenciálisan csökken. A bomlásállandó megadja, hogy mekkora valószínűséggel bomlik el egy atommag egy másodperc alatt. Többet használják viszont a $T_{1/2}$ értéket, a felezési időt: ez megadja, hogy mennyi idő alatt bomlik el az összes radioaktív mag fele. A bomlásállandóból a következőképp lehet kifejezni:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Ha ismerjük egy izotóp felezési idejét, akkor egy adott forrás aktivitása könnyen kifejezhető a képletből. Egy adott radioaktív anyag a felezési ideje alatt egyenletesen bomlik, ezzel együtt arányosan csökken a radioaktív atommagok száma (N). A felezési idő nem függ az adott izotóp kezdeti mennyiségétől, elmondható, hogy ez az érték különböző izotópoknál más és más. Míg

a ^{60}Co felezési ideje megközelítőleg 5,27 év, a ^{137}Cs izotópé 30,05 év. Az aktivitás SI-mértékegysége a Bq (Becquerel), 1 Bq másodpercenként egy bomlásnak felel meg.

Az ismeretlen abszorbeált dózis érték kiszámításához egy ismert pontból (radioaktív pontforrás) a széles körben használt egyenletet lehet alkalmazni. Az egyenlet a következőképpen írható le:

$$d = \frac{\Lambda \times \Gamma}{r^2}$$

ahol:

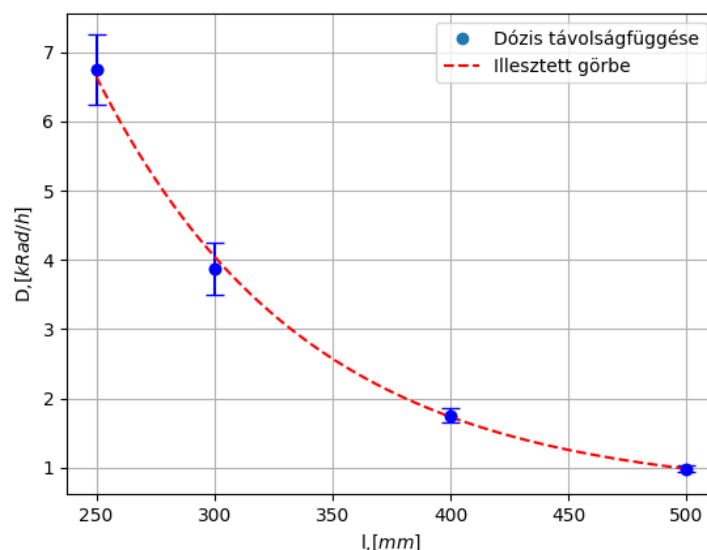
Γ – specifikus gamma-sugárzási konstans ($\text{Gy m}^2 \text{s}^{-1} \text{Bq}^{-1}$),

Λ – aktivitás (Bq);

r – a forrástól a detektor érzékeny térfogatának középpontjáig mért lineáris távolság (m);

d – abszorbeált dózisirata (Gy s^{-1}).

A 8. ábra bemutatja a mérésekhez használt Kobalt-60 forrás aktivitásának függését a távolságtól.

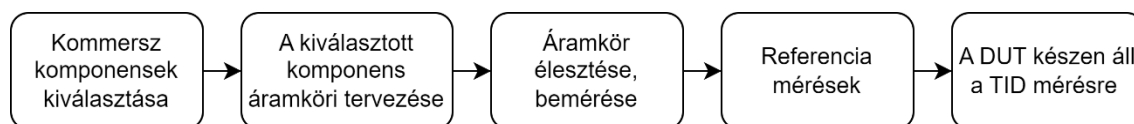


8. ábra: A dózisteljesítmény függése a távolságtól

A mérendő alkatrészek tehát az ATOMKI ^{60}Co forrás használatával kerültek besugárzásra, mindegyik DUT 20,1 Gy (2,01 krad/h, levegőre vonatkoztatott) intenzitású sugárzási dózist kapott óránként. A szabványok szerint 50 rad/s és 300 rad/s közötti intenzitás felel meg a HDR-típusú besugárzási mérésnek, ez a jelen esetben 33,35 rad/s volt, amely közel magas intenzitású besugárzási mérési elrendezésnek mondható.

SAJÁT TID MÉRŐ RENDSZER FEJLESZTÉSÉNEK FÁZISAI

A TID mérések megkezdése előtt számos tervezési feladatnak kellett megvalósulnia annak érdekében, hogy a rendszer minden szintjén, legyen szó hardver- vagy szoftvertervezésről, stabil és hibamentes működést biztosítsak. A már kiválasztott komponensekhez szükséges volt egy megbízható és költséghatékony mérőrendszer architektúrájának és komponenseinek kiválasztása. Következő lépésként a tervezés fontos részét képezte a megvalósított hardveres mérőrendszer, a mérendő és besugárzandó egység, illetve a szoftver alapos validációja és tesztelése. Miután a fejlesztési lépések után megfelelt a rendszer minden kritériumnak, elmondható, hogy az eszköz és az eszköz paramétereit mérő rendszer készen áll a besugárzási mérésekhez. A 9. ábra a besugárzási mérésekhez való előkészületét mutatja be vázlat formájában. Az A.1 Függelék: A TID mérés folyamatábrája az általam megvalósított TID-mérés folyamatát mutatja be.



9. ábra: A TID mérés előkészületének fázisai

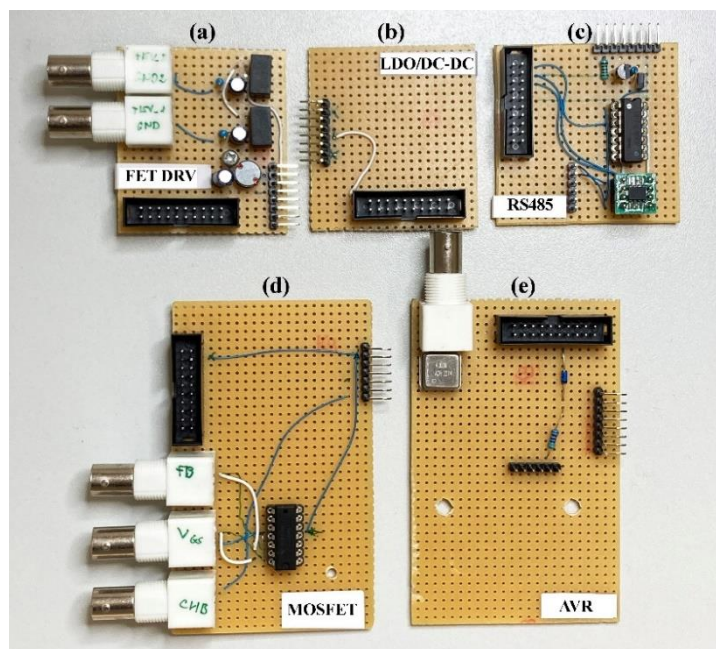
HARDVER TERVEZÉS

A komponensek kiválasztásánál [7] referencia ajánlásai szerint jártam el és csak akkor tértem el a felsorolt alkatrészekről, ha a készlet hiányossága vagy a ref. [7] -ben leírt sugárzástűrési hiánya miatt ezt a döntést kellett meghozni.

A komponensek adatlapjainak tanulmányozása után megterveztem a hozzájuk tartozó kapcsolási rajzot és nyomtatott áramkört a KiCAD [9] ingyenes tervezési szoftverben, és a NYÁK (Nyomtatott Áramkör) gyártásához gyártási állományokat elküldtem egy NYÁK gyártó vállalatnak, akik a kért mennyiséget rövid időn és költségvetésen belül legyártották. A kapcsolási rajzok a függelékben találhatóak (B Függelék).

Ahhoz, hogy az elkészült kapcsolási rajz működését megvizsgáljam, szükséges lépés volt a már megválasztott és kiszámolt értékű aktív és passzív elemek beszerzése. Egy megbízható elektronikai alkatrészbeszállítót választottam, ahonnan a kijelölt mérendő komponensek mellett a hozzájuk tartozó passzív alkatrészeket is kiválasztottam. Minden alkatrészből elegendő mennyiséget rendeltem, hogy forrasztáskor és a bevizsgáláskor szükség esetén pótalkatrészek is rendelkezésre álljanak.

A mérésadatgyűjtő (DAQ) megválasztásakor fontos kritérium volt, hogy a mérőeszköz egyfajta univerzális megoldás legyen analóg és digitális áramkörök tápellátásához és méréséhez, nyílt-forráskódú hardver legyen, amely lehetővé teszi a szoftverkörnyezetek közötti választást. Mivel sugárzási hatásoknak kitett eszközök paramétereinek változásának méréséről van szó, ezért szükség volt arra, hogy a mért adatok nagy pontossággal reprezentálják a valós idejű méréseket. Így esett a választásom az ADALM1000 [10] mérőegység (SMU, Source-Meter Unit) használatára, amelynek rendelkezésre álló funkciói, valamint alacsony költsége és kompaktsága miatt megfelelőnek bizonyult. Az ADALM1000 egy olyan eszköz, amely az áram, a feszültség és az impedancia közötti összefüggéseket a felhasználó elé tárja. Kettő darab 16 bites analóg csatornát kínál, amelyek mindegyike képes analóg jelek generálására vagy mérésére másodpercenként akár 100 kSPS sebességgel, eközben 0 és 5 V közötti feszültséget, illetve 0-200 mA áramerősséget tud biztosítani a kimenetre. Négy digitális be/kimenettel is rendelkezik. Az SMU USB kapcsolaton keresztül kommunikál egy Orange Pi [11] SBC-vel, amely a mérésekhez szükséges parancsokat küldi az SMU részére, és fogadja a mért adatokat az SMU részéről. Az ADALM1000 gyártója külön grafikus felületet szolgáltat Windows és Linux operációs rendszerekhez, illetve saját szoftver támogatásához használható könyvtárakat is



10. ábra: Kiegészítő panelek: FET meghajtóhoz (a);
LDO feszültségszabályozó és DC-DC
feszültségcsökkentőhöz (b); RS-485 kommunikációs
interfészhez (c); N-csatornás MOSFET-hez (d);
Mikrovezérlőhöz (e)

biztosít C-ben, C++-ban és PYTHON-ban, amelyekkel a műszer mérési paraméterei személyre szabhatóak.

Az áramköri besugárzás és a mérésadatgyűjtő (DAQ) rendszer között kiegészítő áramkörök kerültek kialakításra, amelyek a 10. ábrán láthatóak. Ezek a kiegészítő áramkörök két fő funkciót látnak el: egyes esetekben egy egyszerű csatlakozó átalakító panelként használatos (például LDO feszültség szabályozó esetén), míg egyes DUT (például mikrovezérlő) esetén külső órajelet vagy meghajtó áramkört biztosítanak (például DC-DC feszültségcsökkentőhöz).

SZOFTVER TERVEZÉS

A saját szoftver elkészítéséhez rendelkezésre áll a `libsmu` [12] névre hallgató C++ alapú programkönyvtár, amely USB interfészen történő SMU számára szükséges adatfolyam megvalósítását tartalmazza. Az ADALM1000 kompatibilis ezen könyvtár használatával. Python-kötődések is rendelkezésre állnak a `pysmu` nevű könyvtár formájában. Figyelembe kell venni, hogyha a felhasználó Python nyelven szeretné megírni a mérési rendszer szoftverét, akkor a magasabb szinten leírt `pysmu` könyvtárnak a `libsmu` alap könyvtárra szüksége van.

A mérést reprezentáló szoftver az Orange Pi-on fut, a szoftver megírásához Python nyelvet választottam. Ez a szoftver tartalmazza a szükséges kommunikációs port megnyitását, az SMU-val történő kommunikációt, az adatok valós idejű időbélyegzését és ennek továbbítását egy hálózati átjárón keresztül a fogadó (hoszt) számítógépre. Az általános leírások, mint például a műszer meghívása, csatornák beállítása, a mérés elindítása vagy a műszer bezárása megegyezők voltak minden alkatrész esetében, viszont külön odafigyelést igényelt a különböző alkatrészek méréseinek módjai, azok leírása. A kód megértéséhez az A.1 Függelék: A TID mérés folyamatábrája részletes szemléltetést nyújt.

