

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Marko Likar

Gama spektrometer na osnovi scintilacijskega pretvornika

Diplomsko delo visokošolskega študija

Mentor: doc. dr. Marko Jankovec

Ljubljana, 2014

Zahvala

Za pomoč se zahvaljujem vsem, ki so vplivali na izbiro teme, saj je ponujala zadovoljiv izziv, in tistim, ki so pripomogli k dokončanju zaključnega dela!

Povzetek

Običajno nas pri meritvah sevanja zanima ne samo aktivnost, ampak tudi energija nekega neznanega ionizirajočega sevanja. Zato sem se namenil izdelati instrument, ki bo lahko meril poleg jakosti tudi energijski spekter γ žarkov.

Gama fotoni so energijski kvanti elektromagnetnega sevanja z zelo veliko energijo, takšno, ki je sposobna preko fotoefekta, Compton-ovega sipanja ali tvorbe parov ionizirati atome v snovi skozi katero potuje. Pri tem atomi oddajajo energijo, ki jo lahko nato pretvorimo v svetlobno ali električno. V diplomskem delu bom za meritve energijskega spektra γ sevanja, uporabil NaI(Tl) scintilacijski kristal in fotopomnoževalko. Kristal bo služil pretvorbi ionizacijske energije v svetlobno, kjer se informacija o energiji primarnega fotona ohranja oziroma je jakost svetlobnega impulza sorazmerna energiji vpadnega γ fotona.

Svetlobne impulze, ki so vsi enake valovne dolžine, le različne jakosti, pa bo fotopomnoževalka ojačala in pretvorila v tokovne. Glavne lastnosti fotopomnoževalke, ki jih je potrebno poznati so spektralna občutljivost, kvantni izkoristek fotokatode, velikost in oblika fotokatode ter ojačanje in delovna napetost.

Za delovanje R878 fotopomnoževalke, ki sem jo uporabil potrebujemo visoko napetost. Ta mora biti stabilna saj je ojačanje fotopomnoževalke zelo odvisno od nihanja dinodnih napetosti. Ker zahteva tiskano vezje s visokimi potenciali večjo pozornost je narejeno na ločeni tiskanini, ki je povezana na glavni del le z napajalnim priključkom.

Glavni del tiskanine pa vsebuje nabojni ojačevalnik za pretvorbo impulzov fotopomnoževalke v obliko primerno za meritve z AD pretvornikom, mikrokrmilnik za obdelavo meritev, grafični prikazovalnik, tipke in napajalni del.

Na koncu, ko je bil instrument skupaj s programom na mikrokrmilniku končan, sem lahko opravil še meritve nihanja visoke napetosti, doseg instrumenta od najnižje možne energije pa do najvišje, ki jo lahko še merimo, ločljivost pri določenih energijah in linearnost izmerjenega energijskega spektra. Izkazalo se je, da instrument ponuja kljub nekaj ubranim bližnjicam dobro ločljivost. Pri merjenju izotopa K-40, s sevalno energijo γ sevanja 1460 keV, ima instrument 5.3 % ločljivost. Kar je primerljivo z drugimi merilniki, ki so na voljo te čase na tržišču. Žal pa zaradi zmanjšanja porabe visokonapetostnega dela ima za skoraj 3.6 % slabšo linearnost, ki na vgrajenem prikazovalniku ni opazna. Za natančnejše meritve na računalniku pa je nelinearnost prevelika.

Ključne besede: Gama spektrometer, scintilator, fotopomnoževalka, tiskano vezje.

Abstract

Generally when measuring radiation we are interested not only in intensity but in energy of unknown ionising radiation too. For this purpose I committed myself to built such instrument that will be capable of measuring intensity and energy spectrum of γ radiation.

Gamma photons are energy quanta of electromagnetic radiation with such high energy that is capable through photo-effect, Compton scattering or pair production ionise an atom in matter through which it travels. In this process photons give energy to matter. This ionising energy can be converted to light or electric energy. In this thesis at measuring energy spectrum of γ radiation I will use NaI(Tl) scintillation crystal and photomultiplier tube. Crystal will convert energy in to light pulses. At this conversion the energy information is preserved. Respectively the intensity of light impulse is proportional to energy loss of primary photons.

Light pulses from the crystal which are all of the same wavelength but different intensity will be measured, converted and amplified by photomultiplier tube (PMT). Main properties of PMT that are necessary to know are spectral sensitivity, photocathode quantum efficiency, size and shape of photocathode, amplification and working voltage.

For R878 PMT tube which I used we need high voltage supply. This voltage must be very stable because of amplification dependency. The printed circuit also needs some special attention because of this high potential difference. For this purpose the high voltage circuit is made on separate printed circuit board connected only with power supply connector to main board. Main circuit board contains charge amplifier for conversion of PMT pulses into pulses that can be read by ADC, microcontroller for measurements processing, graphic LCD, four keys and power supply section.

At the end when the instrument was finished together with the program on microcontroller, we were able to measure fluctuation of high voltage supply, energy range of the instrument, linearity and resolution at specified energy. Despite of some shortcuts taken, the measured resolution at 1460 keV from K-40 radioactive element was 5.3 %. Which is very good and comparable to other such instrument nowadays on the market. But on the other hand because of lowering the power consumption of high voltage supply, the linearity is very poor, measured 3.6 %. Which is not visible on the built in LCD, but for more precise measurements on computer it is too high.

Keywords: Gamma spectrometer, scintillator, photomultiplier tube, printed circuit.

Kazalo

Seznam slik.....	1
Seznam tabel.....	3
Seznam uporabljenih simbolov in okrajšav.....	4
Uvod.....	5
Predvideni deli instrumenta.....	6
1 Sodelovanje fotonov γ s snovjo.....	7
1.1 Fotoefekt.....	7
1.2 Comptonov pojav.....	9
1.3 Tvorba parov.....	11
2 Scintilator.....	12
2.1 Anorganski scintilatorji.....	14
2.2 Pričakovan odziv scintilatorja.....	16
2.2.1 Dodatni notranji vplivi na odziv.....	19
2.2.2 Zunanji vplivi na odziv.....	19
2.2.3 Vsota sočasnih impulzov.....	20
2.3 Izbira velikosti.....	21
3 Fotopomnoževalka.....	23
3.1 Lastnosti fotopomnoževalk.....	23
3.1.1 Spektralni odziv.....	24
3.1.2 Ojačanje.....	26
3.1.3 Temni tok.....	28
3.1.4 Učinkovitost zbiranja.....	30
3.1.5 Časovni odziv.....	30
3.2 Uporovni delilnik.....	31
3.3 Fotopomnoževalka R878.....	33
3.4 Ohišje scintilatorja in fotopomnoževalke.....	35
4 Visoko napetostno napajanje.....	37
4.1 Kratek opis vezja.....	38
4.2 Težave.....	39
5 Pretvorba nabojnih impulzov.....	41
6 Digitalni del.....	44
7 Napajanje.....	46
7.1 Napetostni regulatorji.....	47
8 Tiskano vezje.....	51
8.1 Načrtovanje tiskanine VN dela.....	53
9 Program za mikrokrmilnik.....	55
9.1 Meritve impulzov.....	56
9.2 Uporabniški vmesnik.....	59
10 Testiranje prototipa.....	66
Priloge.....	70
Priloga A.....	70
Priloga B.....	71
Priloga C.....	72
Viri in literatura.....	73

Seznam slik

- Slika 1: Predvidena blok shema instrumenta.
- Slika 2: RobK v železu.
- Slika 3: Shema Comptonovega sipanja.
- Slika 4: Teoretična porazdelitev energij za fotoefekt ter Comptonov pojav.
- Slika 5: Absorpcija γ žarkov NaI(Tl) kristala [3].
- Slika 6: Energijska stanja dopiranega scintilacijskega kristala.
- Slika 7: Odziv majhnega detektorja.
- Slika 8: Odziv velikega detektorja.
- Slika 9: Spektralni odziv scintilatorja-detektorja »uporabnih« velikosti.
- Slika 10: Vpliv zunanjih materialov na odziv detektorja.
- Slika 11: Eksperimentalni primer meritve americija 241.
- Slika 12: NaI(Tl) scintilator velikosti 5x5 cm uporabljen v instrumentu.
- Slika 13: Prečni prerez fotopomnoževalke s čelnim oknom.
- Slika 14: Spektralni odzivi za različne fotokatode iz tabele 3 [3].
- Slika 15: Ojačanje fotopomnoževalk s premerom fotokatode 51mm.
- Slika 16: Značilen potek temnega toka.
- Slika 17: Izkoristek zbiranja med fotokatodo in prvo dinodo [3].
- Slika 18: Shematski prikaz fotopomnoževalke z uporovnim delilnikom.
- Slika 19: Delilnik napetosti s premostitvenimi kondenzatorji [3].
- Slika 20: Shema delilnika ter priporočljive vrednosti za R878.
- Slika 21: Vpliv magnetne zaščite na občutljivost 51mm fotopomnoževalk.
- Slika 22: Vezje VN vira za fotopomnoževalko.
- Slika 23: Kondenzator (črna puščica), »odrešitev« 20 Hz oscilacij.
- Slika 24: Spremenjena shema VN vira.
- Slika 25: Nabojni ojačevalnik s stikalnim praznjenjem kondenzatorja.
- Slika 26: Shema analognega dela instrumenta.
- Slika 27: Digitalni del vezja.
- Slika 28: Potrebe napajanja različnih sklopov vezja.
- Slika 29: Shema izvedbe odklopa baterije in polnilca baterije IC5.
- Slika 30: 3.3 V Zetex regulator.

Slika 31: Vezje za prilagoditev napetosti.

Slika 32: Vezje 5 V stikalnega regulatorja.

Slika 33: Vezje napetostnega pretvornika za negativno napajanje.

Slika 34: Razpored različnih delov na glavni tiskanini.

Slika 35: Povezave stikalnega 5 V in -5 V napetostnega pretvornika.

Slika 36: »Obkolitev« analognih povezav do mikrokrmilnika.

Slika 37: Povezave tiskanega vezja VN dela.

Slika 38: Kroglice spajke na odščipnjenih žicah, kjer bo prisotna VN.

Slika 39: Pritrditev VN dela tiskanine na glavno.

Slika 40: Približen potek napetostnega signala na izhodu nabojnega ojačevalnika.

Slika 41: Časovni potek AD pretvorbe za kanal 0 in 1 brez ojačanja [22].

Slika 42: Blok shema različnih menijev vmesnika, ki jih lahko izbere uporabnik.

Slika 43: Prikazana je trenutna aktivnost, čas meritve in spekter sevanja.

Slika 44: Spekter sevanja s kazalcem na posamezno energijo.

Slika 45: Kalibracija kazalca.

Slika 46: Analogni prikaz trenutne aktivnosti meritve.

Slika 47: Prikaz stanja povezave s programom LabView na računalniku.

Slika 48: Nastavitve instrumenta.

Slika 49: Napetost Li-ion abaterije pri praznjenju [23].

Slika 50: Indikator stanja baterije, in priključitve zunanje napajanja (USB izpis).

Slika 51: Uporovni delilnik, za namene meritev VN izhoda.

Slika 52: Valovitost VN napajanja.

Seznam tabel

Tabela 1: Karakteristični parametri nekaterih anorganskih ter plastičnih scintilatorjev.

Tabela 2: Glavne lastnosti scintilatorja.

Tabela 3: Spektralne lastnosti različnih fotokatod [3].

Tabela 4: Glavne lastnosti R878 fotopomnoževalke [12].

Tabela 5: Tipične energijske resolucije spektrometrov z NaI(Tl) kristalom [3].

Tabela 6: Meritve resolucije s pomočjo kalija-40 in americija-241.

Tabela 7: Odstopanje izmerjenih vrhov od prave vrednosti.

Seznam uporabljenih simbolov in okrajšav

α	Alfa delec ali alfa sevanje,	
β	Beta delec ali beta sevanje,	
γ	Gama foton ali gama sevanje,	
m_0	Mirovna masa elektrona,	
c	Hitrost svetlobe v vakuumu,	
NaI(Tl)	Natrijev-jodid kristal dopiran s talijem,	
VN	Visoka napetost,	
PMT	Fotopomnoževalka	(photomultiplier tube),
PSRR	Slabljenje motenj napajanja	(power supply rejection ratio),
op. ojačevalnik	Operacijski ojačevalnik,	
AD pretvornik	Analogno-digitalni pretvornik,	
AC	Analogni primerjalnik	(analog comparator),
DA pretvornik	Digitalno-analogni pretvornik,	
LBF	Signalizacija nizke napetosti	(low battery flag),
ESR	Ekvivalentna serijska upornost	(equivalent series resistance).
DFLL	Digitalna kalibracijska zanka	(digital frequency looked loop).
RTC	Realno-časovna ura	(real time clock).
FWHM	Polna širina pri polovični višini	(full width at half maximum)

Uvod

Ionizirajoče sevanje je naravni pojav in je s nami že od vsega začetka-nastanka vesolja. Ampak človek žal ni razvil čutil za zaznavanje te vrste sevanja, zato ga neposredno ne moremo občutiti ali meriti. Zatorej ker smo že po naravi radovedni je bilo potrebno narediti naprave za točna merjenja in postavitev nepristranskih rezultatov. Na tak način si je človek izostril svoja čutila in razvil nova za zaznavanje in merjenje ionizirajočega sevanja.