A szoftver a következő kódrészlettel indul, amelyben a hoszt csatlakozni kíván a szerverhez a `socket` nevű modul segítségével, amely lehetővé teszi a hálózati kapcsolat létesítését. Ha ez sikertelen, a rendszer leállítja a programot:

```
import socket
import sys

# Socket létrehozása a IPv4 címzési séma (AF_INET) és a TCP protokoll
(SOCK_STREAM) használatával
s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)

# kivételkezelés
```

```
try:
    s.connect((srvHost, srvPort))
    print('A szerverhez csatlakozva')

except socket.error as e:
    sys.exit('Hiba: ' + str(e))
```

Ha a szerver és a hoszt közötti kapcsolat felállt, meghívom az SMU-t, inicializálom annak kezdőértékeit:

```
# SMU megnyitása
session = Session()
# Ha van csatlakoztatott SMU
if session.devices:

    # ADALM azonosítójának lekérése
    dev = session.devices[0]

    # csatornák definiálása
    chanA = dev.channels['A']
    chanB = dev.channels['B']

    # csatornák módjának definiálása
    chanA.mode = Mode.SVMI # feszültséggenerátor, árammérő mód
    chanB.mode = Mode.HI_Z # nagy impedanciájú mód

    # csatornák kimeneti feszültségének beállítása
    chanA.constant(0) # konstans DC feszültség 0 V
    chanB.constant(0) # konstans DC feszültség 0 V a B csatornán

    # folyamatos munkamenet indítása
    session.start(0)
else:
    print('Nem található csatlakoztatott eszköz')
```

A programban látható, hogy jelen esetben az analóg csatornák definiálásának módja a DC-DC feszültségcsökkentő alkatrész mérésére vonatkozik, tehát ezen beállítás függ az éppen mérendő alkatrész típusától is. A következő szakaszban egy `while` ciklus biztosítja a program folyamatos futását: `START`, `STOP` vagy `CURRENT` típusú parancsokat képes kezelni, amelyek rendszerint elindítják, megállítják a mérést, vagy áramkorlátot állítanak be a következő ciklusban mérendő áramok értékére. A megbízhatóság növelésének érdekében minden szerver felőli beállított áramkorlát üzenet, `START` és `STOP` parancs visszaküldésre kerül a hoszt felől a szerver oldalra, amelyek naplózásra kerülnek. A következőkben az áramkorlát beállítása és visszaküldésének kódrészlete látható:

```

if cmd[0] == 'current':           # ha current utasítás érkezett
    currentLimit = float(cmd[1])  # érték beállítása
    msg = 'New current limit:' + str(currentLimit)+'\n'
    msg = msg.encode()            # üzenet enkódolása
    s.sendall(msg)                # üzenet visszaküldése

```

START és STOP parancs esetén a tápfeszültség kiadásának parancsát adja meg az SBC az SMU-nak és a következő függvénybe lép be a program:

```

# tápfeszültség ki és bekapcsolása
def pwrSwitch(self, state):

    if state == True:
        chanA.constant(5) # konstans DC 5V feszültség parancs az SMU-nak
        chanB.constant(0)
        time.sleep(0.1)

    elif state == False:
        chanA.constant(0) # kimeneti feszültség 0V -ra állítás parancsa
        chanB.constant(0)
        time.sleep(0.1)

```

Attól függetlenül, hogy a csatornák milyen üzemmódban működnek, mindegyik csatorna áramát és feszültségét lekérem az SMU-tól. A következő sor adja meg a parancsot, hogy a mérőműszer olvassa be a csatorna értékeit:

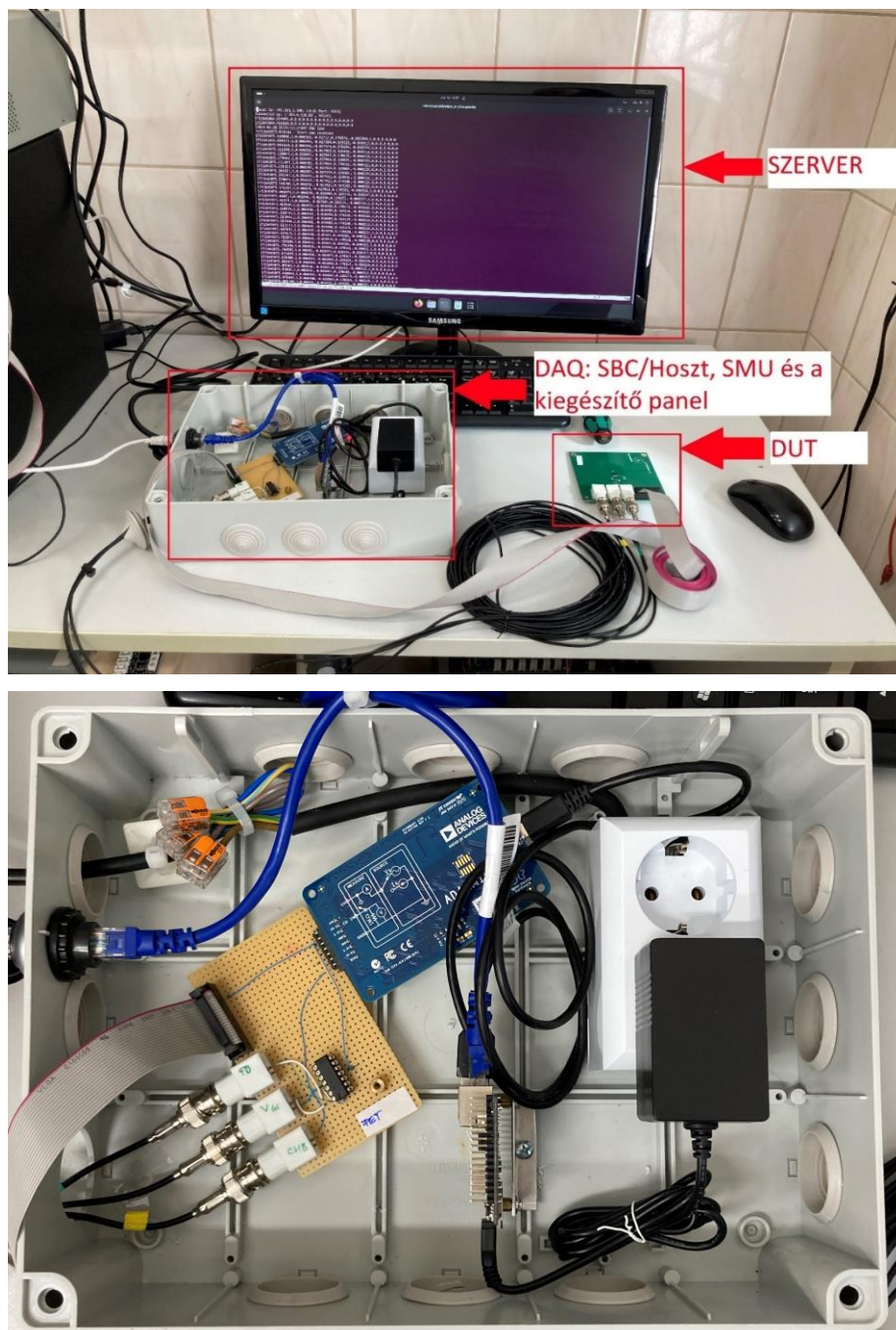
```

samples = dev.read(numOfSamples, -1, False)

```

Ebben a parancsban az első argumentum a minták számát adja meg, a második az olvasási időtartamot határozza meg (a -1 érték azt jelenti, hogy az eszköz dönti el, mennyi ideig olvassa ki az adatokat), míg a harmadik argumentum (False) azt jelzi, hogy a függvény aszinkron módban fusson, így nem blokkolja a további kódvégrehajtást, amíg az olvasás be nem fejeződik.

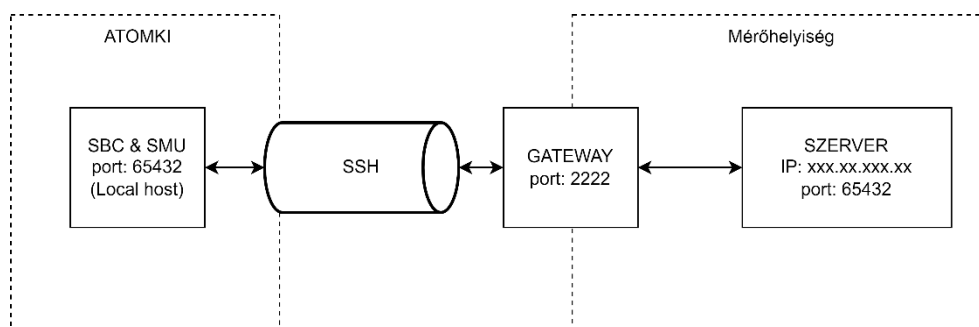
A referencia mérések alatt a mérőrendszer, az SBC és a PC egy hálózatra csatlakoztak, míg a besugárzási mérések megkezdése előtti helyszíni felmérés után kiderült, hogy a hálózat, amelyre a szerver gép csatlakoztatva van nem biztosít belépési lehetőséget külső IP-tartományból, csak VPN-en (Virtual Private Network, virtuális magánhálózat) keresztül. A VPN kapcsolat létesítésétől számítva csak tíz órán keresztül él, frissítéstől függetlenül. Így a VPN használata nem nyújtott teljeskörű megbízható megoldást a külső-belső hálózat közötti kapcsolat fentartására. Így SSH (Secure Shell, titkosított hálózati kapcsolat) port átirányításra



11. ábra: felül: Az összeállított mérési elrendezés; alul: DAQ részei: SBC, SMU és a kiegészítő panel

volt szükség: ezt egy tesztszerver tette lehetővé, amely egy átjárót képez a külső tartományból belső hálózatra csatlakozáshoz, így egy „hátsó ajtó” került megnyitásra (12. ábra). Az SBC-n elhelyezésre került egy parancsot tartalmazó Bash szkript, amely a `crontab`-ba került. Ez a fájl tartalmazza azokat az utasításokat, amelyek a `cron` daemont vezérlik. A `cron` egy háttérben futó feladatkezelő, amely bizonyos időközönként, időpontokban meghatározott programokat futtat. A port átirányításáért felelős szkript a következő:

```
sshpas -p 'pwd' ssh -L -fN localhost:65432:<srvr>:65432 -p 2222 user@server.hu
```

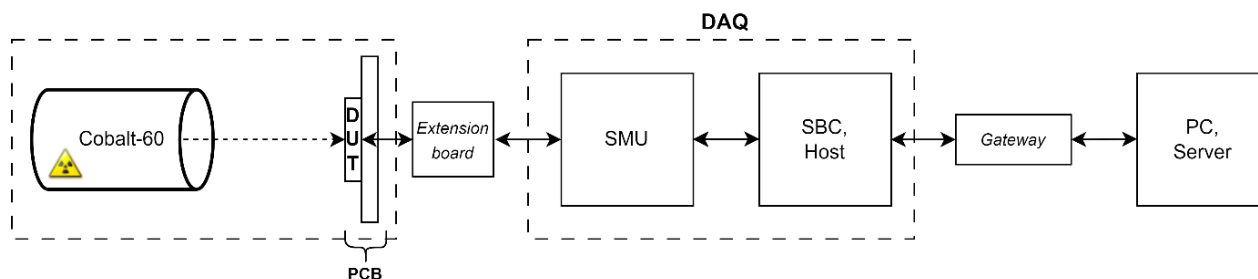


12. ábra: Port átirányítása egy gateway szerveren keresztül

A parancs értelmezése a következő:

- `sshpas` parancssoros program, amely lehetővé teszi a jelszó megadását az SSH parancshoz egy szkripten keresztül ahelyett, hogy a jelszót egy felhasználónak kellene beírnia.
- `-p` kapcsolót a tényleges jelszó megadása követi, amelyet az SSH kapcsolathoz szeretnénk felhasználni.
- `ssh -L -fN` parancs használatával távoli kapcsolatot hozunk létre, a kapcsoló opciók segítségével port átirányítást hajthatunk végre úgy, hogy a kapcsolat a szerver és a hoszt között folyamatosan fennáll.
- `localhost:65432:<srvr>:65432` a port átirányításának konfigurációja, amely a hoszt oldalon nyitott '65432'-es porton keresztüli adatforgalmat a szerveren nyitott '65432'-es portra továbbítja.
- `-p 2222` az átjáró szerver ezen portján keresztül fog az előbbi pontban említett kapcsolat létrejönni
- `user@server.hu` az átjáró szerver eléréséhez szükséges a felhasználónév és a szerver domain nevét vagy IP címét megadni.

A 13. ábra a mérendő modulok besugárzásához előkészített végleges blokkdiagram és az azok közötti viszony látható.



13. ábra: A használt TID mérőrendszer blokkvázlata

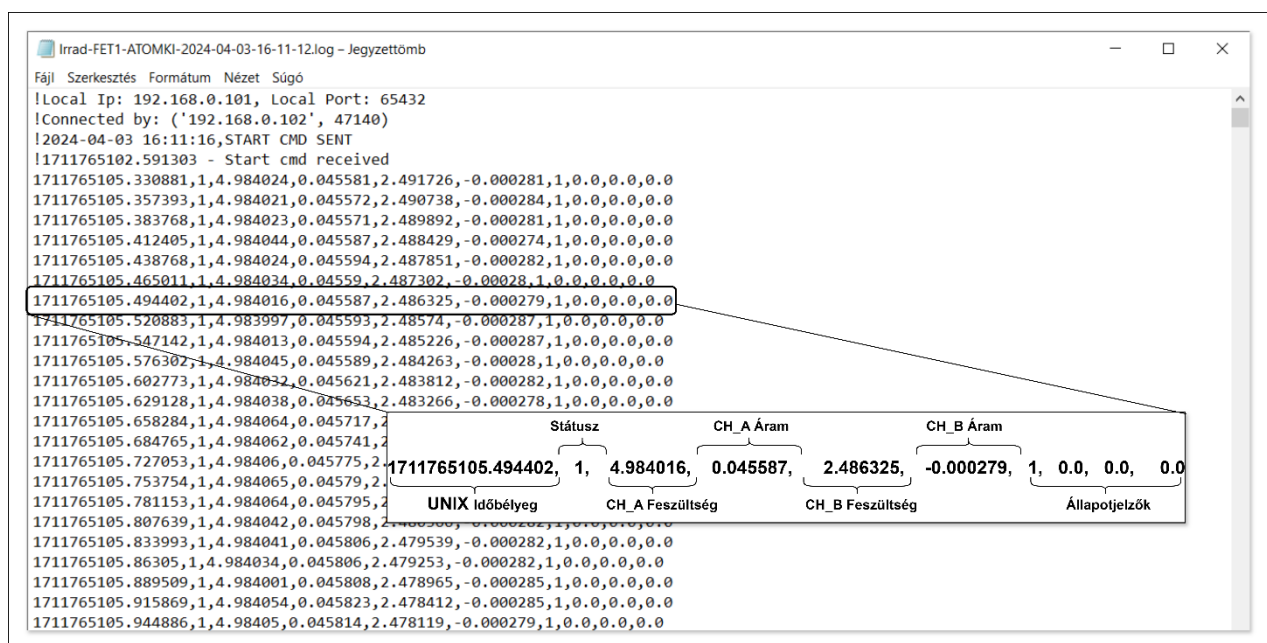
A végleges mérőrendszer lépésről-lépésre a következő részekből áll: A DUT ^{60}Co sugárzásnak van kitéve, mindegyik panel egységesen 100x100 mm méretű nyomtatott áramköri lap, amelynek a közepére van elhelyezve a célkomponens. A mérések során mindegyik nyomtatott áramköri lap megközelítően a kobalt forrástól 350 ± 1 mm-re helyezkedett el, ebből a távolságból $20,1 \text{ Gy} \pm 0,1 \text{ Gy}$ ($2,01 \pm 0,01 \text{ krad/h}$) dózist kaptak a mérendő eszközök.

A NYÁK-on egy IDC szalagkábel csatlakozó és maximum három BNC csatlakozón keresztül csatlakoztatott kiegészítő panel biztosítja a kapcsolatot a mérőműszer-egységgel. A kiegészítőpanel az egyes mérendő alkatrészek esetén más és más feladatot lát el.

A mérőműszer egység egy mérőműszerből és egy egypaneles számítógépből áll. Az SBC adja meg az utasítást az SMU-nak a mérésekről, rendszerint, hogy áramot, feszültséget, vagy épp egy digitális láb állapotát mérjük, illetve ezen adatokat időbélyeggel ellátva küldi tovább egy gateway-en keresztül a szerver felé.

A gateway egy kommunikációs híd a külső szerver és a mérőhelyiség között. A szerver gép fogadja a valós idejű adatokat a hoszt oldalról a gateway-en keresztül. A szerver gépen futtatott Python program segítségével START és STOP utasításokkal lehet tápfeszültség alá helyezni a mérendő áramkört, vagy a tápfeszültséget kikapcsolni.

A kapott adatok naplózásra kerülnek egy .log kiterjesztésű fájlba. A naplózó fájl tartalma a következőképp alakul: az első két sor a hoszt és szerver közötti kapcsolat létrehozásáról ad információt, majd a START parancs elküldésével az SBC engedélyt kap arra, hogy parancsot küldjön az SMU-nak az adatgyűjtés megkezdésére. A logfile sorainak megértésére a 14. ábra szolgál. A UNIX idő az Orange Pi aktuális ideje, ebben az időpontban küldte el az SBC a szervernek az adatcsomagot. A Státusz adja meg, hogy az SMU tápfeszültség alatt tarja-e vagy sem a DUT eszközt. Az ezt követő adatok az SMU analóg csatornáiról kigyűjtött adatai, rendszerint az A-csatorna feszültsége majd árama, ezt követi a B-csatorna feszültsége és árama. A további paraméterek a DUT eszköztől függően az SMU által mért digitális be- és kimenetek állapotjelzői. A rendelkezésre álló adatok egy Python program segítségével kerülnek feldolgozásra és megjelenítésre.



14. ábra: Logfile tartalma

A KIVÁLASZTOTT KOMPONENSEK ÉS ELVÉGZETT MÉRÉSEK

A besugárzás során csak a vizsgált eszköz van kitéve az ionizáló sugárzásnak, minden más mérésadatgyűjtéshez szükséges eszköz szeparáltan van elhelyezve. Minden mérésnél a teljes ionizáló dózis hatására összpontosítottam.

Az A.1 Függelék szemlélteti az általam használt mérési folyamatot, annak módszerét a teljes ionizáló dózis mérésekhez a kiválasztott kereskedelmi forgalomban kapható alkatrészekben.

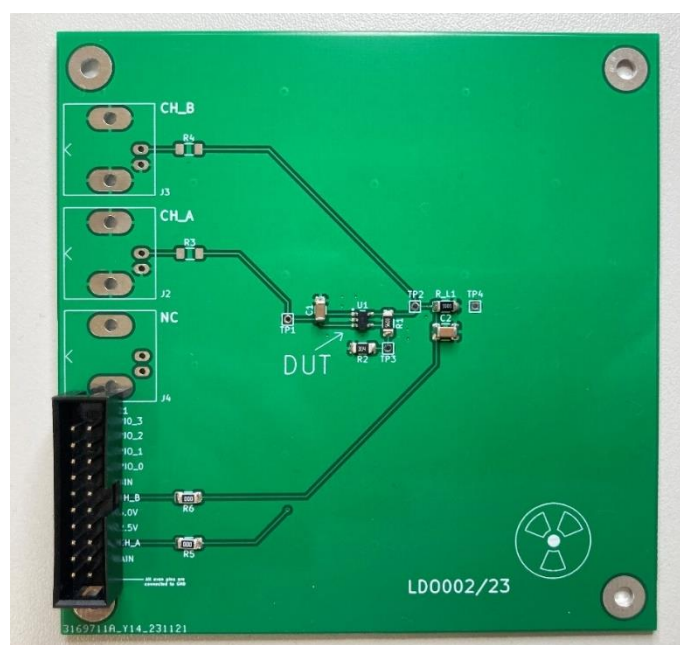
A komponens szintű mérések alatt az egyes félvezető eszközöket külön-külön monitoroztam, hogy elkerüljem a mérésekben jelentkező torzításokat. A mérésekhez olyan alkatrészeket választottam meg, amelyeket kommunikációs műholdakban is használnak, különösen a tápegységekben, például a feszültség konvertálása vagy feszültség szabályozása, de más alrendszerekben is megtalálhatóak, például az egypanelés számítógépben, mint az analóg jelek digitálisra történő átalakításában aktívan részt vevő integrált áramkörök. A feszültségszabályozók, teljesítményelektronikai komponensek esetében a kimeneti feszültséget, míg a kommunikációs-interfész IC esetén a kimeneti feszültség mellett a tervezett protokollal sugárzott üzenetet is monitorozásra került. A mikrokontroller esetén az áramfelvétel vizsgálata mellett döntöttem.

A komponens szintű besugárzások mérési elrendezését, a megvalósított kapcsolást, a mérések kimenetét az alábbiakban részletezem. A tervezett NYÁK-okat egyedi azonosítóval láttam el a későbbi beazonosítás érdekében.

FESZÜLTSEGFORRÁS IC-K

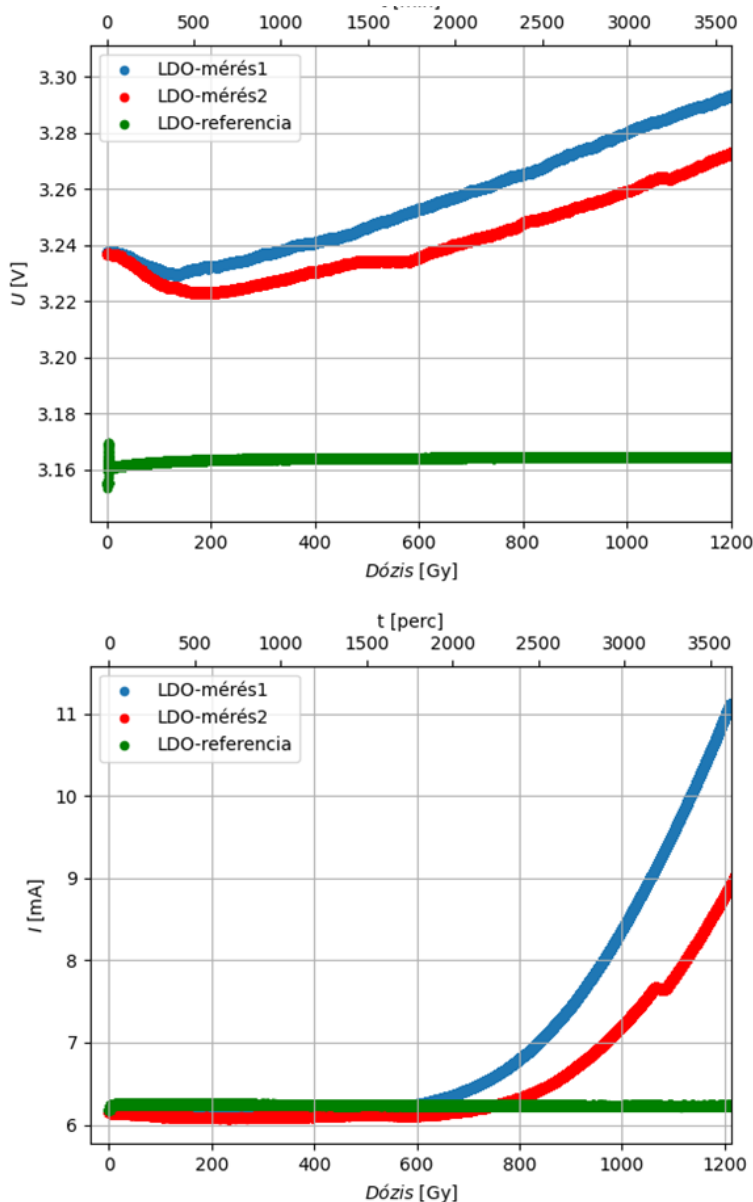
LINEÁRIS FESZÜLTÉGSZABÁLYOZÓ

Az LP2980-N [13] egy fix bemenetű, fix kimenetű, alacsony fogyasztású lineáris feszültségszabályozó (LDO), amely 2,5 V és 16 V közötti bemeneti feszültséget és legfeljebb 50 mA terhelési áramot képes biztosítani. Az eszközbe túláram védelem van integrálva és kimenet aktív-magas engedélyező láb, az adatlap szerint a biztosított üzemi hőmérséklet $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ között mozog. A feszültségszabályozó besugárzási méréséhez szükséges áramkör tervezéséhez az adatlap által ajánlott elrendezést használtam fel. Annak érdekében, hogy a mérési eredményekben csak a feszültségszabályozóra ható sugárzási dózist monitorozzam, a nyomtatott áramköri lapkán kizárólag az alapvető passzív elemek jelennek meg a megfelelő értékkel (15. ábra).