Iz radovednosti do teh zanimivih pojavov pri radioaktivnih snoveh, se je pojavila želja po tem, da bi izdelal instrument s katerim bi meril ne samo aktivnosti, ampak tudi energije teh pojavov, ter tako lahko določil radioizotope v vzorcih. Ker v 90% primerih ob α (delec z enako maso in nabojem kot jedro helija) ali β (hitri elektroni) razpadu sledi tudi izsev γ fotona, bi bil instrument za merjenje energij γ sevanja najboljša izbira.

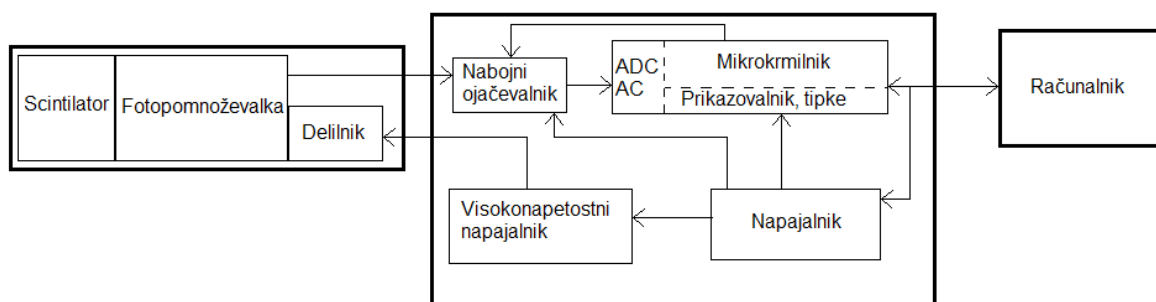
V diplomskem delu se bom torej posvetil opisu glavnih pojavov izgube energije γ fotonov v snov, opisu izdelave naprave za merjenje energije γ žarkov, težav na katere sem naletel ob izdelavi ter izboljšave, ki bi bile potrebne na prototipu. Opis izdelave bo sledil signalu od pretvorbe γ žarka v scintilacijske fotone, skozi fotopomnoževalko, od nabojnega ojačevalnika do AD pretvornika ter prikazu podatkov na tekočerkristalnem prikazovalniku ali računalniku.

Predvideni deli instrumenta

Najprej bi rad, za lažje razumevanje, na hitro namenil nekaj besed predvidenim glavnim delom instrumenta.

Za pretvorbo γ sevanja v električni signal bom uporabil sklop scintilatorja in fotopomnoževalke. Scintilator bo služil kot pretvornik med ionizirajočim sevanjem ter fotoni v »vidnem« delu optičnega čutila - fotopomnoževalko. Večja energija γ žarkov povzroči v scintilatorju večje število fotonov iste valovne dolžine (približno 38000 scintilacijskih fotonov na 1 MeV odložene energije v NaI(Tl) kristalu). Ta svetlobni impulz, ki je premo sorazmeren energiji vpadnega sevanja v scintilator, lahko izmerim s fotopomnoževalko. Ta mora imeti največjo občutljivost pri valovni dolžini scintilacijskih fotonov, da izgubim čimmanj informacij o primarnem γ fotonu.

Fotopomnoževalka torej pretvori ter ojača optični signal v električnega. Za pravilno delovanje potrebuje visoko napetost, ki je preko delilnika priključena nanjo. Nabojni impulz, ki ga dobim lahko nato pretvorim s pomočjo nabojnega ojačevalnika v napetostnega, ki ga z AD pretvornikom pomerim ter shranim v mikrokrmilnik. Za hitrejše delovanje oziroma manjši mrtvi čas (čas, v katerem ne zaznamo novih dogodkov) nabojni ojačevalnik krmilim z mikrokrmilnikom. Pridobljene meritve energije in hitrosti sevanja bodo na koncu prikazani na grafičnem prikazovalniku, vgrajenem v instrument ali pa poslane na računalnik za natančnejšo obdelavo. Instrument pa bo napajen preko baterije ali USB priključka.



Slika 1: Predvidena blok shema instrumenta.

1 Sodelovanje fotonov γ s snovjo

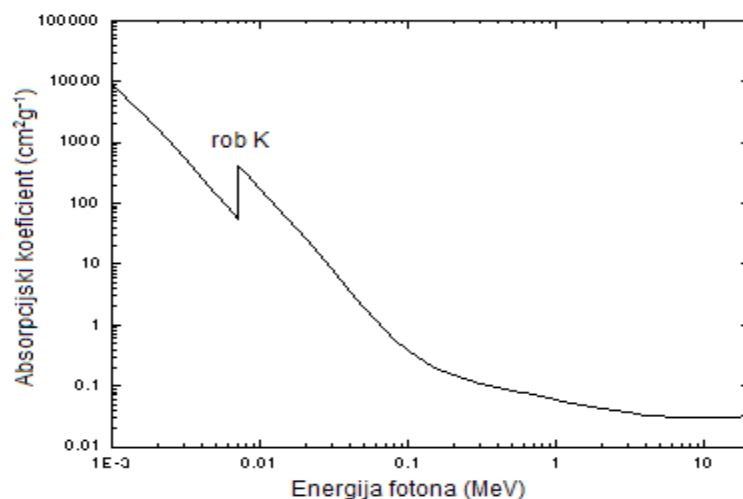
Da bi bolje razumeli odziv scintilacijskega detektorja, moramo najprej razumeti kako γ foton deluje na snov. Ti γ fotoni (sem bom prištel tudi fotone X) so delci brez naboja in mase, zato spadajo med posredno ionizirajoče sevanje. V katastrofalnem trku predajo vso svojo energijo ali le večji del le te elektronom v atomskih lupinah.

Obstajajo trije glavni (prevladujoči) procesi, s katerimi se to zgodi. To so fotoefekt, Comptonovo sipanje ter tvorba para pozitron-elektron v električnem polju atoma. Najpomembnejši izmed njih je fotoefekt. Pri fotoefektu foton preda vso svojo energijo elektronu iz notranjih lupin atoma ter ga izbije, sam pa izgine. Pri Comptonovem pojavu preda foton le del svoje energije elektronu na bolj zunanji obli atoma ter ga izbije, sam pa obdrži del energije. Če je energija fotona večja od 1,02 MeV, lahko v bližini jedra (ali elektrona) sprosti par pozitron-elektron (tvorba parov), ki prevzameta vso fotonovo energijo.

Med procese interakcij gama fotonov s snovjo naj omenim še elastična sipanja: Rayleigh-jevo sipanje na vezanih atomskih elektronih, resonančno sipanje na jedrskih stanjih, Thompsonovo sipanje na protonih v jedru ter potencialno (Delbruck-ovo) sipanje, pri katerem se fotoni sipljejo na elektromagnetnem polju jedra. Ker imajo ti pojavi veliko manjši presek (efektivna površina na atom za opazovani proces) od glavnih treh pojavov, ali pa foton ne izgublja energije oziroma nimajo večjega vpliva na foton, lahko elastična sipanja zanemarimo pri razlagi meritev.

1.1 Fotoefekt

Pri sipanju fotona na vezanem elektronu lahko elektron prejme vso njegovo energijo. Nekaj jo porabi za premaganje vezavne energije, preostanek pa elektron odnese kot kinetično energijo. Takrat govorimo o fotoefektu. Ker je pri močnejše vezanem elektronu pojav bolj verjeten, kot pa na zunanjih elektronih, je zato razumljivo, da je največji presek na elektronih v lupini K. Upoštevati je potrebno tudi dejstvo, da mora imeti foton višjo energijo kot je vezavna energija elektrona v izbrani lupini. Ko kinetična energija fotona doseže vezavno energijo elektrona se presek za fotoefekt zelo poveča. Efekt je najbolj izrazit za lupino K. Takrat govorimo o robu K (slika 2). Pri višjih energijah presek hitro pada, ter ga sčasoma preglaši Comptonov pojav. Presek za fotoefekt je močno odvisen od vrstnega števila snovi, sorazmeren je z Z^5 .



Slika 2: Rob K v železu.

Po izsevanju fotoelektrona ostane v elektronski lupini praznina, atom pa je vzbujen za vrednost vezalne energije izbitega elektrona. Ko v praznino skoči elektron iz sosednje lupine, izseva karakteristični foton X. Pri srednje težkih ter težkih jedrih je ta energija v rentgenskem območju. Vzbujeni lahki atomi pa pogosto ne izsevajo karakterističnega fotona, ampak katerega od manj vezanih elektronov (Augerjevi elektroni).

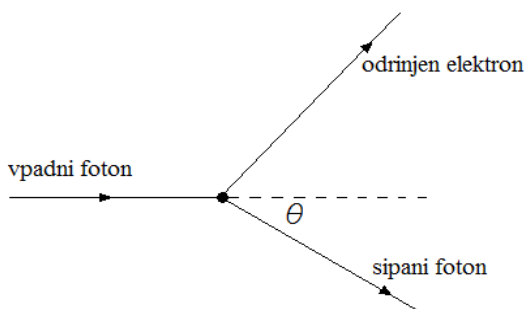
Pri fotoefektu je izsevanje fotoelektronov in karakterističnih žarkov X glede na odzivni čas detektorja (npr. scintilatorja) istočasno. Enako velja tudi za fotoelektrone, ki jih sprostijo v prostornini detektorja karakteristični fotoni. Torej vse ionizacije vpadnega fotona prispevajo k istemu sunku elektronov. Ta se pri meritvi odraža v vrhu, ki mu pravimo vrh popolne absorpcije ali fotovrh in ustreza energiji vpadnih fotonov γ . Le če je verjetnost za absorpcijo fotonov X nizka (če je aktivna prostornina detektorja sestavljena iz lahkih atomov) ter, če je prostornina detektorja majhna, se lahko poleg vrha popolne absorpcije v spektru sunkov pojavi še vrh, ki ustreza pobegu fotonov X. Ta vrh je za vezalno energijo elektrona nižji od vrha popolne absorpcije. V števcih, ki vsebujejo težke snovi, elektroni izgubljajo del energije tudi s zavornim (bremsstrahlung sevanje) sevanjem. Tudi del teh zavornih fotonov lahko pobegne iz števca ter tako ne prispeva k popolni absorpciji. Sunki ustreznih elektronov zaradi tega postanejo nižji, ter v območju nizkih energij niso več simetrični. Pravimo, da dobijo »rep«.

1.2 Comptonov pojav

Pri tem pojavu se vpadni foton siplje na elektronih z delno izgubo energije. Običajno se to zgodi na elektronih zunanjih lupin atoma. Vežalna energija je zanemarljiva v primerjavi z energijo vpadnega fotona. Zato lahko predpostavimo, da se energija porazdeli le med odrinjen elektron ter sipani foton. Energijo $E_{\gamma'}$, ki jo odnese foton lahko izračunamo po enačbi (1):

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_0 \cdot c^2} \cdot (1 - \cos\theta)} \quad (1)$$

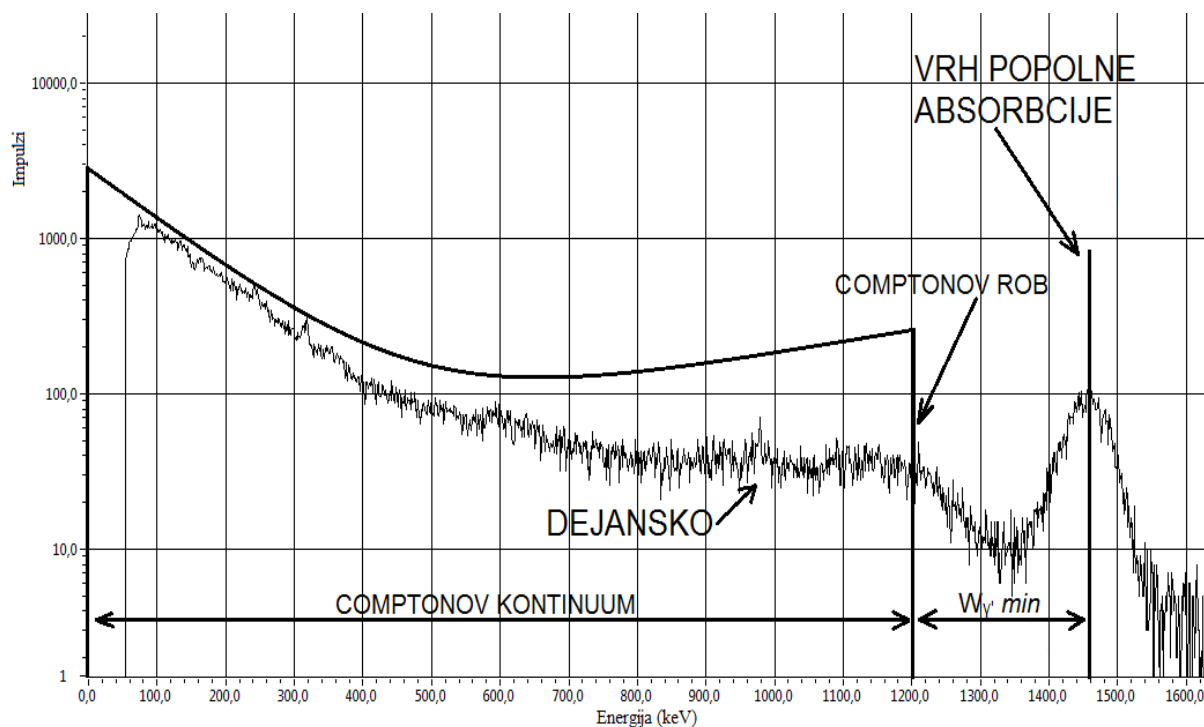
kjer je E_{γ} energija vpadnega fotona, m masa elektrona ter θ kot med primarnim ter sipanim fotonom. Podrobnejša izpeljava enačbe je v [1].