15. ábra: Lineáris feszültségszabályozó beültetett, élesztett változata

A referencia- és teljes ionizáló dózis mérése alatt a DUT 5 V feszültséget kap. A besugárzás előtti referencia mérés alatt $6,620 \pm 0,01\text{ mA}$ az összáramfelvétel, a kimeneti feszültség $3,230 \pm 0,02\text{ V}$ értéket adott. A teljes ionizáló dózis mérésekor az IC által felvett áramot és a kimeneti feszültség változását vesszük figyelembe. A feszültségszabályozó IC-vel rendelkező panelek közel 60 órányi besugárzást kaptak, a következő címkézéssel lettek ellátva: LDO002/23.

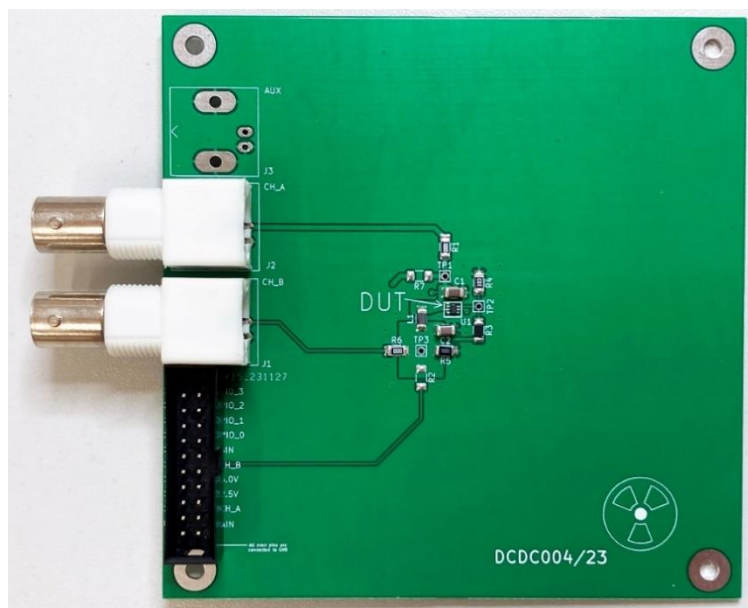


16. ábra: felül: LDO kimeneti feszültsége az eltelt idő és a dózis függvényében; alul: LDO összáramfelvétele az idő és a dózis függvényében

A 16. ábra a gamma-sugárzásnak az LDO kimeneti feszültségére és áramára gyakorolt hatása látható. Az adatlap szerint a kimeneti feszültség pontossága terhelés és hőmérséklet esetén $\pm 1\%$ -on belül van. Az 1200 Gy-nek megfelelő feszültségérték 2%-os eltérést mutat a 3,2 V értékű beállított feszültségtől. A tűréshatárból habár kilép a feszültségszabályozó, mégis működőképes maradt. Az áramfelvételtől elmondható, hogy a sugárzás hatására 600 Gy után exponenciálisan növekszik. Két LDO hasonló adatokat produkált a besugárzási tesztek során, a mérések közötti apró eltérések adódhatnak hőmérséklet-beli különbségekből és az alkatrészek szórásából.

SZINKRON FESZÜLTSGSÖKKENTŐ

Az LT3437 [14] egy nagy teljesítményű, kapcsoló integrált áramkör, amely DC-DC átalakítóként működik, amelynek bemeneti feszültsége 3 V és 17 V feszültség között mozog, és akár 4 A áramot is képes biztosítani 0,6 V és 10 V közötti kimeneti feszültségek mellett. A feszültségcsökkentő konstans frekvenciájú és áram módusú, amely azt jelenti, hogy az IC-be egy belső órajel van integrálva két visszacsatolási hurokkal, hogy a teljesítmény kitöltési ciklusát szabályozza.

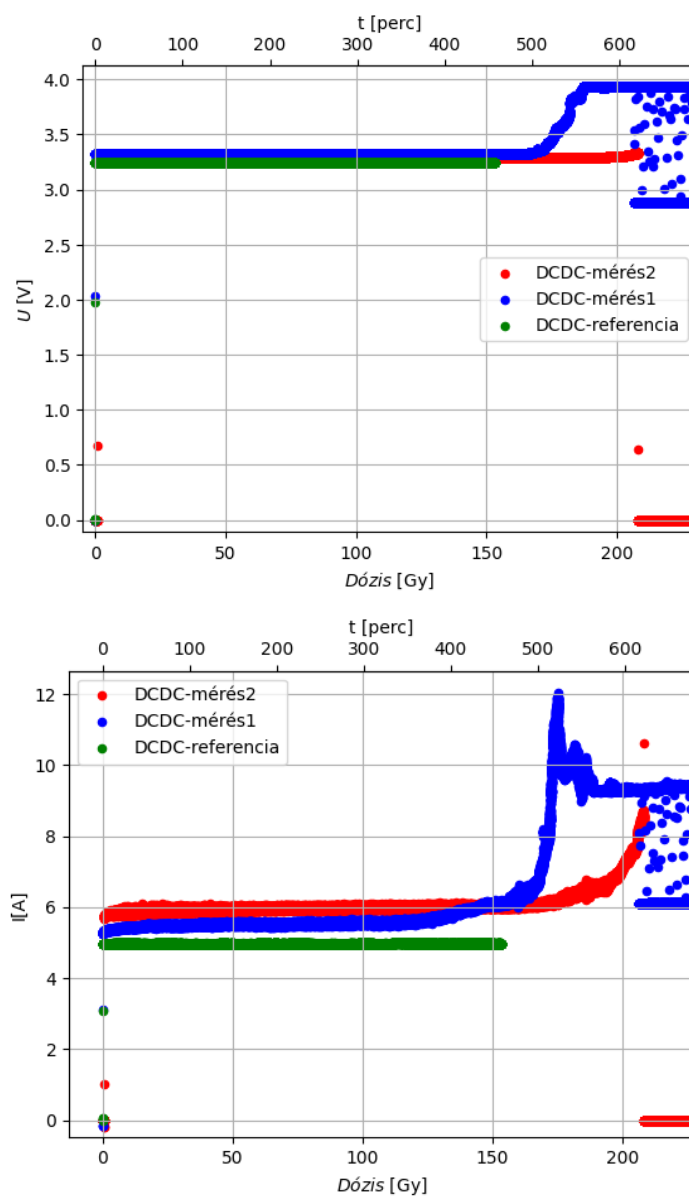


17. ábra: DC-DC szinkron feszültségcsökkentő beültetett, élesztett változata

A komponens BNC csatlakozón keresztül $5\text{ V} \pm 0,01\text{ V}$ bemeneti feszültséget kap, a kimeneti feszültség $3,3 \pm 0,02\text{ V}$ (17. ábra). A mérések alatt a DC-DC átalakító áramfelvétele és az általa előállított kimeneti feszültség kerül megfigyelésre és naplózásra. A feszültségcsökkentő IC-vel rendelkező panelek 24 órányi besugárzást kaptak, a következő címkézéssel lettek ellátva: DC-DC004/23.

A DC-DC átalakító a példa arra az esetre, amikor egy kereskedelmi forgalomban elérhető komponens nem felel meg sugárzási környezetben való felhasználásra. A két mérésből az a következtetés vonható le, hogy a két ugyanazon funkcionalitást ellátó eszköz teljesen különböző reakciót produkált az ionizáló sugárzással szemben. A tesztelt DC-DC átalakító,

150 Gy teljes ionizáló dózis felvétele után elkezdett megbízhatatlanul viselkedni, a kettő darab mérési eredmény a besugárzásról nem fedik le egymást.

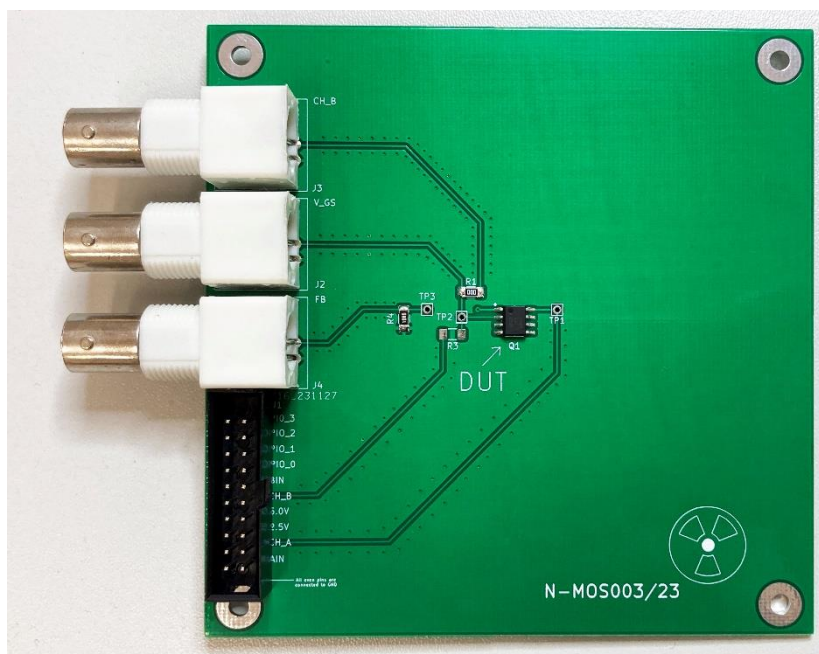


18. ábra: DC-DC kimeneti feszültsége az eltelt idő és a dózis függvényében; alul: DC-DC összáramfelvétele az eltelt idő és a dózis függvényében

TELJESÍTMÉNYELEKTRONIKAI KOMPONENSEK

N-csatornás MOSFET

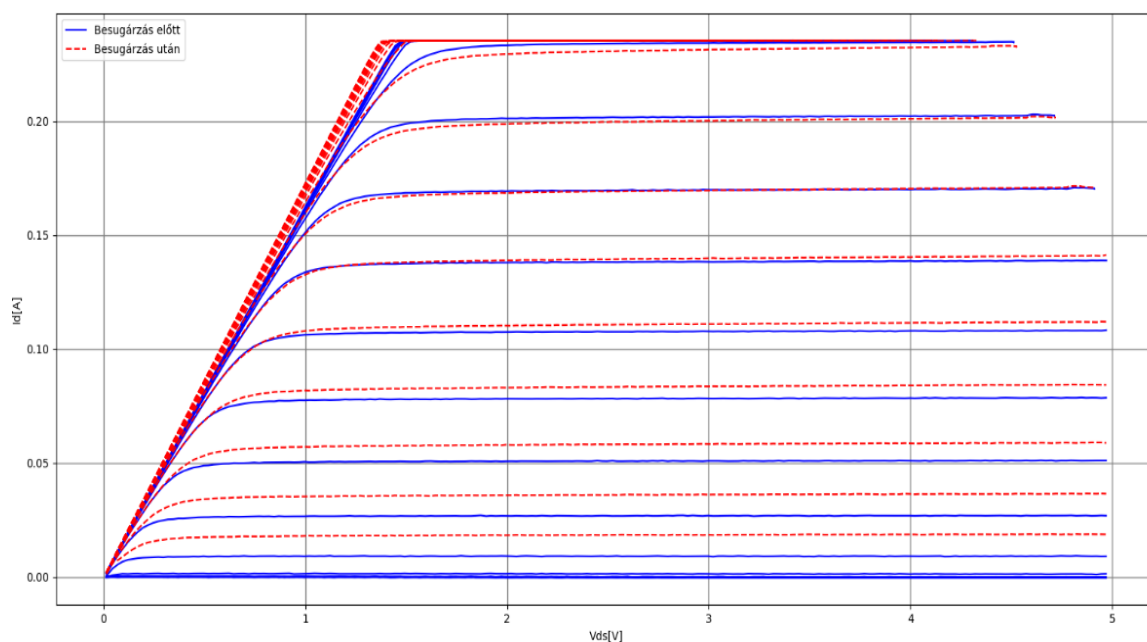
A ZXMN6A11DN8 [15] egy N-csatornájú tervezérlésű tranzisztor, amely alacsony vezérlőfeszültséggel rendelkezik, és kiváló teljesítményt biztosít. A készülék nagyfrekvenciás alkalmazásokban is hatékonyan használható. Az áramkör alkalmazható a vezérlésben és a teljesítményfokozatokban egyaránt, és széles körben használják az ipari és fogyasztói elektronikai alkalmazásokban. A ZXMN6A11DN8 specifikációi és jellemzői lehetővé teszik a hatékony áramvezérlést különböző elektronikai alkalmazásokban.



19. ábra: N-csatornás MOSFET beültetett, élesztett változata

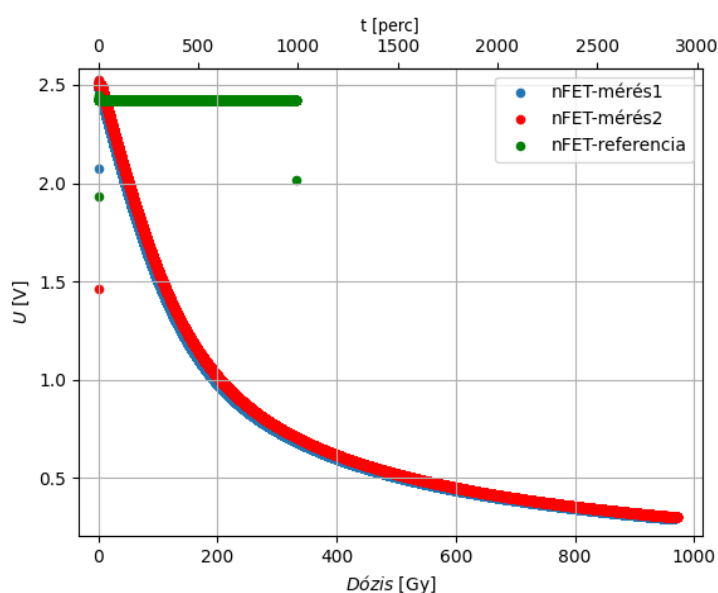
A tápfeszültséget ezen komponens mérési elrendezésében 5 V feszültségnek választottam. A besugárzás során a kapu (gate) feszültséget és a nyelő (drain) áramot monitorozzuk. A besugárzás hatására a kapu feszültségben negatív feszültségesés várható az idő függvényében. A MOSFET mérésére szolgáló panelek 48 órányi besugárzást kaptak, a következő címkézéssel lettek ellátva: N-MOS003/23 (19. ábra).

A 20. ábra a besugárzás előtti és utáni karakterisztikát adja meg.



20. ábra: N-csatornájú MOSFET V_{ds} - I_d karakterisztikája besugárzás előtt és után

A TID mérési metódusait nézve a MOSFET-ek szémszögétől eltérően a folyamatos karakterisztika felvétele helyett egy munkapontban vizsgáltam a MOSFET paramétereinek változását. Az N-csatornájú MOSFET mérési eredményeiből a várt negatív feszültségesést megkaptam mindkét esetben, látható, hogy szinte egymást fedve, exponenciálisan csökkenve követik egymást a mérési pontok (21. ábra). A kezdeti időpillanattól a besugárzási mérés végéig

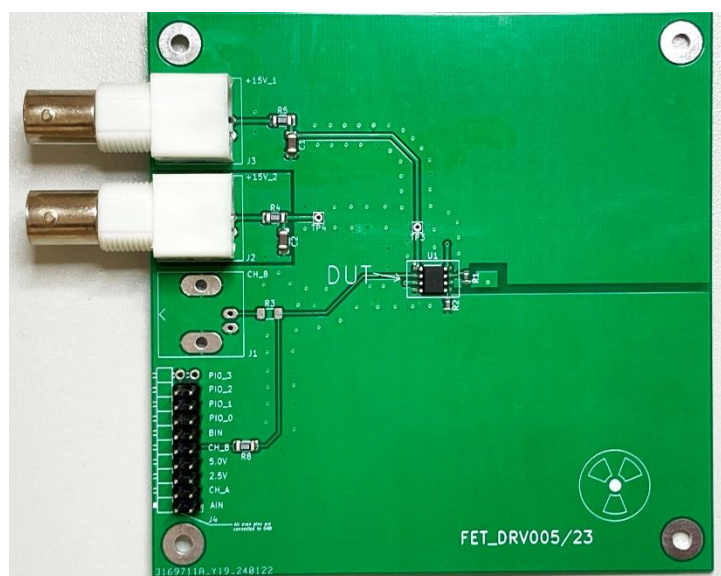


21. ábra: N-csatornájú MOSFET kapufeszültsége (V_{gs}) az eltelt idő és dózis függvényében

folyamatosan csökkent a MOSFET kapufeszültsége (V_{gs}). A tiszta eszköz mérését 1000 percig végeztem. Elmondható mindkét besugárzási mérés esetén, hogy közel 1000 Gy TID értékig az eszköz sugárzástűrőnek bizonyult, habár a karakterisztikában (20. ábra) szembetűnő a paramétereket érintő degradálódás, funkcionálisan a továbbiakban is működött.

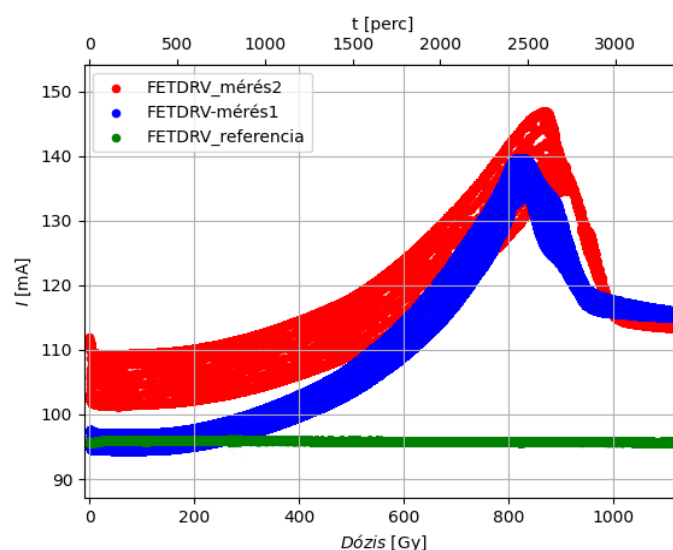
Nagyteljesítményű FET-meghajtó

Az IR2104S [16] egy nagyfeszültségű, nagy sebességű MOSFET és IGBT meghajtó, függő magas és alacsony oldali referenciájú kimeneti csatornákkal.



22. ábra: FET meghajtó beültetett, élesztett változata

Az eszköz besugárzás alatti viselkedésének jellemzésére olyan áramkört hoztam létre, amely a FET meghajtót olyan konfigurációban működteti, amelyben egy négyszögjel segítségével, egy

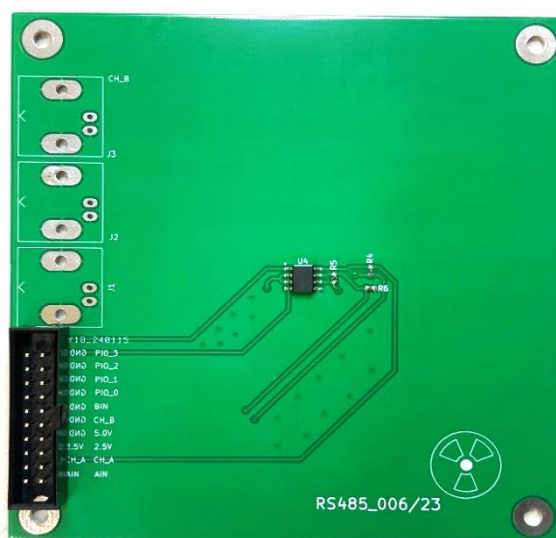


23. ábra: FET meghajtó összáramfelvétele az eltelt idő és dózis függvényében

valós kapcsolgatást utánozva naplózza mérőrendszer az áramfelvételt, illetve ellenőrzöm a DUT kimenetén keletkező hullámformát a kapcsolgatás következtében. A TID jellemzőit az eszköz által felvett áram felhasználásából szükséges meghatározni, és összehasonlító elemzést kell végezni a bemeneti és kimeneti hullámalak között az időtartományban. A MOSFET mérésére szolgáló panelek közel 50 órányi besugárzást kaptak, a következő címkézéssel lettek ellátva: FET_DRV005/23 (22. ábra). Mindkét ATOMKI-ban besugárzott FET meghajtó a kezdeti időtartamtól egy folyamatosan növekvő áramfelvétel görbét produkált, majd 800 Gy után csökken az áramfelvétel. Az exponenciális felfutás után történő lefutási jelenség az eszköz degradálódására utal (23. ábra), funkcionális működését ettől kezdve már nem tudja ellátni. Az eszköz közel 800 Gy-ig sugárzásállónak mondható.

KOMMUNIKÁCIÓS-INTERFÉSZ IC: RS-485 ADÓ-VEVŐ

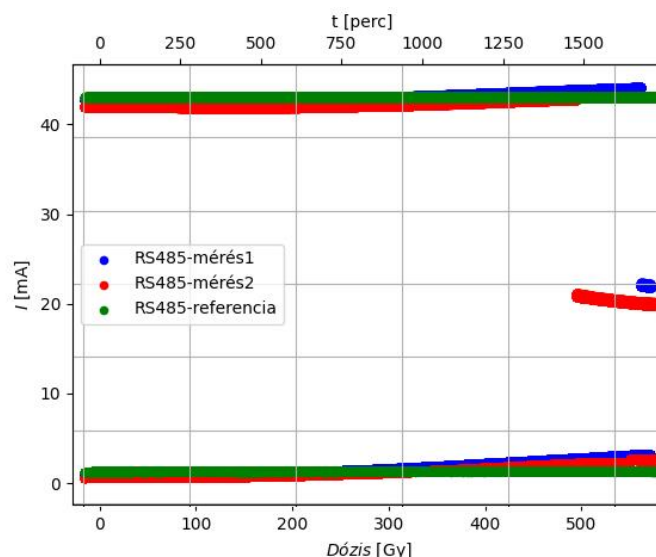
Az SN65HVD1781A-Q1 [17] eszköz egy fél-duplex típusú RS-485 adó-vevő, amely legfeljebb 1 Mbps adatátviteli sebességgel működik. Ez az alkatrész széles közös módusú működési tartományt és ± 70 V-ig terjedő hibavédelmet kínál. Az eszköz TID-mérésekkel történő jellemzéséhez az eszköz mind adás, mind vételi üzemmódban használatra került. Mivel ezek a funkciók további áramköröket igényelnek, ezek is fejlesztésre kerültek, és egy külön, az aktív sugárzási tértől árnyékolt helyiségben helyeztem el azokat. Az RS485 mérésére szolgáló panelek 24 órányi besugárzást kaptak, a következő címkézéssel lettek ellátva: RS485006/23



24. ábra: RS-485 adó-vevő beültetett, élesztett változata

(24. ábra).