Slika 3: Shema Comptonovega sipanja.

Iz enačbe (1) se vidi, da se kinetična energija elektrona večja z večanjem kota θ , pod katerim se giblje sipani foton. Vendar vpadni foton nikoli ne preda vse svoje energije elektronu. Ko pride do sipanja nazaj ($\theta = 180^\circ$), foton obdrži del energije (2). Ta ekstrem predstavlja največ energije, ki jo lahko vpadni foton preda elektronu v enkratnem Comptonovem pojavu.

$$E_{\gamma', \min} = \frac{E_{\gamma}}{1 + 2 \cdot \frac{E_{\gamma}}{m_0 \cdot c^2}} \quad (2)$$



Slika 4: Teoretična porazdelitev energij za fotoefekt (vrh popolne absorpcije) ter Comptonov pojav. Kot praktični primer je prikazana tudi dejanska porazdelitev za kalij-40 (vrh pri 1460 keV).

Pod normalnimi pogoji pride do sipanja fotona po vseh možnih kotih od 0 do 180°. Zato se zgodi zvezen prenos energije na elektrone od 0 pa do » $E_{\gamma} - E_{\gamma'} \min$ « (Comptonov rob na sliki 4). Pri visokih energijah ko je energija vpadnega γ fotona veliko večja od mirovne energije elektrona se vrednost $E_{\gamma'} \min$ približuje proti konstanti:

$$E_{\gamma'} \min = \frac{m_0 \cdot c^2}{2} = 256 \text{ keV} \quad (3)$$

Zgornje enačbe slonijo na predpostavki, da deluje Comptonov pojav le na prostih ali šibkeje vezanih elektronih. V dejanskem materialu detektorja ima lahko vezalna energija elektrona znaten vpliv na obliko Comptonovega dela spektra (Comptonov kontinuum) za šibkejše vpadne fotone. Ti pojavi se kažejo kot končna strmina ter zaokroževanje Comptonovega roba. Ampak največkrat jih »zamaskira« končna energijska ločljivost detektorja.

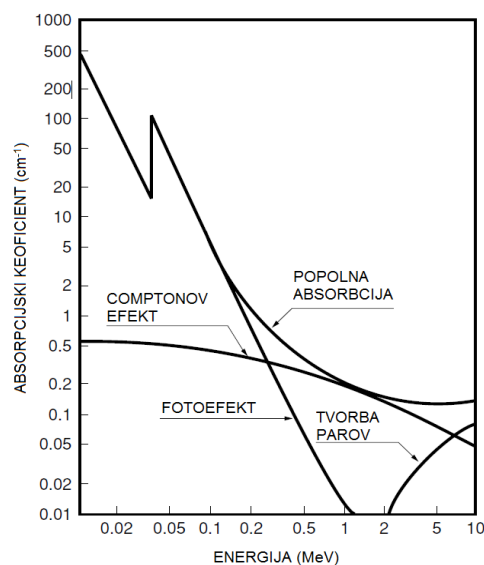
1.3 Tvorba parov

Tretji pomembnejši pojav interakcije γ fotona s snovjo je tvorba parov. Proces se zgodi v Coulombskem polju jedra. Pri tem nastane par pozitron-elektron, foton pa izgine. Za nastanek para mora biti energija vpadnega fotona večja od dvakratnika mirovne energije elektrona (m_0c^2). Preostanek energije se odraža kot kinetična energija, ki si jo delita pozitron in elektron v vseh možnih razmerjih:

$$E_p + E_e = E_\gamma - 2 \cdot m_0 \cdot c^2 \quad (4)$$

Presek tvorbe parov je sorazmeren z vrstnim številom absorberja in z $\log(E_\gamma - 2m_0c^2)$ odvisen od energije fotona. Zaradi tega je vse večji pri višjih energijah ter tako preglasi Comptonov pojav-slika 5.

Glede ionizacij sta elektron in pozitron enakovredna, njun vrh v spektru se kaže pri $E_\gamma - 2m_0c^2$. Vendar pa se pozitron proti koncu svoje poti, ko je njegova kinetična energija zelo nizka (okrog termične energije elektronov v absorpcijskem materialu), anihilira s katerim od elektronov v bližini. To povzroči nastanek dveh anihilacijskih fotonov, vsak z energijo m_0c^2 . Eden ali oba se lahko preko fotoefekta absorbirata, ter tako prispevata k sunku popolne absorpcije. Ko se poleg para absorbira samo en foton govorimo o vrhu enojnega pobega. Če pa uideta oba fotona iz aktivne prostornine števca govorimo o dvojnem pobegu. Zato v spektru energij dobimo poleg vrha popolne absorpcije še dva dodatna vrha pri $E_\gamma - 2m_0c^2$ ter $E_\gamma - m_0c^2$.



Slika 5: Absorpcija γ žarkov NaI(Tl) kristala [3].

K uporabnemu delu spektra, s katerim določimo energijo merjenega sevanja, prispeva pri nižjih energijah torej le fotoefekt ter pri višjih tvorba parov. Comptonov pojav je v tem primeru nezaželen pojav. Razen pri nizkih energijah, kjer izgine, se ga drugače ne moremo znebiti. Lahko ga le zmanjšamo s večjo aktivno prostornino detektorja, ter s tem, da uporabimo detektor narejen iz težjih snovi, saj se presek za fotoefekt veča s približno Z^5 .

2 Scintilator

Pri točki 1 »Sodelovanje γ sevanja s snovjo« smo videli kako pride do prenosa energije iz fotona na nabiti delec. Ti delci, imenujmo jih primarni elektroni, nato s Coulombsko silo neposredno trgajo elektrone iz atomov, oziroma jih dvignejo iz valenčnega v prevodni pas, ter pri tem izgubljajo energijo. Novonastali pari elektron-vrzel se pri odsotnosti zunanjega električnega polja sčasoma nazaj rekombinirajo. Pri tem oddajo odvečno energijo v obliki fotona v ultravijoličnem delu spektra (za NaI kristal je to 320nm). Temu pojavu pravimo scintilacija.

Zaznavanje ionizirajočega sevanja s pomočjo scintilacijske svetlobe je ena izmed najstarejših metod. Do danes ostaja eden izmed najbolj razširjenih načinov meritev energij ionizirajočega sevanja. Meritev energij γ sevanja je seveda možna tudi s polprevodniki. Kot so HPGe (super čisti germanij-high purity germanium) ter Ge(Li) detektorji. Z njimi je možno doseči tudi do 30% boljšo ločljivost, ampak so zaradi zahtevnosti uporabe skoraj neprimerni za izdelavo prenosnega spektrometra. Pa tudi cena polprevodniškega detektorja je v primerjavi s scintilatorjem iste aktivne prostornine skupaj s fotopomnoževalko (in vsem kar spada zraven) neprimerno dražja investicija.

Zato sem se odločil za uporabo scintilatorja. Potrebno je bilo le še izbrati pravega. Idealni scintilator mora imeti naslednje lastnosti:

1. Kinetično energijo nabitega delca mora pretvoriti v zaznavno svetlobo s kar se da velikim izkoristkom.
2. Ta pretvorba mora biti linearna-velikost svetlobnega impulza mora biti premo sorazmerna oddani energiji γ fotona v medij.
3. Medij mora biti prozoren za valovne dolžine svojih lastnih emisij svetlobe.

4. Razpadni čas inducirane luminiscence mora biti kratek, tako da se lahko ustvarijo hitri svetlobni impulzi.
5. Material mora imeti dobre optične lastnosti ne glede na obliko izdelave.
6. Lomni količnik mora biti blizu lomnega količnika stekla za učinkovit prenos svetlobe na svetlobno čutilo.

Seveda noben material ne ustreza vsem zahtevam hkrati. Zato je prava izbira za dan namen ključnega pomena, saj lahko zaradi kompromisov na napačnem mestu sestavimo neuporaben instrument.

Med uporabne scintilacijske materiale vključujemo anorganske halogenske kristale ter organske tekoče ali plastične spojine. Anorganski materiali imajo velik svetlobni izkoristek ter spodobno linearnost, ampak imajo razen redkih izjem zelo dolg odzivni čas. Organski scintilatorji imajo praviloma kratek odzivni čas, ampak oddajo manj svetlobe. Za spektrometrijo γ žarkov se uporablja scintilatorje z visokim vrstnim številom, oziroma veliko gostoto kristala. Medtem ko so organski scintilatorji primernejši za beta spektrometrijo in meritve hitrih nevtronov, so praktično neuporabni za meritve energije γ sevanja višjih energij.

Anorganski scintilatorji:	Gostota ρ [g/cm ³]	Odzivni čas τ [ns]	Št. fotonov N_f [/MeV]	Valovna dolžina λ_{em} [nm]	Izkoristek ϵ [%]
NaI(Tl)	3.67	230	38000	415	11.3
CsI(Tl)	4.51	1000	55000	550	11.9
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	7.13	300	8000	480	2.1
Lu ₂ SiO ₅ (Ce)	7.14	40	26000	420	/
Plastični scintilatorji:	ρ [g/cm ³]	τ [ns]	N_f [/MeV]	λ_{em} [nm]	ϵ [%]
Antracen	1.25	30	16000	440	/
BC-408	1.032	2.1	10000	425	3

Tabela 1: Karakteristični parametri nekaterih anorganskih ter plastičnih scintilatorjev [2-4].

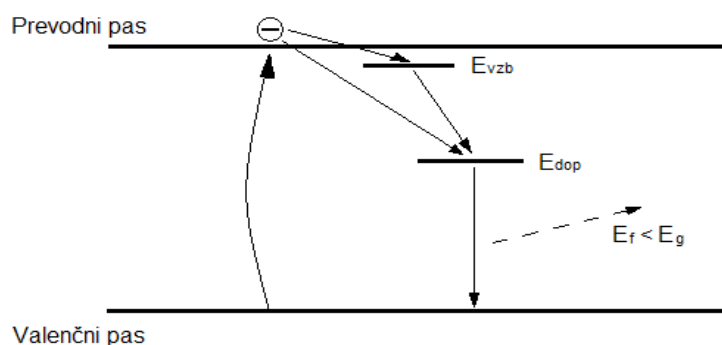
N_f predstavlja število izsevanih fotonov na energijo 1 MeV vpadnega γ fotona, λ_{em} vrh valovne dolžine izsevanih fotonov, ϵ pa absolutni scintilacijski izkoristek za hitre elektrone.

Prava izbira za meritve energije γ žarkov so torej anorganski scintilatorji, ker ponujajo zaradi velike gostote večjo absorpcijo sevanja in s tem večji izkoristek, veliko verjetnost za fotoefekt (spomnimo da presek za fotoefekt narašča z Z^5) ter odličen izkoristek energijske pretvorbe. Vendar so zaradi velike higroskopičnosti ter občutljivosti na mehanske obremenitve zahtevnejši za uporabo. Medtem ko lahko plastične scintilatorje, tako kot skoraj vsako plastiko, naredimo poljubnih oblik in velikosti ter uporabljamo skoraj nezaščiteno.

2.1 Anorganski scintilatorji

Za boljše razumevanje scintilacijskega procesa, ter njegovega odziva na sevanje, moramo vedeti, kaj se v kristalu dogaja ko γ foton vanj odloži energijo.

Scintilacijski mehanizem anorganskih kristalov lahko razumemo skozi analogijo energijskih stanj, določenih s kristalno sktrukturo materiala. Elektroni imajo lahko le diskretna stanja, če mu dovedemo dovolj energije lahko preskoči iz valenčnega v prevodni pas. Vrnitev elektrona nazaj v valenčni pas s izsevanjem fotona je v čistem kristalu neučinkovit počasen proces. Da povečamo verjetnost izsevanja fotona v vidnem delu spektra, oziroma z večjo valovno dolžino, se doda čistemu kristalu primesi nečistoč. Te nečistoče imenovane aktivatorji ali dopanti ustvarijo posebna mesta v kristalni strukturi pri katerih pride do novih energijskih stanj v energijski reži, preko katerih se elektron spusti nazaj v valenčni pas.



Slika 6: Energijska stanja dopiranega scintilacijskega kristala. E_{vzb} predstavlja vzbujeno stanje, E_{dop} energijo dopantov-aktivatorjev, E_f energijo oddanega fotona in E_g energijsko režo.

Ko potuje nabiti delec skozi detektor povzroča za sabo veliko parov elektron-vrzel. Pozitivne vrzeli bodo hitro »zdrsnile«
proti aktivatorju in ga ionizirale, saj je ionizacijska

energija nečistoč nižja od ostale kristalne strukture. Medtem lahko elektron prosto potuje, dokler ne pride do takega ioniziranega centra. Pri tem elektron pade v aktivator ter tvori svoja energijska stanja prikazana na sliki 6, označena z E_{dop} . Če pa v bližini novonastalega para ni aktivatorja, lahko tvorita elektron in vrzel skupaj vzbujeno stanje E_{vzb} , ki nato potuje po kristalni strukturi, ter ob naletu na aktivacijski center preda vzbujeno stanje centru. Pri vrnitvi elektrona nazaj v osnovno stanje le ta odda foton. Če je aktivator pravilno izbran je lahko ta prehod v vidni svetlobi. Tipične življenjske dobe, ki so karakteristične za ta vzbujena stanja, so okrog 10^{-7}s [5]. Odzivni čas detektorja določajo torej ta stanja.

Posledica luminescence s pomočjo aktivatorjev je dejstvo, da je kristal prozoren za scintilacijsko svetlobo. V čistem kristalu se porabi približno enako veliko energije za vzbuditev para elektron-vrzel, ter kot jo ta par izseva ob rekombinaciji. Za posledico bi se emisijski ter absorpcijski spekter prekrivala. Ampak kot smo videli, se emisijski spekter aktiviranega kristala premakne k višjim valovnim dolžinam tako, da nanj ne vpliva optična absorpcija kristala.

Zaradi velike razpoložljivosti v vseh velikostih ter v primerjavi z drugimi nizke cene sem se odločil za uporabo Natrij-jodovega kristala dopiranega s Talijem (v nadaljevanju NaI(Tl)). Kljub njegovi starosti (scintilacijske lastnosti v tem kristalu je prvi odkril Robert Hofstadter leta 1948) ima v primerjavi z drugimi kljub zelo nizki gostoti še vedno zelo kratek odzivni čas in velik izkoristek scintilacijskega procesa.

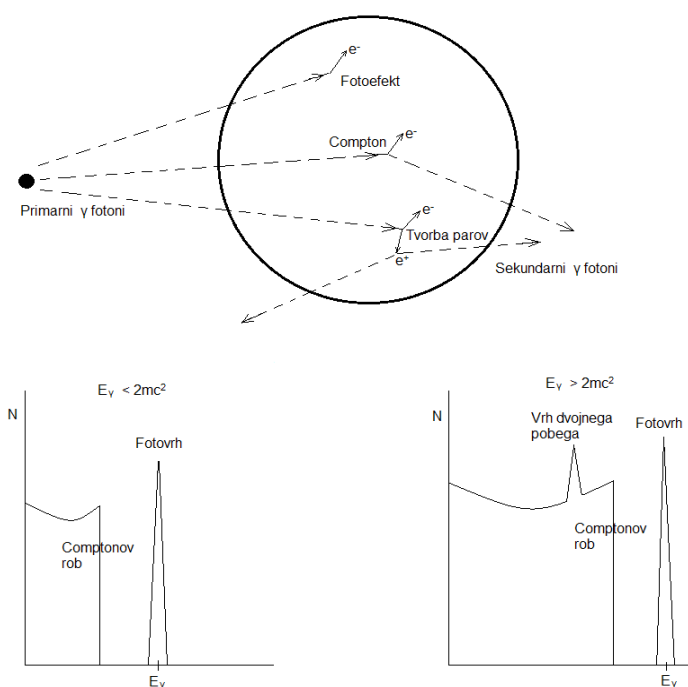
V prilogi A so nekatere glavne karakteristike NaI(Tl) kristala. Kot primer je prikazana energijska ločljivost kristala od 5 pa do 100 keV. Ločljivost celotnega instrumenta določata predvsem scintilator in fotopomnoževalka. Prikazana je tudi nelinearnost, ki je odvisna od absorpcije γ žarkov, ter je zato zelo popačena pri K in L robu joda, proti višjim energijam pa se zmanjša. Zato je tudi linearnost celotnega sistema le delno odvisna tudi od scintilatorja.

2.2 Pričakovani odziv scintilatorja

Na odziv v največji meri vpliva velikost scintilatorja ter njegova oblika. Ker je valjna oblika scintilatorjev najdostopnejša pa tudi najbolj razširjena, bo scintilator take oblike. Zato je potrebno izbrati le še dovolj velik scintilator, da bo cena v še sprejemljivem dosegu moje denarnice, kajti večje je boljše ampak dražje.

Pri zelo majhnih detektorjih je razlaga dogajanja precej enostavna. Glavni odziv določajo predvsem hitri elektroni, ki so nastali preko fotoefekta, Comptonovega pojava ali pri anihilaciji pozitrona. Ker je povprečna prepotovana pot sekundarnih fotonov v okviru nekaj centimetrov, je detektor majhen če ni večji od 1-2 cm.

Hkrati pa predpostavimo da se vsa energija nabitih delcev (fotoelektrona, Comptonovega elektrona ter par elektron-pozitron) absorbira v prostornini detektorja, saj je povprečna dolžina teh le nekaj milimetrov. Predviden odziv je ilustriran na sliki 7.

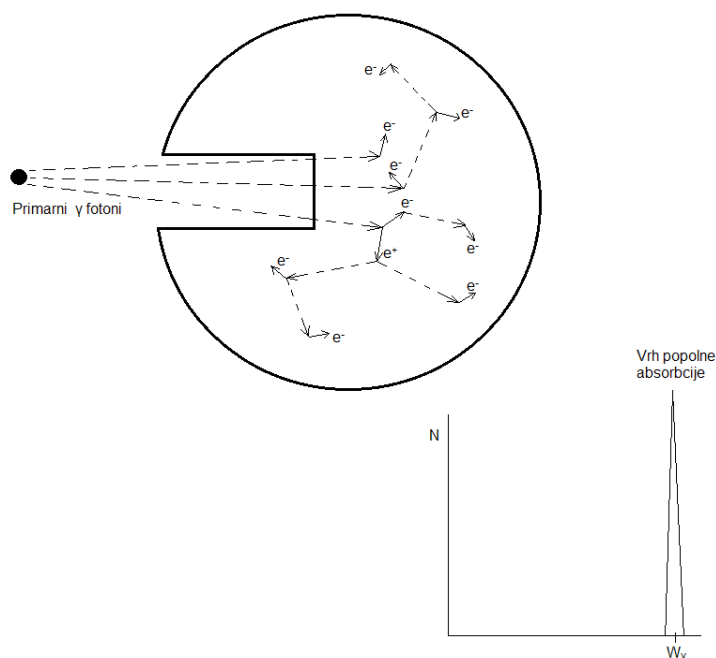


Slika 7: Odziv majhnega detektorja. Odziv na levi predstavlja manjše energije, kjer ni tvorbe parov, na desni tvorba parov doda nov vrh, ko oba anihilacijska fotona »pobegneta« iz detektorja.

Če pa žarke sevanja »vpeljemo« v center zelo velikega detektorja s premerom vsaj nekaj 10 cm, se tudi vsi sekundarni fotoni absorbirajo v prostornini scintilatorja, tako kot je prikazano na sliki 8. Če je primarni dogodek Comptonov pojav, bo sekundarni foton lahko povzročil nov Comptonov dogodek, ter oddal foton s še nižjo energijo in tako naprej, dokler

ne pride do fotoefekta. Za anihilacijske fotone je pesem ista, saj igramo na isto melodijo.

Potrebno pa je tudi poudariti kratek čas potreben za vse dogodke, ki se zgodijo. Naj bo prepotovana pot sekundarnega ali terciarnega fotona med dvema dogodkoma na primer 10 cm. Zaradi vsem znane hitrosti fotona je migracijski čas delček nanosekunde. Ta čas je veliko manjši od časa odziva vseh praktičnih detektorjev uporabljenih v gama spektrometriji. Tako bo ustvarjeni impulz vsota vseh dogodkov. Če se detektor torej odziva linearno na energije elektronov, ter nič ne uide iz detektorja, bo ustvarjeni impulz premo sorazmeren energiji vseh izbitih elektronov. Odziv je enak, kot če bi vsak primarni foton oddal energijo preko fotoefekta. Za spektrometrijo bi bil tak detektor najboljši. Če bi seveda lahko naredili tako velik homogen kristal bi zaradi njegove velikosti in teže bil le namizni instrument.



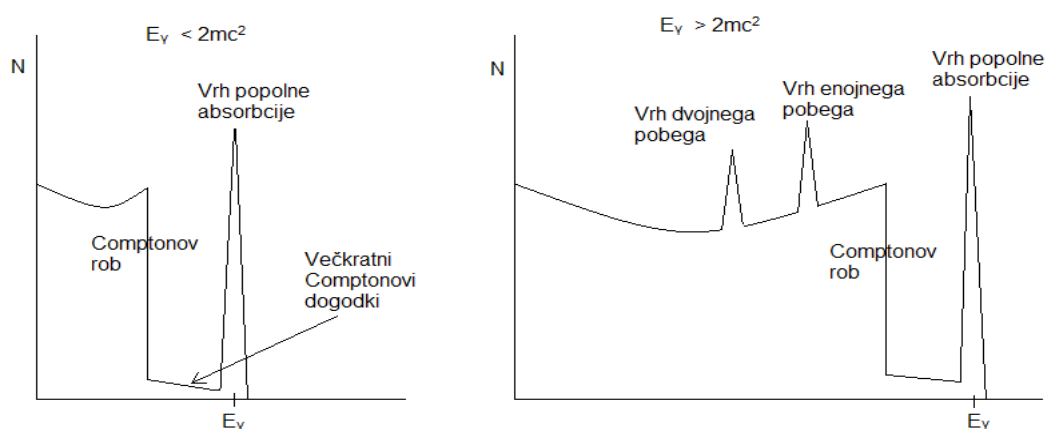
Slika 8: Odziv velikega detektorja. Ne glede na zapletenost interakcije nabitih delcev, se na koncu vsa energija primarnega fotona absorbira v detektorju ter odraža v enem impulzu.

Resnični scintilatorji za splošno spektrometrijo seveda niso ne majhni ne veliki. Za običajne geometrije, ko γ sevanje vstopa v detektor na zunanji površini, scintilatorji zelo velike prostornine delujejo končnih-srednje velikih dimenzij, zaradi pojavov, ki se lahko zgodijo tik ob stenah detektorja (pobeg fotona ali elektrona iz prostornine detektorja). Tako vsebujejo lastnosti obeh ekstremnih primerov.

Spekter za nizke in srednje energije γ fotonov (kjer tvorba parov ne igra velike vloge)

še vedno vsebuje Comptonov del spektra ter fotovrh. Tokrat je razmerje površin vrha popolne absorpcije ter Comptonovega dela večje kot pri manjših detektorjih. Nižja kot bo energija vpadnega γ fotona, nižja bo povprečna energija Comptonovega fotona. Tako bo tudi krajša razdalja ki jo bo prepotoval, ter prej doživel fotoefekt kot pa pobeg iz detektorja. Pri nizkih energijah na primer pod 100keV, če je kristal večji od 5cm, Comptonov kontinuum za NaI(Tl) praktično izgine zaradi popolne absorpcije-slika 5.

Pri srednjih energijah, zaradi večkratnega Comptonovega sipanja fotonov ter na koncu pobega fotona, pride do popačitve Comptonovega dela ter do delne zapolnitve vrzeli med vrhom popolne absorpcije in Comptonovim robom, kot je prikazano na sliki 9.



Slika 9: Spektralni odziv scintilatorja-detektorja »uporabnih« velikosti.

Comptonov kontinuum dobi pri energijah fotona, ki so veliko večje od $2m_0c^2$ dva dodatna vrha, tako kot je prikazano na sliki 9 - desni primer. Vrh dvojnega pobega predstavlja pobeg obeh anihilacijskih fotonov brez dodatnih interakcij v detektorju (Compton), vrh enojnega pobega pa pobeg samo enega anihilacijskega fotona. V resničnem detektorju se vrhova »rezlezeta« zaradi delnega Comptonovega pojava na anihilacijskih fotonih, ter se akumulirata od 0 pa do vrha popolne absorpcije.

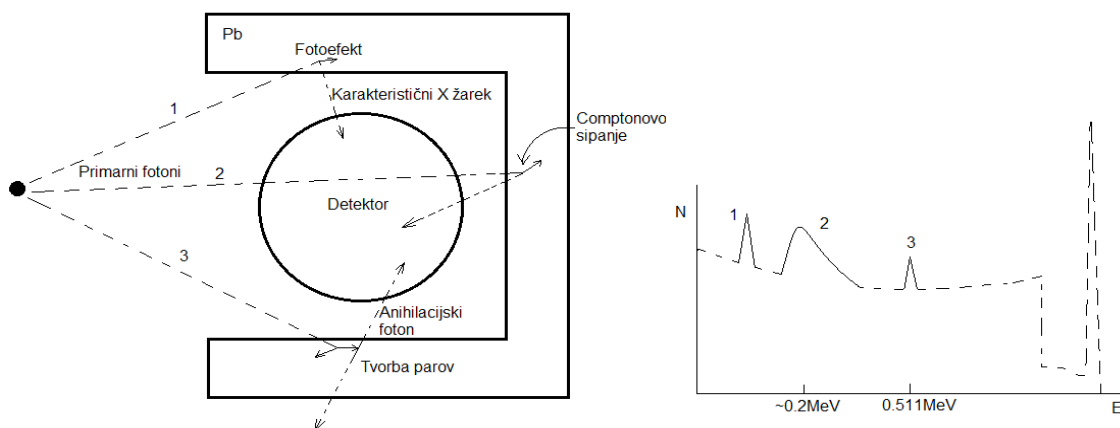
2.2.1 Dodatni notranji vplivi na odziv

Na začetku smo predpostavili, da se vsi sekundarni elektroni ustavijo v detektorju. Pri dogodkih blizu sten detektorja pa lahko pride tudi do pobega hitrih elektronov. Verjetnost za pobeg elektronov se poveča pri višjih energijah. Odraža se kot popačenje fotovrha, ter povečanje Comptonovega kontinuuma pri nižjih energijah.