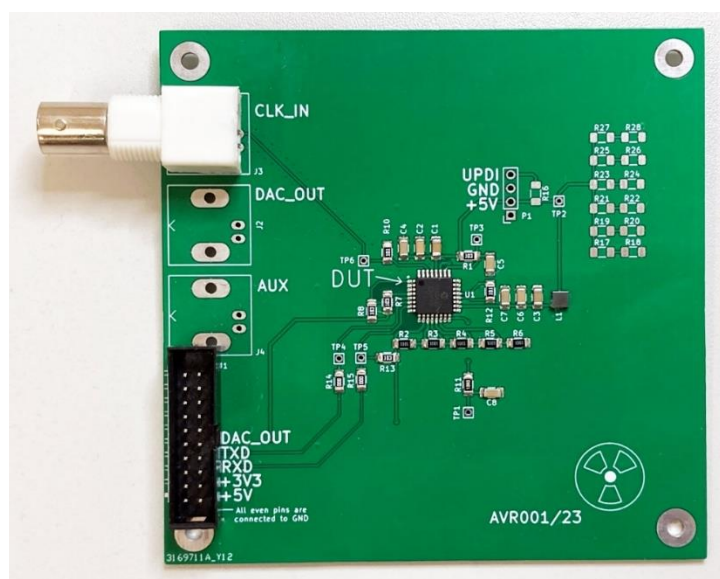
Az RS485 kommunikációja megfelelően működött a besugárzás alatt, az adó oldali áramfelvétele megközelítően mindkét esetben 500 Gy teljes dózis esetén csökkenni kezdett (25. ábra). Az eszköz 500 Gy TID értékig sugárzástűrő.



25. ábra: RS485 összáramfelvétele az eltelt idő és dózis függvényében

MIKROVEZÉRLŐ

Az AVR-DA családba tartozó AVR128DA32 [18] mikrokontroller legfeljebb 24 MHz-es órajellel működik. A mikrovezérlő 128 KB Flash-, 16 KB SRAM- és 512B EEPROM-memóriával rendelkezik. Az eszköz összetettsége miatt a mérési beállításokat alaposan fontolóra vettem. A megtervezett nyomtatott áramkört lapkán a 32 lábás típusát alkalmaztam. Egy külső oszcillátor áramkör biztosítja a mikrovezérlő 4 MHz-es órajel frekvenciáját. Ezt az

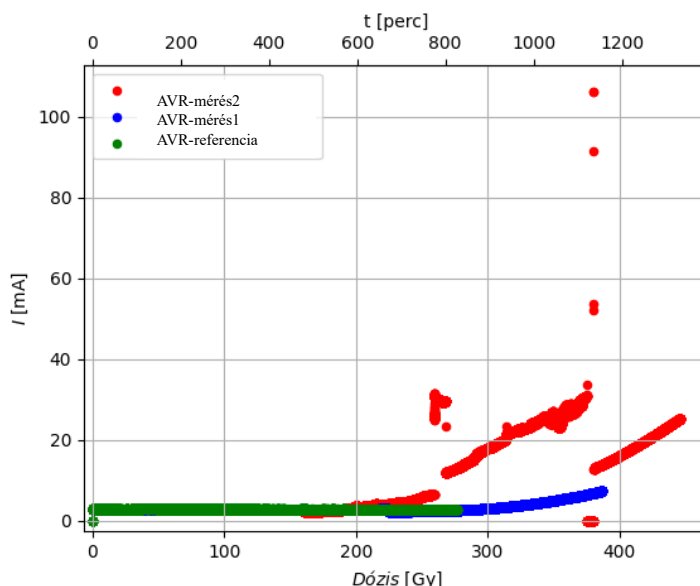


26. ábra: A mikrovezérlő beültetett, élesztett változata

oszillátort a tesztelni kívánt eszköztől elkülönített helyen helyeztem el, a jel koaxiális kábelén keresztül érkezik a mikrovezérlőt tartalmazó NYÁK-ra.

A mikrokontroller firmware-je a következőket tartalmazza: egy GPIO-láb billegtetése alacsony és magas logikai szintek között egy jól meghatározott frekvencián. A mérőeszköz fogadja ezt az adatot, és továbbítja azt további feldolgozásra. Ezenkívül az AVR áramfelvétele is mérésre kerül, majd a naplózott adat feldolgozásra kerül. A DUT 5 V feszültségen üzemel, és a készenléti áramerőssége sugárzásmentes környezetben 4 mA. Az AVR mérésére szolgáló panelek 24 órányi besugárzást kaptak, a következő címkézéssel lettek ellátva: AVR001/23 (26. ábra).

A kiválasztott mikrovezérlő mérési eredményeiből levonható a következtetés, miszerint a mikrovezérlő egy sokkal bonyolultabb rendszernek bizonyult a többi komponenshez viszonyítva, az SE jelenségek hatásai a digitális lábakon kritikusak lehetnek. Az összáramfelvételben való hirtelen növekedés egészen 250 Gy dóziséig nem jelentkezett (27. ábra). Az eszköz 250 Gy TID értékig sugárzástűrőnek mondható, 250 Gy után instabil működés lépett fel az egyik mikrovezérlő esetén (27. ábra, AVR-mérés2), míg a másik mikrovezérlő közel 400 Gy értékig nem produkált hibát.



27. ábra: Mikrovezérlő áramfelvétele az eltelt idő és a feszültség függvényében

KÖLTSÉGVETÉSEK ÖSSZEGZÉSE

Az eszközök beszerzéséhez szükséges költségek jócskán alacsonyabbak, mintha validált sugárzásálló alkatrészeket alkalmaztunk volna a mérésekhez. Míg egyetlen olyan integrált áramkör, amely hitelesített sugárzásálló eszköz 100 000 Ft értékbe kerül, addig egy kereskedelmi forgalomban elérhető alkatrész értéke ennek nagyon kicsi töredéke. A mérőműszer alacsony költségéhez képest szintén egy jó választásnak bizonyult, habár szűk határokon belül, de sikerült az alkatrészek paramétereinek valós idejű mérése.

<i>Eszköz</i>	<i>Átlagos költség</i>
<i>Orange Pi H</i>	5 000 Ft
<i>ADALM1000</i>	30 000 Ft
<i>NYÁK</i>	5 000 Ft
<i>Alkatrészek</i>	90 000 Ft

4. táblázat: A TID mérésekhez szükséges költségek összefoglaló táblázata

ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatom első szakaszában bevezettem a lehetséges sugárzási környezeteket, amelyekben kritikus lehet a félvezető eszközök dózishatása. Kitértem a sugárzásálló, sugárzástűrő és kereskedelmi forgalomban kapható alkatrészek gyártástechnológiai különbségeire. Összefoglaltam a teljes ionizáló dózis mérési metódusait, amelyet az irodalomban ajánlanak.

A tanulmány következő részében a megoldott hardver és szoftver tervezésének és fejlesztésének folyamata található, amely az ionizáló sugárzás hatásának mérésére készült. Részletesen beszámoltam a mérésekhez használt alkatrészek nyomtatott áramkörre való tervezéséről, a mérések elrendezéséről, a monitorozásra szolgáló eszközökről és módszerekről, valamint a mérések folyamatáról. A mérési eredményeim három mérésből tevődtek össze: egy tiszta eszköz elektronikai paramétereinek referencia méréséből, illetve kettő olyan mérésből, amely az ionizáló sugárzási forrásnak kitett komponensek paramétereinek változását adja meg. Mindegyik eszköz közel nagy intenzitású TID dózissal volt kitéve. A mérések alatt az eszközök sugárzástűrő képességét vizsgáltam, amelyek többé-kevésbé megfeleltek a sugárzás tűrés kritériumainak: a mérések között szerepelt olyan alkatrész, amely kevésbé sugárzástűrő (például a DC-DC feszültségcsökkéntő és a mikrovezérlő), de akadtak alkatrészek, amelyek közel elérték a sugárzásállósági kritériumokat is (LDO feszültségszabályozó, N csatornájú FET). A besugárzási mérések alatt elmondható, hogy találtam olyan eszközöket, amelyek méréseinek megismétlésével megegyező eredményeket kaptam (például az LDO feszültségszabályozó esetén), illetve voltak olyan alkatrészek, amelyek ismételt méréseinél eltérő degradálódási folyamatot tapasztaltam.

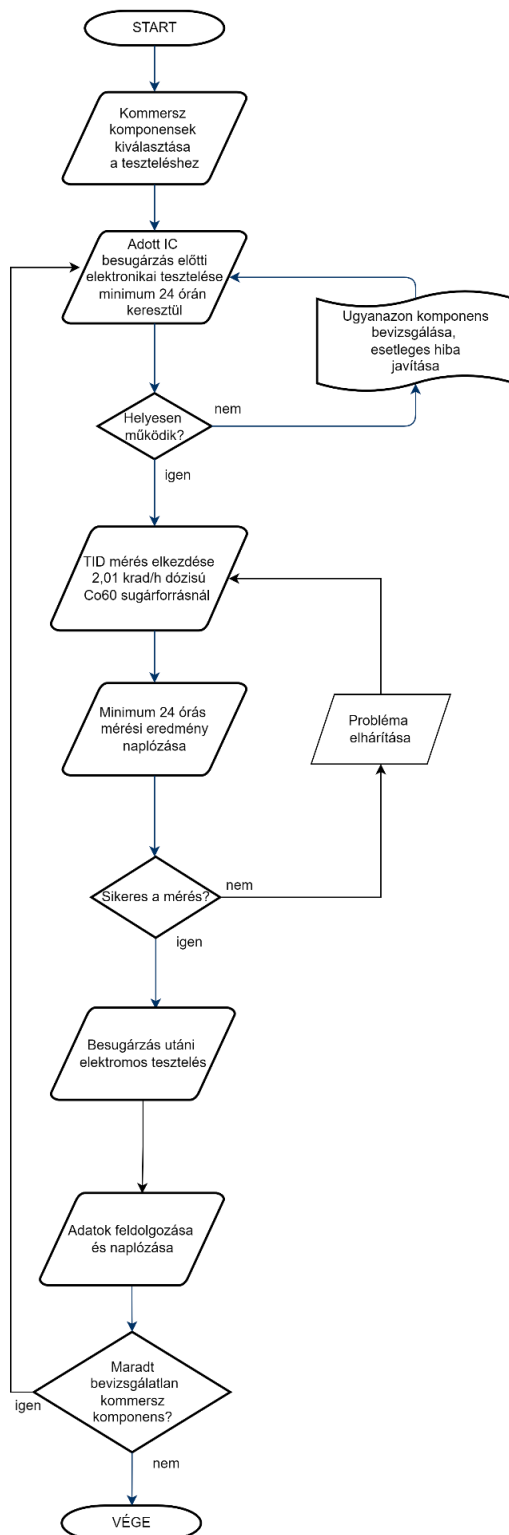
Mindent összevetve, az eredmények is tükrözik és alátámasztják az irodalmat és a kutatásokat, miszerint léteznek olyan kereskedelmi forgalomban kapható félvezető eszközök, amelyek ionizáló sugárzási környezetben vagy sugárzás tűrő vagy sugárzásálló képességgel rendelkeznek. Bár nem minden kereskedelmi forgalomban lévő alkatrész sugárzásálló vagy sugárzástűrő, azonban néhányuk megfelelő lehet sugárzási környezetben is. A tervezés és a mérési elrendezés megvalósítása során alacsony költségvetésből kiindulva sikerült a kitűzött feladatot megoldani.

A jövőbeli tervek között szerepel az alkatrészek vizsgálatának egy újabb szintje, a komponensek rendszerben történő vizsgálata és rendszer szintű tesztelése.