Prav tako lahko pride do pobega karakterističnih X žarkov. Pojav je izrazitejši pri nizkih energijah sevanja. Pojavi se nov vrh, ki je za vezalno energijo elektrona nižji od fotovrha. Pri višjih energijah ali slabši ločljivosti merilnega sistema pojav nima večjega vpliva. Eden izmed mehanizmov, s katerim hitri elektron tudi izgublja energijo, je zaviralno sevanje (bremsstrahlung sevanje). Pri tem efektu nastali foton, lahko prav tako pobegne iz detektorja ter posledično še bolj popači odziv.

2.2.2 Zunanji vplivi na odziv

Prav tako lahko na pričakovani odziv sistema vpliva okolica detektorja, saj tudi tam pride do istih pojavov kot v detektorju. Izrazitejši postanejo pri nepravilni uporabi svinčenih ščitov za zaščito pred sevanjem ozadja. Pri taki postavitvi kot je na sliki 10, vedno vsaj eden od sekundarnih fotonov iz ščita pride v detektor, ter tam odloži energijo. Do teh pojavov pride tudi na ohišju detektorja. Zato je potrebno nameniti posebno pozornost izdelavi ohišja scintilatorja, da nezaželene vplive čim bolj zmanjšamo.



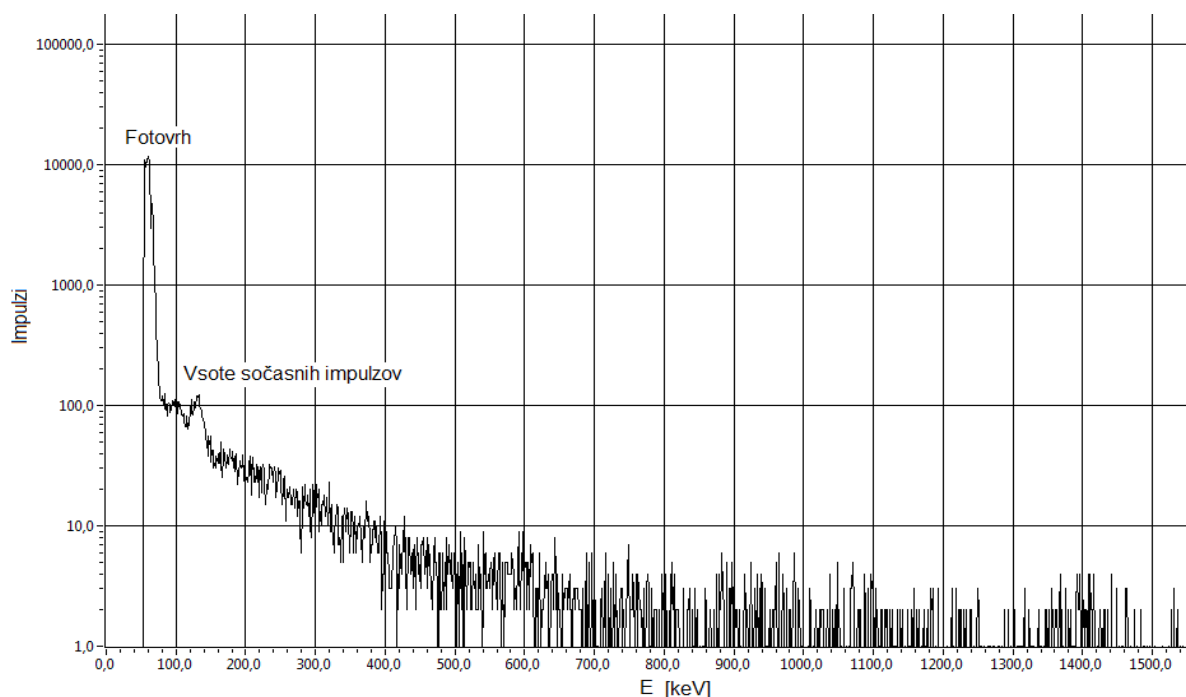
Slika 10: Vpliv zunanjih materialov na odziv detektorja. V grafu predstavlja »1« vrh karakterističnih žarkov (za svinec je ta vrh v območju 70-80keV), »2« povratno sipane Comptonove fotone, ter »3« vrhe vsaj enega od anihilacijskih fotonov.

2.2.3 Vsota sočasnih impulzov

Zaradi naključne narave radioaktivnih razpadov in s tem tudi sevanja γ žarkov se lahko zgodi, da v detektor v zelo majhnem časovnem razmaku prideta dva neodvisna γ fotona. Ker je odzivni čas scintilatorja daljši od časa med dvema dogodkoma, bosta oba fotona prispevala k istemu sunku. Pri meritvi monoenergijskega sevanja se zato pojavi poleg vrha popolne absorpcije nov vrh pri približno dvokratniku energije vrha popolne absorpcije. Verjetnost za meritev sočasnih dogodkov narašča s kvadratom hitrosti zaznanih impulzov [7], s odzivnim časom ter časom meritve, ki ga prispeva elektronski del:

$$I_{so} = I_{iz}^2 \cdot 2 \cdot (\tau + t_{el}) \quad (5)$$

kjer je I_{so} hitrost sočasnih impulzov, I_{iz} hitrost vseh izmerjenih impulzov, τ odzivni čas scintilatorja, t_{el} pa čas zajema impulzov v vezju. Torej bo pri hitrosti 750 i/s ter skupnem času zajema meritve 5.5us skoraj 1% vseh impulzov vsota dveh primarnih fotonov. Praktični primer je prikazan na sliki 11.



Slika 11: Eksperimentalni primer meritve američija 241, ki seva fotone z energijo 59.5keV. Poleg fotovrha se vidi dodatni vrh pri približno 120 keV, ki je posledica vsote dveh primarnih fotonov.

2.3 Izbira velikosti

Iz slike 4 lahko razberemo da bi za popolno absorpcijo γ žarkov od 10 keV pa do 10 MeV potreboval kristal velikosti 500 cm. To ni izvedljivo tako s praktičnega, kot s finančnega stališča. Ker narašča cena skoraj s kvadratom prostornine kristala, in ker ni velike razlike v absorpciji med kristalom velikosti 10x10 cm ter 5x5cm, pa tudi cene fotopomnoževalk z velikimi fotokatodami niso kot sadje na tržnici, sem izbral kristal srednje 5x5 cm velikosti, ki je prikazan na sliki 12. Kristal take velikosti lahko še vedno s fotoefektom absorbira sevanje pri 100 keV. Nižje izmerjene vrednosti so absorbirane preko Comptonovega pojava.



Slika 12: NaI(Tl) scintilator velikosti 5x5 cm uporabljen v instrumentu.

Gostota (g/cm ³):	3.67
Razpadni čas (ns):	250
Fotoni/MeV:	38000
Lomni količnik:	1.85
Emisijski vrh (nm):	415
Odbojni material:	Al
Metoda rasti:	Bridgman
Enkapsulacija-Ohišje:	Aluminij
Proizvajalec:	Epic-crystal, Kitajska

Tabela 2: Glavne lastnosti scintilatorja.

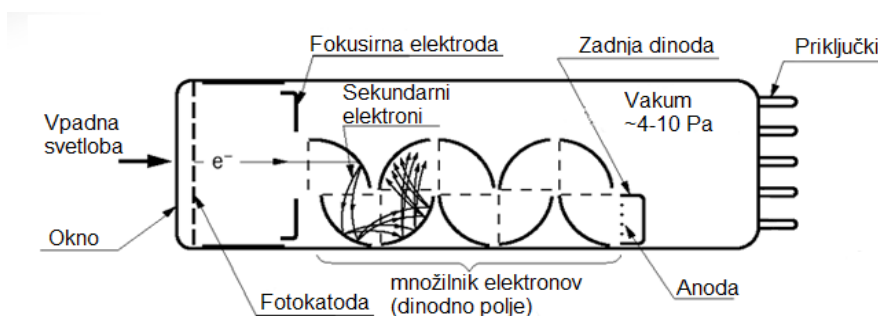
Zaradi velike hidroskopičnosti NaI(Tl) kristala mora ta biti hermetično zaprt v aluminijasto ohišje. Na eni izmed stranic je napravljeno okence iz kremenovega stekla, ki dobro prepušča UV svetlobo scintilacij. Kjer se scintilator ne dotika steklenega okenca, je obdan s odsevno plastjo, ki služi odboju scintilacijskih fotonov proti okencu. Odsevna plast je ponavadi iz aluminija, magnezijevega oksida ali titanovega dioksida. V mojem primeru je ta plast iz aluminija.

Na koncu lahko kot zanimivost dodam, da se kljub skoraj vsakoletnemu odkritju kakšnega novega scintilatorja še vedno najpogosteje uporablja zaradi odličnih scintilacijskih lastnosti ter dostopne cene tistega prvega, ki ga je že skoraj 70 let nazaj odkril R. Hofstadter.

3 Fotopomnoževalka

Kljub velikemu porastu polprevodniških senzorjev na tem področju, tudi z do 2 krat večjim kvantnim izkoristkom, imajo fotopomnoževalke kljub starosti še vedno prednost pri meritvah svetlobnih impulzov na večjih površinah s hitrim odzivom.

Fotopomnoževalka je svetlobno čutilo, ki je sestavljeno iz vakumske cevi, ki vsebuje vhodno okence, fotokatodo, prenosnega ali odbojnega tipa, fokusirne elektrode, množilnik elektronov ter anodo. Slika 13 prikazuje shematični prikaz glavnih delov. Ob vstopu svetlobe skozi okence, fotoni dovolj vzbudijo elektrone v fotokatodi, ki je sestavljena iz materialov z majhnim izstopnim delom, da se elektroni sprostijo v vakuum. Ti so nato pospešeni ter usmerjeni s fokusirno elektrodo proti prvi dinodi. V dinodnem polju se pomnožijo s pomočjo sekundarne emisije elektronov. Na koncu vse elektrone zbere anoda.



Slika 13: Prečni prerez fotopomnoževalke s čelnim oknom, ter škatlasto obliko dinodnega polja [9].

3.1 Lastnosti fotopomnoževalk

Namen končnega instrumenta je predvsem merjenje radioaktivnih izotopov. Sevanje γ iz teh izvorov ne presega energije nad 2.6 MeV. Ker poznamo scintilacijski izkoristek kristala (38000 fotonov na MeV oddane energije v scintilator), lahko določimo tudi največji svetlobni sunek, ki ga bo potrebno izmeriti. Ostale karakteristične lastnosti scintilatorja so pravtako že znane (tabela 1-2). Torej je potrebno le še poznavanje nekaj glavnih lastnosti fotopomnoževalk, da bom lahko izbral pravo in jo pravilno uporabil za meritve scintilacijske svetlobe. Zaradi geometrijskih in optičnih zahtev scintilatorja sem izbral fotopomnoževalko s prenosno fotokatodo. Ker je nanosena na okno fotopomnoževalke nam ponuja optimalni sklop

na scintilator. Odbojna fotokatoda pa predstavlja elektrodo v fotopomnoževalki, ki je odmaknjena od okna ter ponavadi manjših površin.

3.1.1 Spektralni odziv

Ker poznamo emisijski vrh scintilacijske svetlobe kristala (415nm), moramo izbrati fotopomnoževalko s tako fotokatodo, ki bo imela največji spektralni odziv S (A/W) pri izbrani valovni dolžini. Izračunamo ga lahko preko naslednje enačbe:

$$S = \frac{I_k}{L_p} \quad (6)$$

kjer je L_p znani vpadni tok fotonov pri izbrani valovni dolžini, I_k pa merjeni fototok fotopomnoževalke. Največkrat pride v podatkovnem listu podan samo spektralni odziv. Iz tega podatka lahko nato dobimo kvantni izkoristek fotokatode η :

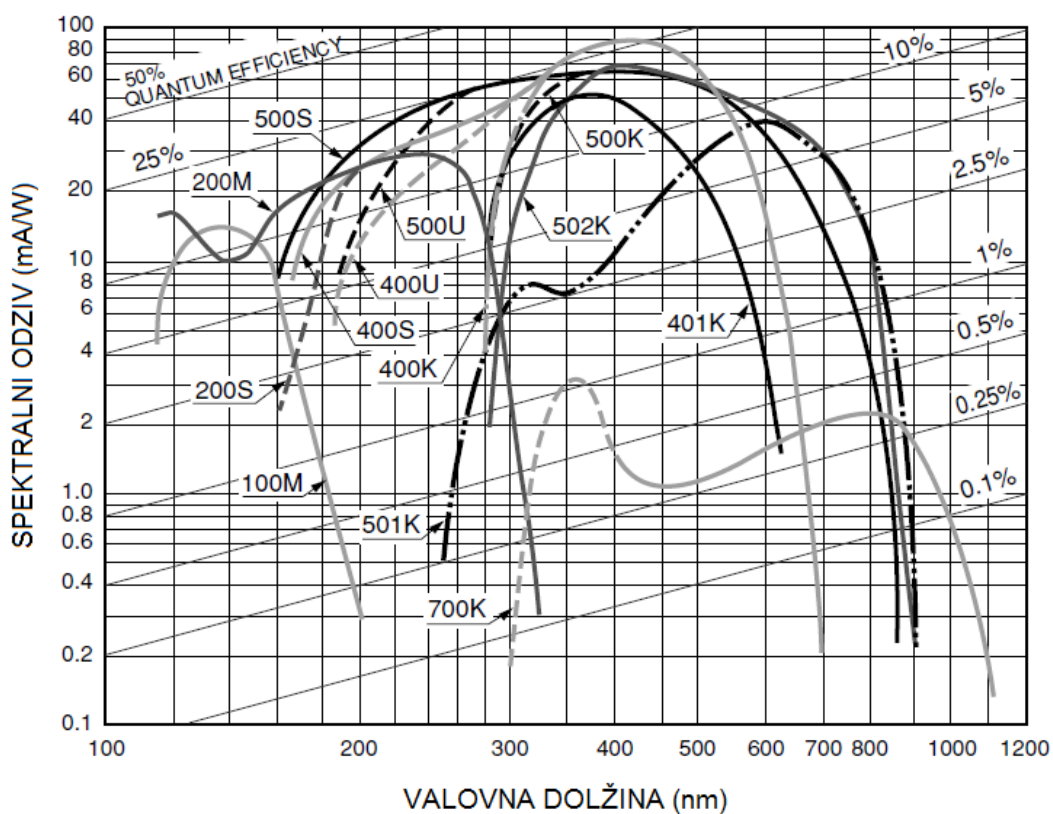
$$\eta(\%) = \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot e} \cdot S \cdot 100\% \quad (7)$$

kjer je h Planck-ova konstanta, c hitrost svetlobe, e osnovni naboj, λ pa valovna dolžina vpadnih fotonov.

Ločljivost sistema nam določa tudi kvantni izkoristek, zato moramo pri izbiri fotopomnoževalke biti pozorni na vrsto fotokatode, ki jo vsebuje. Iz tabele 3 in slike 14 lahko razberemo katere fotokatode imajo največji izkoristek in najboljši spektralni odziv. Pri 415 nm imajo najboljše lastnosti v tem primeru fotopomnoževalke z bi-alkalijskimi fotokatodami, ter so neodvisne od vrste okna.

Koda krivulje	Fotokatoda	Okno	Svetlobna občutljiv. ($\mu\text{A/lm}$)	Spektralni doseg (nm)	Spektralni odziv			
					Vrh valovne dolžine			
					Sevalna občutljiv. (mA/W)	(nm)	Kvantni izkoristek (%)	(nm)
100M	Cs-I	MgF ₂	—	115 to 200	14	140	13	130
200S	Cs-Te	Quartz	—	160 to 320	29	240	14	210
200M	Cs-Te	MgF ₂	—	115 to 320	29	240	14	200
400K	Bialkali	Borosilicate	95	300 to 650	88	420	27	390
400U	Bialkali	UV	95	185 to 650	88	420	27	390
400S	Bialkali	Quartz	95	160 to 650	88	420	27	390
401K	High temp. bialkali	Borosilicate	40	300 to 650	51	375	17	375
500K (S-20)	Multialkali	Borosilicate	150	300 to 850	64	420	20	375
500U	Multialkali	UV	150	185 to 850	64	420	25	280
500S	Multialkali	Quartz	150	160 to 850	64	420	25	280
501K (S-25)	Multialkali	Borosilicate	200	300 to 900	40	600	8	580

Tabela 3: Spektralne lastnosti različnih fotokatod [3].



Slika 14: Spektralni odzivi za različne fotokatode iz tabele 3 [3]. Spodnje slabljenje spektralnega odziva nam določa material okna fotopomnoževalke, zgornje pa vrsta fotokatode.

3.1.2 Ojačanje

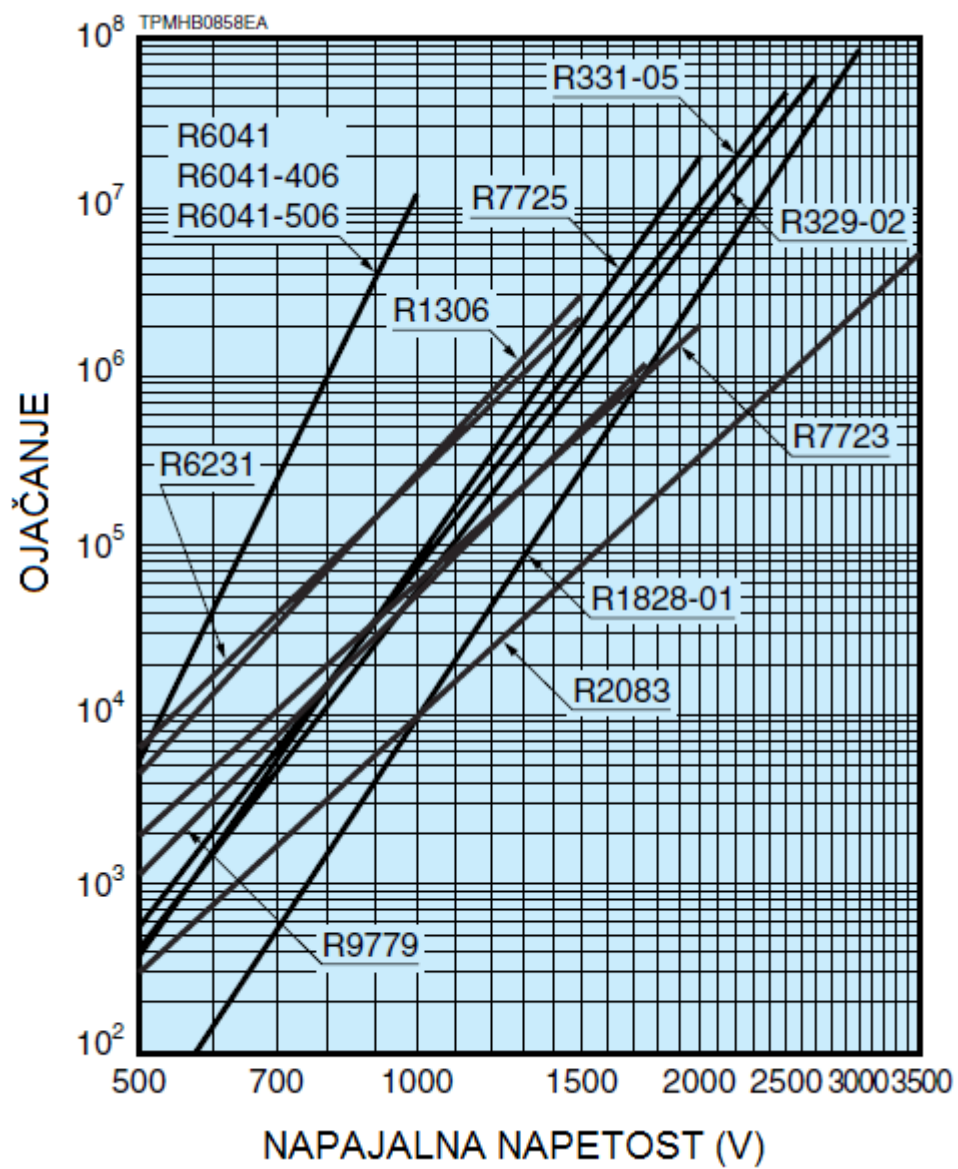
Ojačanje je ena od glavnih lastnosti fotopomnoževalke, zato je pametno vedeti kaj se pri tem procesu dogaja in od česa je odvisno. Fotoelektroni iz fotokatode so zaradi električnega polja pospešeni ter usmerjeni proti prvi dinodi, kjer ustvarijo sekundarne emisije elektronov. Ti nato letijo proti naslednji dinodi ter prav tako ustvarijo nove elektrone. Proces se ponovi, ter tako preko kaskade osmih ali več dinod dosežemo veliko tokovno ojačanje. Ojačanje je preprosto razmerje med anodnim izhodnim tokom ter fotoelektričnim tokom iz fotokatode. V idealnem primeru fotopomnoževalke je definirano kot δ^n , kjer je n število dinod, δ pa povprečno število sekundarnih elektronov na 1 vpadni elektron. δ lahko izračunamo po naslednji enačbi [13] in ima tipično vrednost od 3 do 5:

$$\delta = A \cdot V^\alpha \quad (8)$$

kjer je A konstanta, V je napetost med dvema sosednjima dinodama in α koeficient, določen z geometrijsko strukturo in materialom dinod. Ponavadi ima vrednost med 0.7 in 0.8. Ko je med anodo in katodo priključena napetost U , dobimo ojačanje G :

$$G = \delta^n = (A \cdot V^\alpha)^n = \frac{A^n}{(n+1)^{\alpha n}} U^{\alpha n} = K \cdot U^{\alpha n} \quad (9)$$

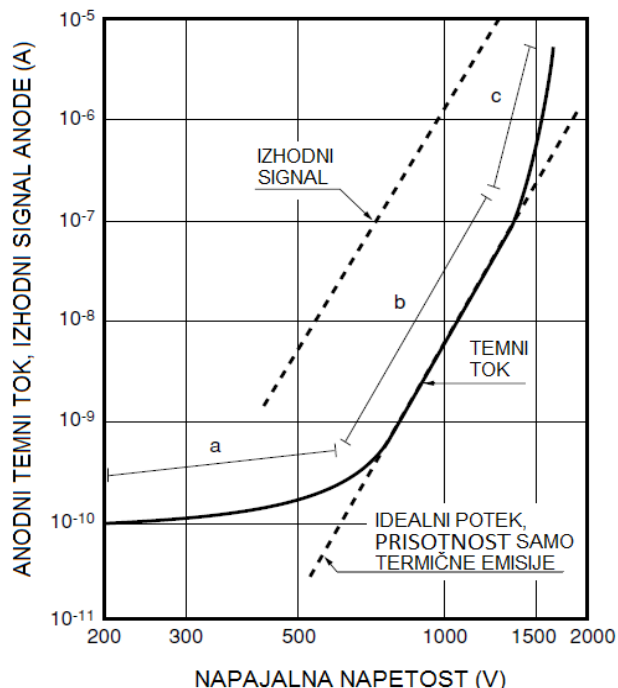
kjer je K konstanta. Iz enačbe vidimo da je ojačanje premo sorazmerno n eksponentu napajalne napetosti, ter predstavlja na sliki 15 strmino krivulj. Zaradi tako velike odvisnosti je ojačanje dovzetno za različne vrste motenj v napajalni napetosti. Pri 10 stopenjski (10 dinod) fotopomnoževalki s tipičnim ojačanjem 10^6 povzroči na primer 0.1% nihanje napajanja spremembo ojačanja za 7000. Ta napaka se odraža v zmanjšani ločljivosti rezultatov. V tem primeru bi se poslabšala za skoraj 0.5%, izračunano s spremembo naboja po enačbi (15). Zato je potrebna posebna skrb pri načrtovanju in uporabi visokonapetostnega napajalnega vira.



Slika 15: Ojačanje fotopomnoževalk s premerom fotokatode 51mm . V instrumentu je uporabljena R878, ki ima podobne lastnosti kot novejša R1306, ki je prikazana na grafu [13].

3.1.3 Temni tok

Tudi ko je fotopomnoževalka popolnoma zatemnjena skozi njo teče nek tok. Ta tok se imenuje temni tok in se nelinearno povečuje z napajalno napetostjo fotopomnoževalke kot prikazuje slika 16.



Slika 16: Značilen potek temnega toka. V področju »a« prevladuje ohmsko puščanje, v »b« termična emisija ter »c« kjer zaradi močnega električnega polja prevladuje emisija elektronov iz dinod in fotokatode [3].

V splošnem področje b ponuja najboljše razmerje med signalom in šumom. Vzroki temnega toka so razdeljeni na naslednje izvore:

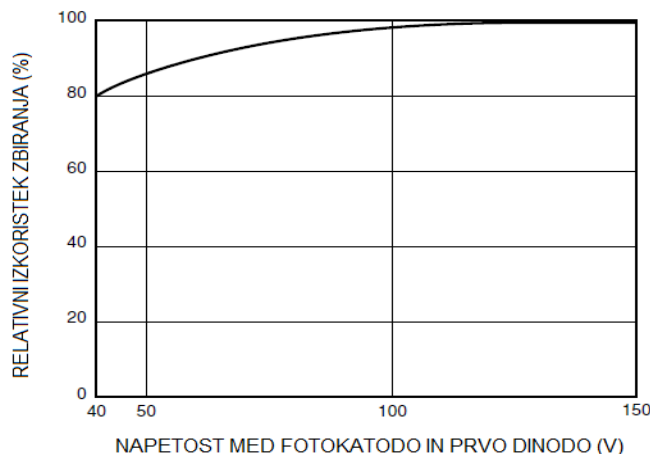
- **Termična emisija.** Ker so dinode in fotokatoda sestavljene iz elementov s nizkim izstopnim delom, oddajajo termične elektrone tudi pri sobni temperaturi. Glavni del prispeva fotokatoda zaradi večje površine. Zadnje dinode prispevajo manj k termičnemu toku zaradi nižje napajalne napetosti.
- **Ohmsko puščanje.** Ker deluje fotopomnoževalka pri visokih napetostih razreda 1000 V, ter tečejo preko fotopomnoževalke zelo nizki tokovi od nekaj nA pa do več 10 uA, povzroči upornost velikosti $10^{12} \Omega$ že znatno puščanje toka. Do puščanja lahko pride med zadnjo dinodo in anodo. Prav tako lahko pride do puščanja med priključki fotopomnoževalke zaradi nečistoč in vlage. Zato je potrebna pazljivost pri rokovanju.