A FÜGGELÉK

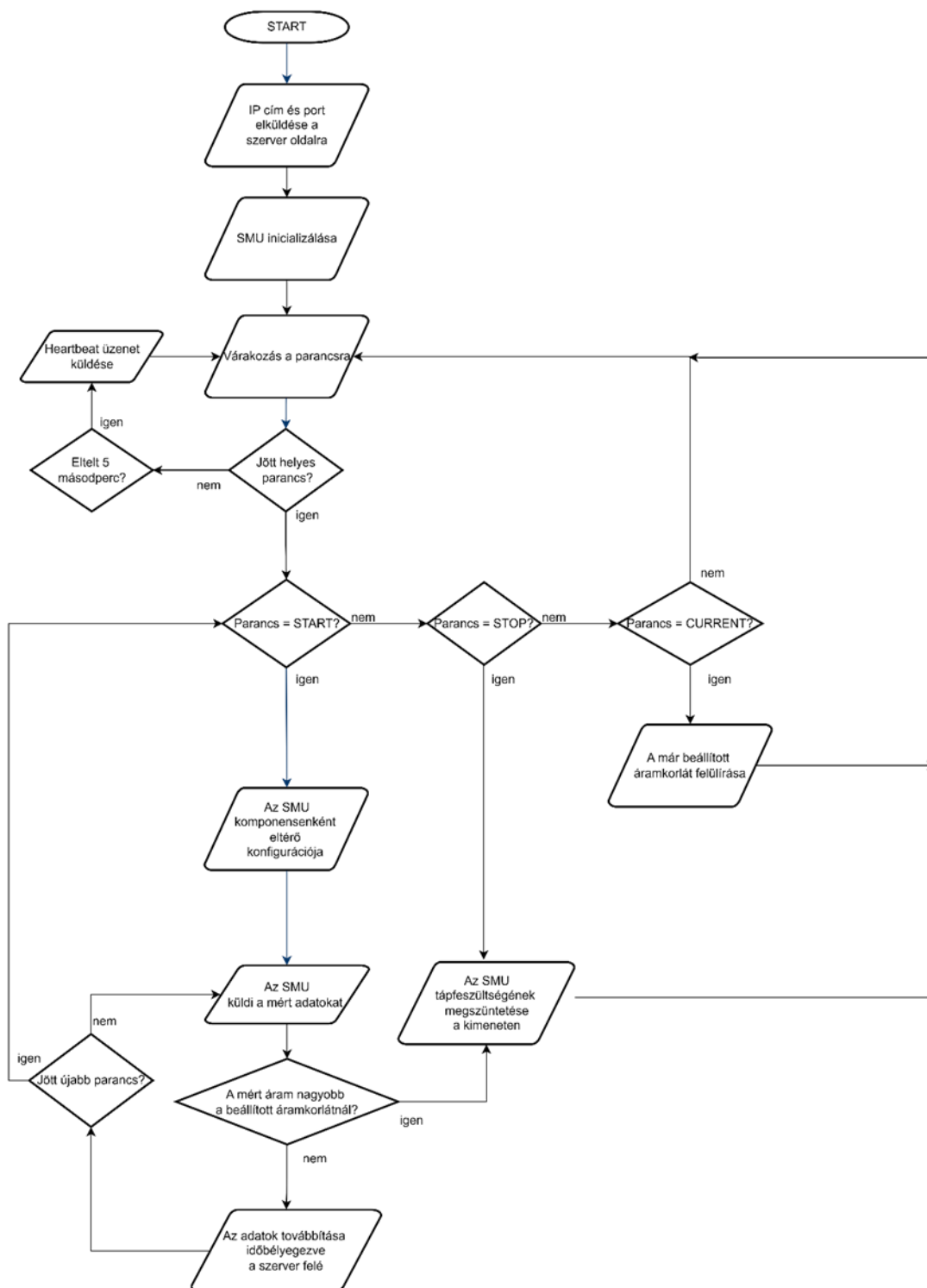
A.1 FÜGGELÉK: A TID MÉRÉS FOLYAMATÁBRÁJA

Az alábbi ábrán bemutatásra kerül az általam használt TID mérés előkészületei és kritériumai.



A.2 FÜGGELEK: AZ SBC-N FUTÓ SZOFTVER FOLYAMATÁBRÁJA

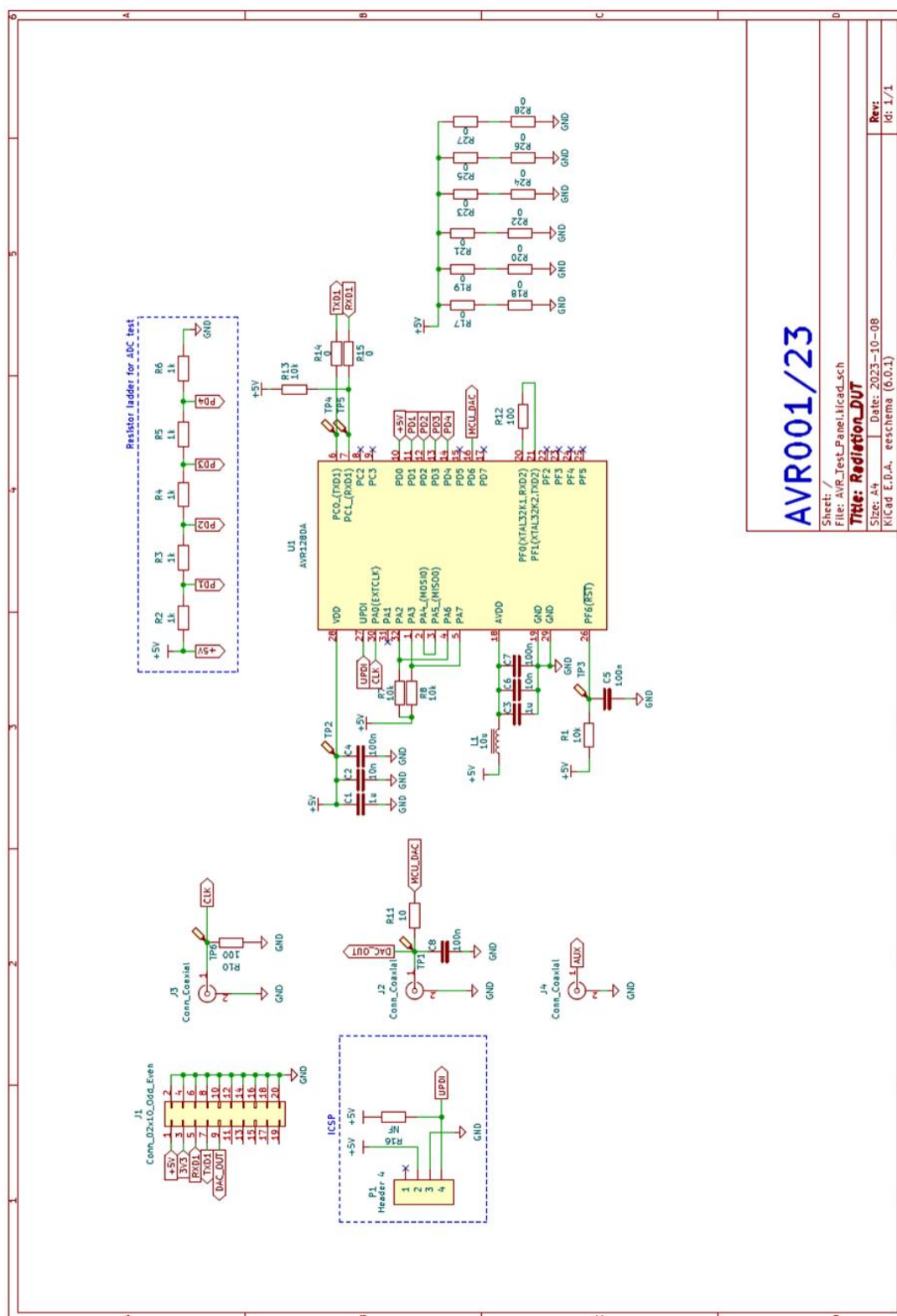
Az alábbi folyamatábrán bemutatásra kerül a 30-32. oldalakon részletezett szoftver folyamatábrája.



B FÜGGELÉK

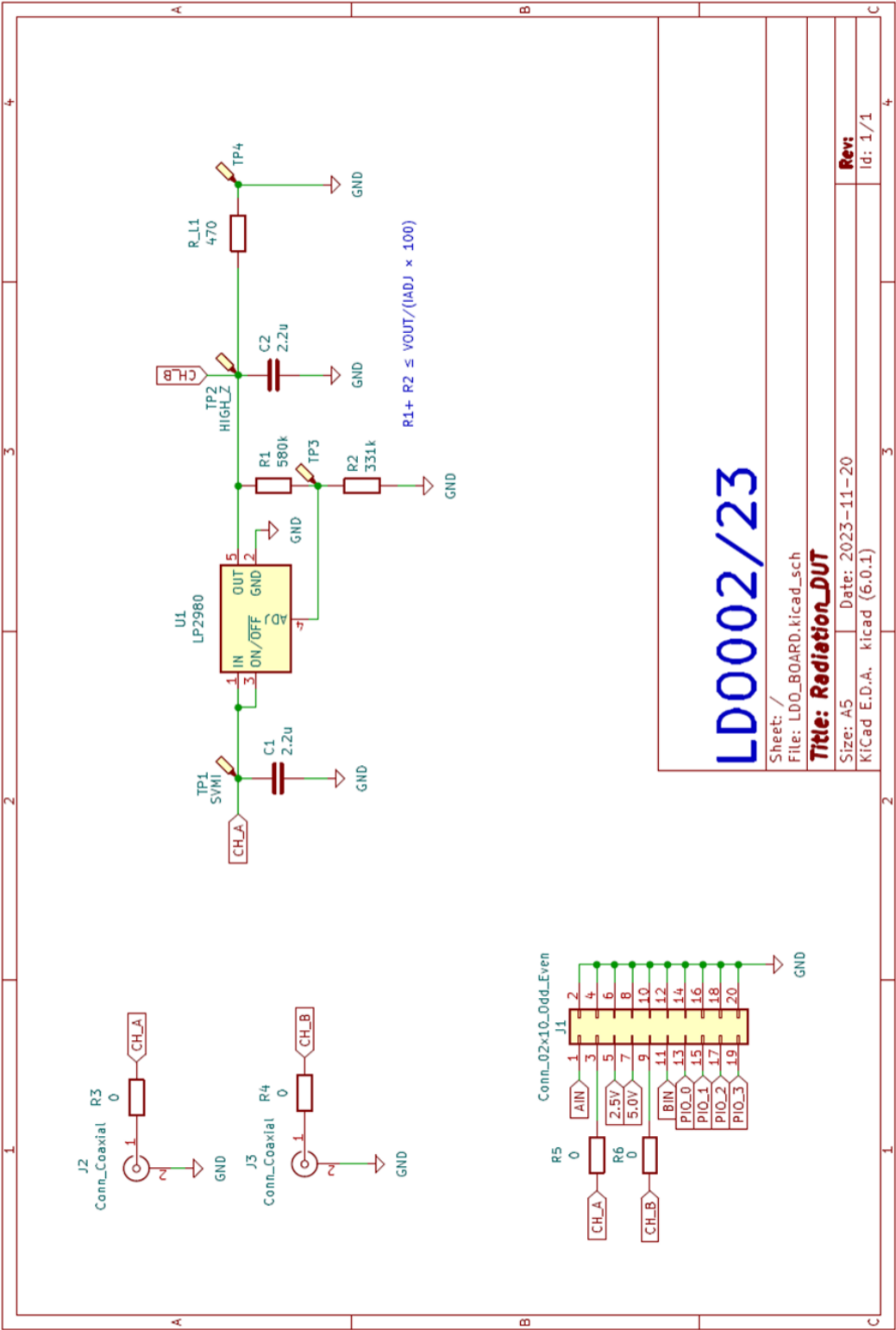
B.1 FÜGGELÉK: A MIKROVEZÉRLŐ KAPCSOLÁSI RAJZA

Az alábbiakban található az AVR128DA32 mikrovezérlő TID méréséhez készült kapcsolási rajza.