- **Fototok scintilacij steklenega ohišja fotopomnoževalke.** Elektroni iz fotokatode in dinod, ki zaidejo od svoje poti, lahko v steklenem ohišju povzročijo scintilacije.
- **Emisija polja.** Če deluje fotopomnoževalka pri zelo velikih napetostih, lahko pride do emisije elektronov iz fotokatode ali dinod zaradi velikega električnega polja. Takrat se temni tok skokovito poveča. Pojav zelo zmanjša življensko dobo fotopomnoževalke, zato jo je priporočljivo uporabljati pri 20 do 30 % nižji napetosti od največje dovoljene.
- **Ionizacijski tok ostankov plinov v fotopomnoževalki.** Kljub zelo visokemu vakumu (tudi do 10^{-6} Pa) vseeno pride do ostankov plinov. Pri trku te molekule plina z elektronom lahko povzroči ionizacijo, pozitivni ion po nekem času prileti v fotokatodo ter sprostí več elektronov in tvori šumni impulz. Pri impulznem delovanju fotopomnoževalke se ta pojav odraža kot zakasneli impulz fotoimpulza.
- **Šumni tok sevanja.** Kozmično sevanje, sevanje radioizotopov v steklu, ter druga sevanja okolice lahko prav tako prispevajo k šumu. Veliko kozmičnih žarkov vedno pada na zemljo. Med njimi tudi muoni, ki ob prehodu skozi fotopomnoževalko povzročijo Cherenkov-o sevanje v steklu, kar sprostí večje število fotonov. Steklo fotopomnoževalke vsebuje kalijev oksid, v katerem je zelo majhna količina radioaktivnega izotopa K-40, ki seva β elektrone, ki lahko povzročajo ionizacije v elektrodah.

Ponavadi pride temni tok anode pri izbrani napetosti podan v podatkovnem listu fotopomnoževalke, podana je tipična vrednost in največja vrednost po 30 minutah delovanja.

3.1.4 Učinkovitost zbiranja

Množenje v dinodnem polju je narejeno z upoštevanjem tirnic elektronov, da so ti efektivno pomnoženi na vsaki dinodi. Elektron pa lahko zavije od svoje začrtane poti zaradi različnih pojavov, opisanih v poglavju »Temni tok«, in ne prispeva k skupnemu množenju.



Slika 17: Izkoristek zbiranja med fotokatodo in prvo dinodo. [3]

Izkoristek oziroma učinkovitost zbiranja je odvisna od potencialne razlike med elektrodami. Slika 17 prikazuje tipični relativni izkoristek večine fotopomnoževalk. Učinkovitost vpliva na ločljivost fotopomnoževalke in razmerje signal/šum. Za najboljši izkoristek je priporočljiva medelektrodna napetost vsaj 100 V.

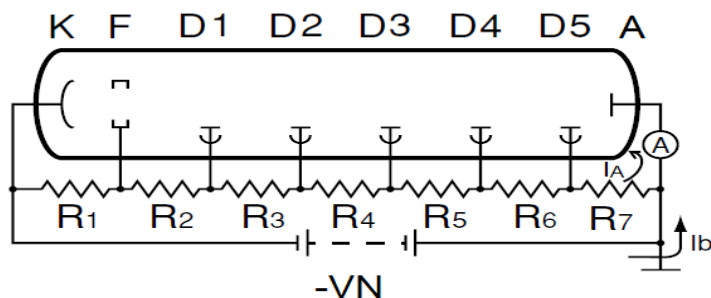
3.1.5 Časovni odziv

Časovni odziv fotopomnoževalke je definiran kot tranzitni čas, potreben za fotoelektrone da dosežejo anodo, potem ko so bili pomnoženi v dinodnem polju ter kot tranzitna razlika med vsakim fotoelektronom. Časovni odziv je odvisen predvsem od tipa dinodnega polja. Delno pa tudi od napajalne napetosti. Povečanje električnega polja ustvari večje sile na elektrone, zato se ti gibljejo hitreje.

Fotopomnoževalke velikosti fotokatode 51mm ter škatlaste oblike dinod, ki bo uporabljena, ima tranzitni čas od 60 do 70 ns. Ker bom s fotopomnoževalko meril svetlobne impulze, ki so veliko daljši od časovnega odziva, lahko ta čas pri meritvah zanemarimo, ker vpliva le na kratek zamik med svetlobnim impulzom in začetkom meritve.

3.2 Uporovni delilnik

Za delovanje fotopomnoževalke je potrebna visoka napetost med fotokatodo in anodo, običajno med 500 V in 3000 V. S pravilno izbrano napetostno razliko med elektrodami, povzročimo dovolj močno električno polje za pospešitev elektronov iz fotokatode skozi dinodno polje do anode. Polje, oziroma napetost med sosednjima dinodama mora biti dovolj velika, da ima elektron zadostno energijo za izbitje 4. ali več sekundarnih elektronov.



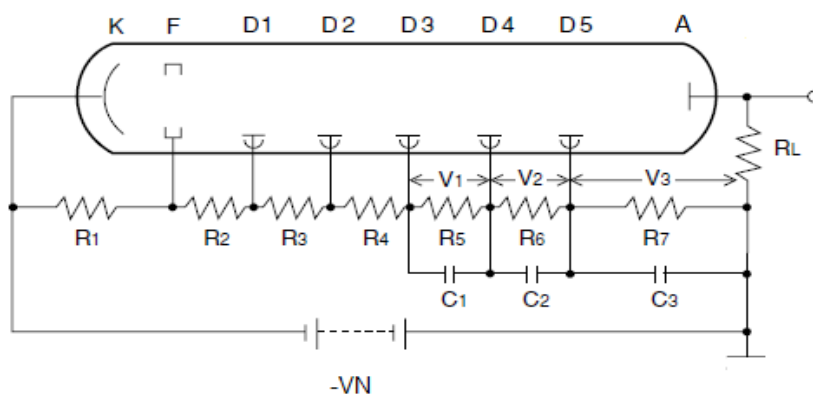
Slika 18: Shematski prikaz fotopomnoževalke z uporovnim delilnikom in ozemljeno anodo.

V praksi se uporablja za nastavitev napetostne razlike med elektrodami zunanji uporovni delilnik s primerno izbranimi vrednostmi. Izbira pravih upornosti zahteva večjo pozornost, da bo poraba čim manjša ter pri tem še vedno uporabna linearnost.

Ko uporabljamo fotopomnoževalko v impulznem načinu, je za dobro linearnost anodni tok omejen le na delček toka skozi delilnik. Da se znebimo te omejitve lahko med zadnje dinode in anodo priključimo kondenzatorje kot je prikazano na sliki 19. Ti ob formaciji impulza napajajo ustrezno dinodo z električnim nabojem, ter preprečijo padec napetosti v delilniku. Posledično lahko s takim ukrepom dosežemo vsaj stokrat večji impulz anodnega toka od toka skozi delilnik. Potrebne velikosti kondenzatorjev lahko izračunamo po preprosti enačbi (10). Če želimo linarnost večjo od 3% naj bo shranjen naboj v kondenzatorju Q_3 vsaj stokrat večji od potrebnega izhodnega naboja Q_0 . Torej naj velja:

$$C3 \geq 100 \cdot \frac{Q_0}{V_3} \quad (10)$$

kjer je V_3 napetost med zadnjo dinodo in maso.



Slika 19: Delilnik napetosti s premostitvenimi kondenzatorji [3].

Pri normalnih pogojih je koeficient sekundarne emisije δ pri 100 V potencialne razlike okrog 4. Če pa meddinodna napetost pade na 80V ali manj, lahko potreben naboj shranjen v C_2 in C_1 izračunamo pri predpostavki, da je δ samo 2:

$$C_2 \geq 50 \cdot \frac{Q_0}{V_2} \quad (11)$$

$$C_1 \geq 25 \cdot \frac{Q_0}{V_1} \quad (12)$$

kjer so V_1 in V_2 meddinodne napetosti. Zgornje enačbe za določitev vrednosti kondenzatorjev predstavljajo najmanjše vrednosti. V različnih podatkovnih listih je zato predlagano, da se uporablja vsaj desetkrat večje vrednosti od izračunanih.

Kljub zgornjim ukrepom, ko povprečni anodni tok preseže 1/20 do 1/50 toka skozi delilnik pride do nekajkratnega poslabšanja linearnosti. Zato je potrebno izbrati dovolj nizke upornosti delilnika, da to preprečimo:

$$R_{max} = \frac{U_F}{20 \cdot Q_{max} \cdot N_{max}} \quad (13)$$

kjer je U_F napajanje fotopomnoževalke, Q_{max} največji predviden nabojni impulz anode ter N_{max} največja hitrost prihajajočih impulzov (i/s).

Ker so fotopomnoževalke dovzetne na spremembe v napajalni napetosti, so najprimernejši kovino-plastni upori z nizkim ali vsaj medsebojno enakim temperaturnim koeficientom. Priporočljivo je uporabiti upore iste serije za celoten delilnik.

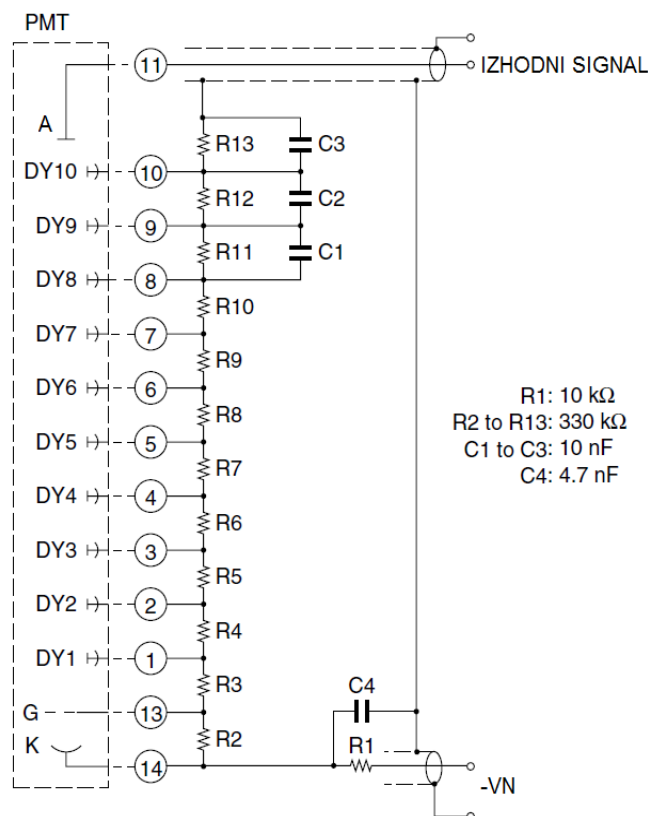
3.3 Fotopomnoževalka R878

Fotopomnoževalka, ki jo potrebujem, mora torej imeti naslednje lastnosti: premer fotokatode mora biti enak scintilatorju ter iz bialkalijskega materiala prenosnega tipa s spektralnim vrhom okrog 415nm in ojačanjem vsaj 10^5 . Ker so fotopomnoževalke dragi stekleni biseri tehnologije, sem namesto nove raje iz tujine preko »ebay.com« spletni strani dobil rabljeno, tako ki se približa zgornjim zahtevam. Njene glavne lastnosti so navedene v spodnji tabeli.

Proizvajalec:	Hamamatsu
Ime:	R878
Tip:	Čelni tip
Velikost (premer):	51 mm
Fotokatoda(premer):	46 mm
λ_{spodnja}	300 nm
λ_{lgornja}	650nm
λ_{vrh}	420 nm
Koda spektralnega odziva:	400K
Fotokatoda:	Bialkalijska
Material okna:	Borosilikat
Dinodni tip:	škatlasti
Št. dinod	10
VN (največja dovoljena):	1500 V
VN (priporočena):	1250 V
Anodni tok, povprečni:	0.1 mA
Sevalna občutljivost:	90mA/W
Ojačanje (pri 1250 V):	10^6
Temni tok (običajno):	5 nA
Temni tok (največ):	50 nA
Tranzitni čas:	70 ns

Tabela 4: Glavne lastnosti R878 fotopomnoževalke [12].