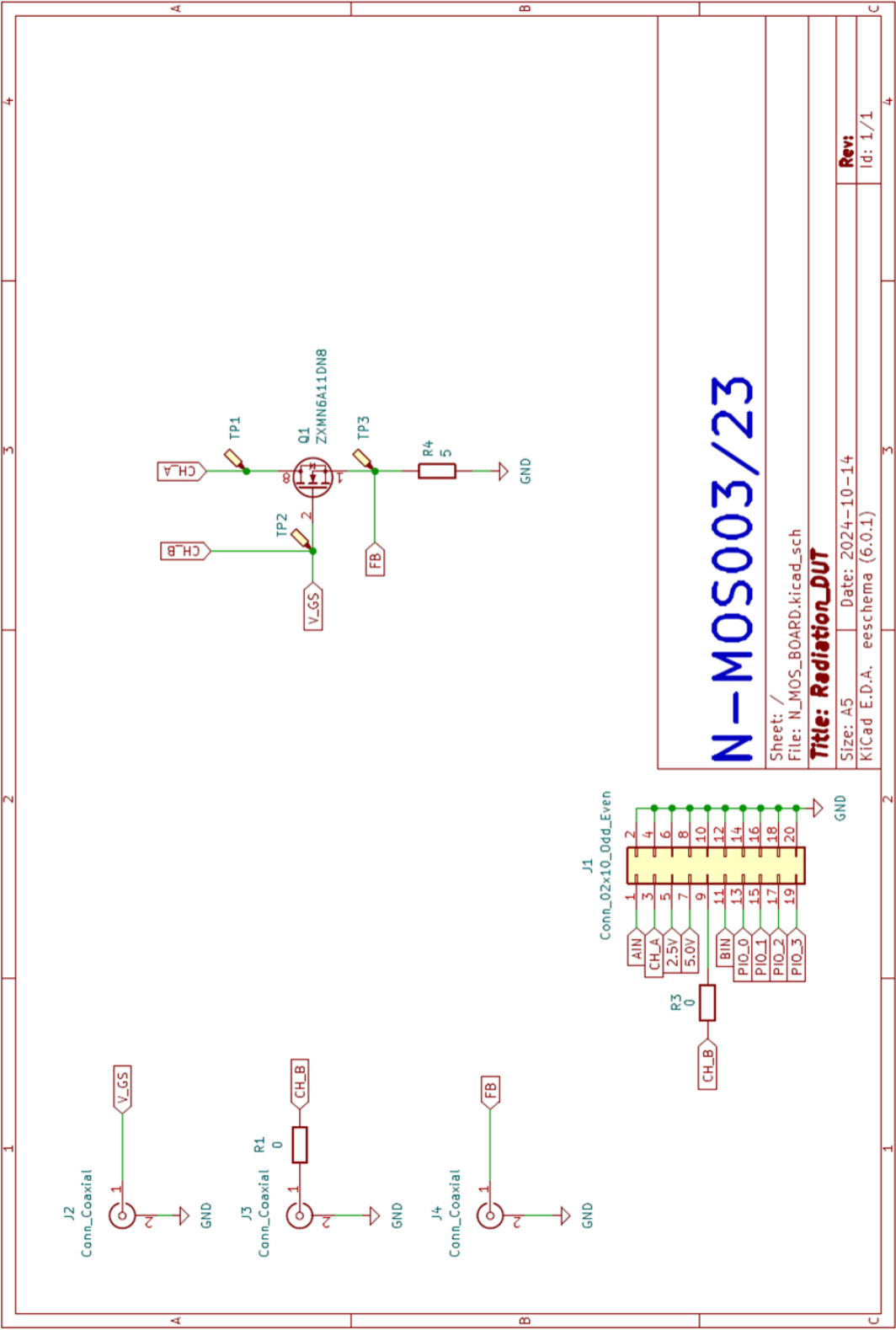
B.2 FÜGGELEK: LDO FESZÜLTÉGSZABÁLYOZÓ KAPCSOLÁSI RAJZA

Az alábbiakban található az LP2980 feszültszabályozó TID méréséhez készült kapcsolási rajza.



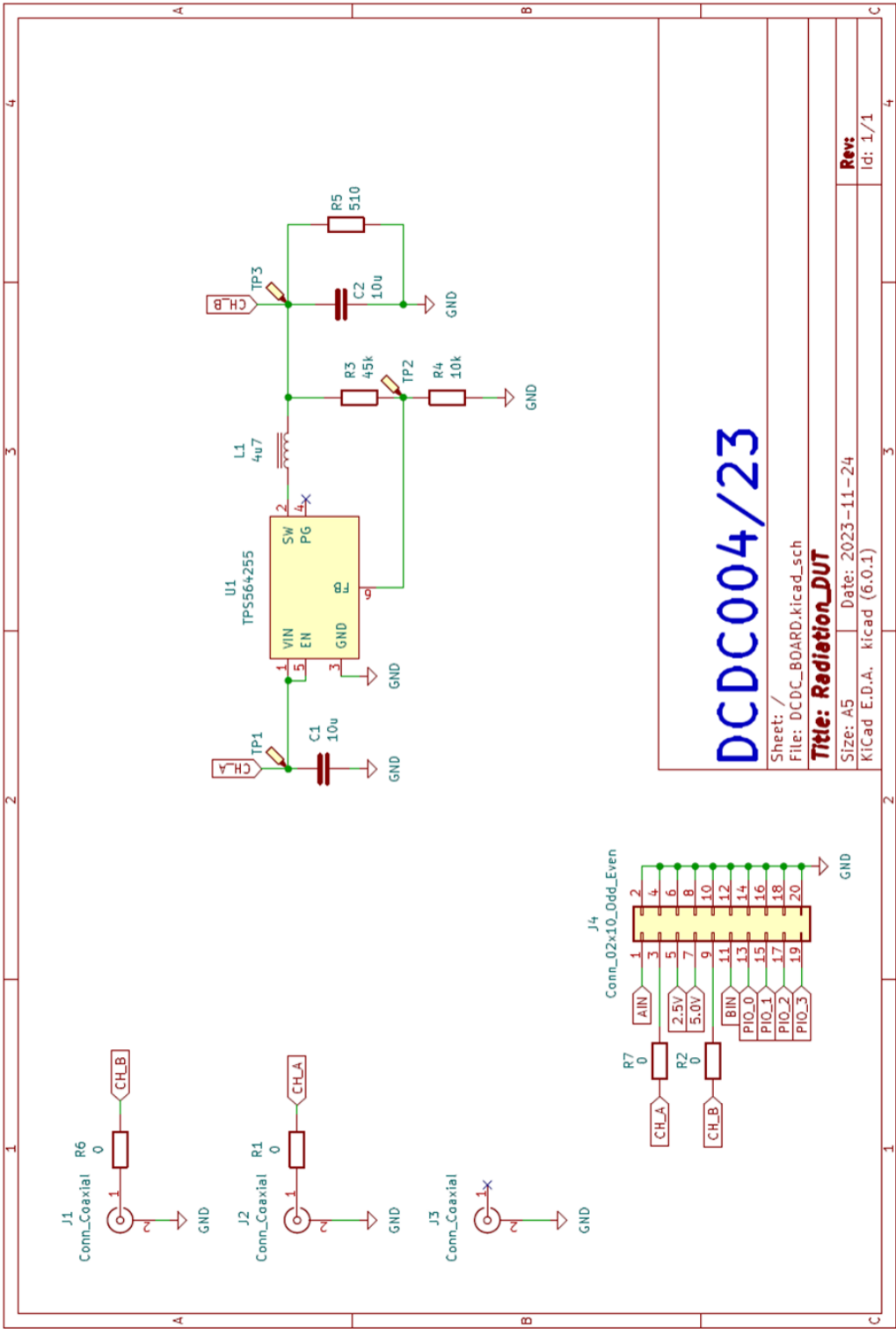
B.3 FÜGGELÉK: N-CSATORNÁJÚ MOSFET KAPCSOLÁSI RAJZA

Az alábbiakban található a ZXMN6A11DN8 N csatornájú MOSFET TID méréséhez készült kapcsolási rajza.



B.4 FÜGGELEK: DC-DC FESZÜLTSGCSÖKKENTŐ KAPCSOLÁSI RAJZA

Az alábbiakban található a TPS5564255 DC-DC feszültségcsökkentő TID méréséhez készült kapcsolási rajza.



Az alábbiakban található az IR2104S FET meghajtó TID méréséhez készült kapcsolási rajza.



Az alábbiakban található az SN75176AD RS485 kommunikációs interfész IC TID méréséhez készült kapcsolási rajza.



IRODALOMJEGYZÉK

- [1] L. Ratti, „Ionizing radiation effects in electronic devices and circuits,” in *Space Applications and Medical Physics*, INFN Laboratori Nazionali di Legnaro, National Course in Detectors and Electronics for High Energy Physics, Astrophysics, 2013.
- [2] „Van Allen sugárzási öv” ,https://hu.wikipedia.org/wiki/Van_Allen_sugárzási_öv.
- [3] „A sugárhatás biofizikai sajátosságai: LET-fogalom,”
https://socrad.hu/docview.aspx?r_id=33393734&web_id=&mode=1.
- [4] NASA, „ELECTRICAL, ELECTRONIC, AND ELECTROMECHANICAL (EEE) PARTS ASSURANCE STANDARD,” 2017., <https://s3vi.ndc.nasa.gov/ssri-kb/static/resources/nasa-std-8739.10.pdf>.
- [5] „ECSS-Q-ST-60-15C – Radiation hardness assurance – EEE components,”
<https://ecss.nl/standard/ecss-q-st-60-15c-radiation-hardness-assurance-eee-components-1-october-2012/>.
- [6] „INTEGRATED CIRCUITS (MICROCIRCUITS) MANUFACTURING, GENERAL SPECIFICATION,” , <https://nepp.nasa.gov/DocUploads/591D8C5B-C750-4462-B37E007D578B121D/MIL-PRF-38535.pdf>.
- [7] D. Sinclair és J. Dyer, Radiation effects and COTS parts in SmallSats, 2013.
- [8] B. Trump, Radiation Handbook for Electronics, Texas Instruments, Dallas, TX, USA, Tech. Rep., 2019.
- [9] „KiCad EDA,” , <https://www.kicad.org/>.
- [10] „ADALM1000 Learning Module,” , <https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/adalm1000.html#eb-overview>.
- [11] „Orange Pi Zero,”
<http://www.orangepi.org/html/hardWare/computerAndMicrocontrollers/details/Orange-Pi-Zero.html>.
- [12] „Library for interfacing with ADALM1000 devices,”
<https://analogdevicesinc.github.io/libsmu/>.
- [13] „250mA, 4V to 80V Low Dropout Micropower Linear Regulator,” ,
<https://www.mouser.com/datasheet/2/609/lt3012-3123803.pdf>.
- [14] „High Voltage 500mA, 200kHz Step-Down Switching Regulator with 100 μ A Quiescent Current,” , <https://www.mouser.com/datasheet/2/609/3437fc-3123880.pdf>.

- [15] „60V DUAL N-CHANNEL ENHANCEMENT MODE MOSFET,” ,
<https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ZXMN6A11DN8.pdf>.
- [16] „IR2104(S) HALF-BRIDGE DRIVER,” ,
https://www.mouser.com/datasheet/2/196/Infineon_IR2104_DS_v01_00_EN-3165910.pdf.
- [17] „SN65HVD1781A-Q1 Fault-Protected RS-485 Transceivers With 3.3-V to 5-V Operation,” , <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd1781a-q1.pdf>.
- [18] „AVR128DA32,” Microchip, <https://www.microchip.com/en-us/product/avr128da32>.
- [19] S. Danzeca, „The new version of the Radiation Monitor system for the electronics at the CERN: electronic components radiation hardness assurance and sensors qualification,” Doctoral dissertation, Université Montpellier, 2015.
- [20] M. Di , M. S, F. A & S. G , „Towards defining a simplified procedure for COTS system-on-chip TID testing,” *Nuclear Engineering and Technology*, pp. 50(8), 1298-1305, 2018.
- [21] T. Fried, „Radiation testing of low cost, commercial off the shelf microcontroller board,” *Nuclear Engineering and Technology* 53.10, pp. 3335-3343, 2021.
- [22] H. Spieler, „Introduction to radiation-resistant semiconductor devices and circuits,” in *AIP Conference Proceedings. Vol. 390. No. 1*, American Institute of Physics, 1997.
- [23] S. Buchner és D. McMorro, „Overview of single event effects,” Proc. 11th Int. School Effects Radiation Embedded Syst. Space Appl.(SERESSA), 2015, November.
- [24] M. Lee és S. Jeong, „Implementation of a Radiation-hardened I-gate n-MOSFET and Analysis of its TID (Total Ionizing Dose) Effects.,” *Journal of Electrical Engineering and Technology* 12(4), pp. 1619-1626, 2017.
- [25] J. Molnár & A. Fenyvesi , „FEJLESZTÉSEK A CMS MŰONDETEKTORAINAK HELYZETÉRZÉKEŐ RENDSZERÉHEZ,” *Fizikai Szemle* , p. 47, 2004.
- [26] B. B, „Radiation testing of electronics for the CMS endcap muon system,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* , 2013.