Za fotopomnoževalko so v podatkovnem listu že navedene priporočljive vrednosti delilnika ter shema, prikazana na sliki 20. Pozneje pri izdelavi visokonapetostnega vira se je izkazalo, da ima tak delilnik kljub visoki upornosti preveliko porabo. Zato sem upore od R2 do R13 nadomestil s 390 k Ω vrednostmi, ki še zadostujejo pogoju iz enačbe 13. Prav tako je kondenzator C3 nadomeščen z dvakrat večjo kapacitivnostjo. Uporovni delilnik skupaj s kondenzatorji je prispajkan na priključek fotopomnoževalke.



Slika 20: Shema delilnika ter priporočljive vrednosti za R878, kot jih navaja podatkovni list [13] .

Ker se lahko fotopomnoževalko uporablja pri ozemljeni katodi ali pa ozemljeni anodi, jo bom uporabljal na negativni napajalni napetosti, kot je prikazano na sliki 20 (ozemljena anoda). Ker je takrat anoda na potencialu mase se lahko zato izognem uporabi ločilnega kondenzatorja, priključenega zaporedno s anodo, ki bi služil ločitvi enosmerne visoke napetosti na anodi od ojačevalnega vezja.

Pri vezavi z ozemljeno anodo je fotokatoda na zelo nizkem potencialu, zato je potrebna izolacija med fotopomnoževalko in kovinskim ohišjem, ki je na potencialu mase, da ne pride do prevelike električne poljske jakosti v steklu ter posledično skrajšane življenjske dobe ali celo odpovedi fotopomnoževalke.

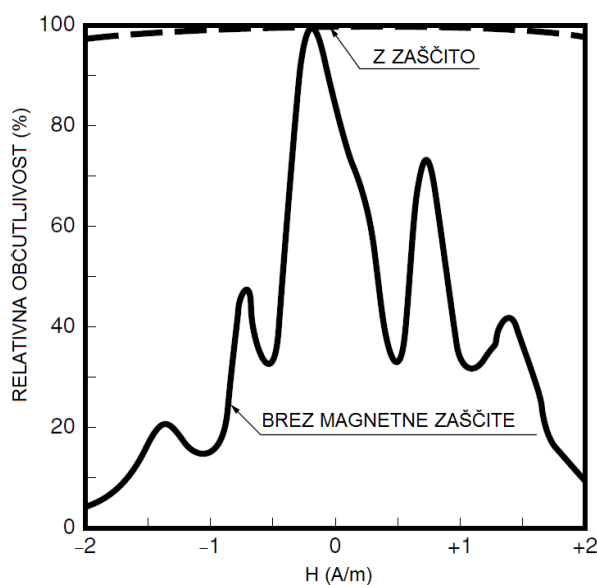
3.4 Ohišje scintilatorja in fotopomnoževalke

Fotopomnoževalka mora biti zaščitena pred zunanjimi viri svetlobe, potrebna je zaščita proti električnemu in magnetnemu polju ter seveda mehanska zaščita pred manjšimi udarci in tresljaji. Hkrati pa mora imeti ohišje čim manjši vpliv na meritve γ sevanja.

Kot dodatna zaščita pred zunanjo svetlobo, je kljub zunanjemu ohišju, fotopomnoževalka zavita v črn trak, ki hkrati drži tudi scintilator in fotopomnoževalko skupaj.

Ker so fotopomnoževalke zelo dovzetne za magnetne motnje (slika 21) zaradi dolgih tirnic elektronov, je tako nujno potrebna zaščita pred zunanjemu magnetnemu polju. Za zaščito se uporablja tako imenovano »mu-metal« pločevino z visoko permeabilnostjo, ki je ovita okrog celotne dolžine fotopomnoževalke. Praktična izvedba je prikazana v prilogi B.

Vse skupaj je zaprto v aluminijasto cev debeline 1.2 mm, premera 60 mm ter dolžine 255 mm.



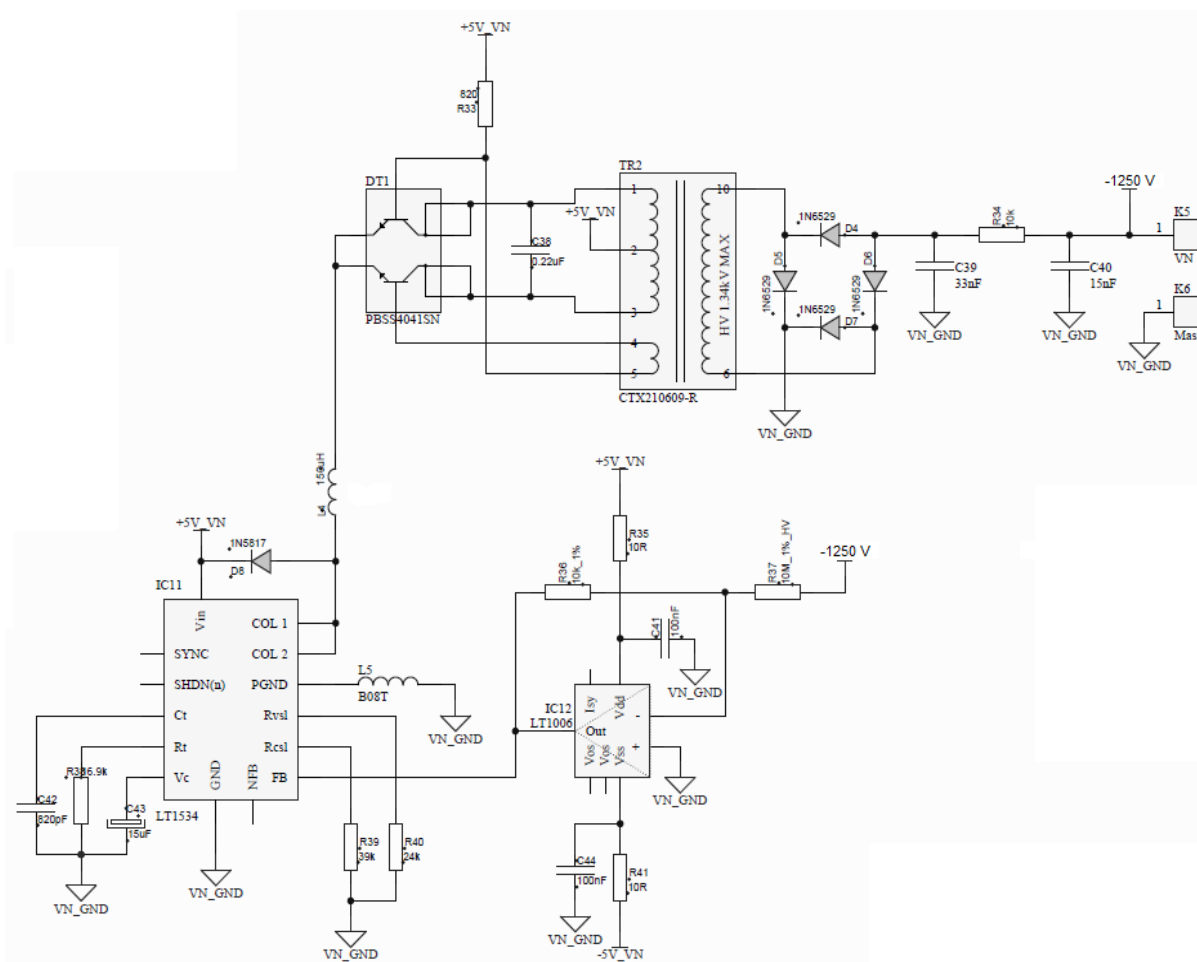
Slika 21: Vpliv magnetne zaščite na občutljivost 51mm fotopomnoževalk s škatlasto obliko dinodnega polja [3].

Pri sklopu scintilatorja in fotopomnoževalke je potrebno omeniti še optične izgube spoja. Ker se površina med oknom fotopomnoževalke in scintilatorjem nikoli ne popolnoma prilega zaradi ukrivljenosti stekla ali drugih geometrijskih nepravilnosti, ostane vmes zrak, ki zaradi manjšega lomnega količnika povzroči popolni odboj scintilacijskih fotonov nazaj v kristal. Da preprečimo ta pojav, se največkrat za zapolnitev »špranje« uporablja različna silikonska olja, katera imajo lomni količnik podoben steklu. V mojem primeru sem uporabil kar silikonsko olje namenjeno mazanju diferencialnih zobniških zglobov maket avtomobilčkov.

4 Visoko napetostno napajanje

Stabilnost delovanja fotopomnoževalke je odvisna od stabilnosti napajalnega vira. Zato je priporočljiva vsaj 0.05% stabilnost, da ne pride do prevelikega odstopanja od najboljše možne ločljivosti in linearnosti detektorja.

Fotopomnoževalka R878 skupaj z delilnikom na sliki 20 za ojačanje 10^6 zahteva vsaj 500 μ A pri -1250 V. Instrument bo seveda napajen baterijsko ali preko USB priključka, zato je potrebno upoštevati tudi porabo, ki mora biti za VN del enaka ali manjša od 200 mA pri 5 V, da ostane od 500 mA, kolikor je omejitev USB vodila, še za napajanje ostalih sklopov vezja in polnjenje baterije. Ker znanja za izdelavo VN vira s takimi zahtevami oziroma s tako stabilnostjo, nisem imel, sem zato pobrskal po že obstoječih rešitvah. Zato sem uporabil vezje J. Williams-a iz Linear technology priročnika 118 [14]. Vezje je prikazano na spodnji sliki.



Slika 22: Vezje VN vira za fotopomnoževalko.

4.1 Kratek opis vezja

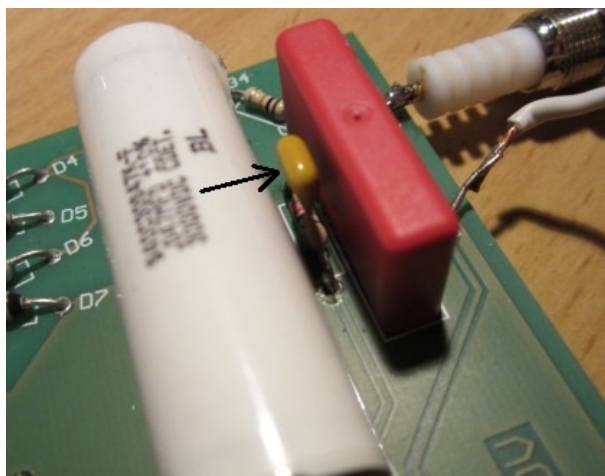
Glavni del vezja predstavlja resonančni Royer-jev oscilator, ki vsebuje transformator TR2, tranzistorja DT1, kondenzator C38 in upor R33. Zaradi lastnega sinusnega nihanja ter zmanjšanih visokofrekvenčnih harmonikov lahko doseže izhodna VN nihanje oziroma šum manjši od zahtevane 0.05%. Napetost na sekundarnem navitju TR1 je usmerjena z D4-D7 diodami in glajena z C39 kondenzatorjem. Za manjšo porabo oziroma večji izkoristek in nastavitev potrebne napetosti, je napajanje oscilatorja krmiljeno s stikalnim napajalnikom IC11 (LT1534), ki krmili tok skozi oscilator. Zaradi dodatnih visokofrekvenčnih komponent iz IC11 regulatorja in nihanja oscilatorja, je na izhodu usmerjene napetosti dodan RC filter sestavljen iz R34 in C40. Za nastavitev točne negativne napetosti pa skrbi povratna vezava operacijskega ojačevalnika IC12 ter upora R36 in R37. Napajanje IC12 ojačevalnika je še dodatno zaščiteno z nizkoprepustnim sitom zaradi nizkega dušenja motenj iz napajanja. Zaščita je sestavljena iz R35, R41, C36 in C44.

Za transformator je uporabljen Coiltronics 210609. Ta transformator je namensko narejen za delovanje skupaj s Royer-jevim oscilatorjem. Prvotno je namenjen napajanju CCFL sijalk, do 6 W in 1.35 kV izhodne napetosti - ravno pravšnji za naš namen. Tranzistorja DT1 si morata biti čim bolj podobna, da se nihanje oscilatorja čimmanj popači, zato sem izbral taka, ki sta v skupnem ohišju. Kondenzator C38 in upor R33 ne zahtevata večje pozornosti. Usmerniške diode D4-D7 je priporočljivo da imajo vsaj dvakratno nazivno zaporno napetost. Prav tako morata imeti kondenzatorja C39 in C40, vsaj 2000 V nazivno napetost. Upora R36 in R37 določata ojačanje neinvertirajočega ojačevalnika v povratni zanki. Izbrana morata biti taki vrednosti, da bo izhodna napetost ojačevalnika 1.25 V, pri -1250 V vhodne napetosti. Izračnemo ju po preprosti enačbi za neinvertirajoči ojačevalnik. Upora morata imeti nizek temperaturni koeficient in toleranco, R37 pa vsaj 1500 V nazivno napetost. Napetost 1.25 V določa FB sponka IC11 napajalnika, ki skrbi za regulacijo. Vrednosti elementov, ki skrbijo za pravilno delovanje IC11 usmernika so takšne kot jih določa priročnik. Elementa C42 in R38 sta potrebna za nastavitev frekvence stikalnega usmernika, C43 skrbi za frekvenčno kompenzacijo, R39 in R40 pa določata tokovno in napetostno strmino preklopa. Dioda D8 omogoča pretok skozi L4 ko sta tranzistorja v IC11 zaprta. Dušilka L5 pa skrbi za zadušitev hitrih sprememb v napajanju oscilatorja.

4.2 Težave

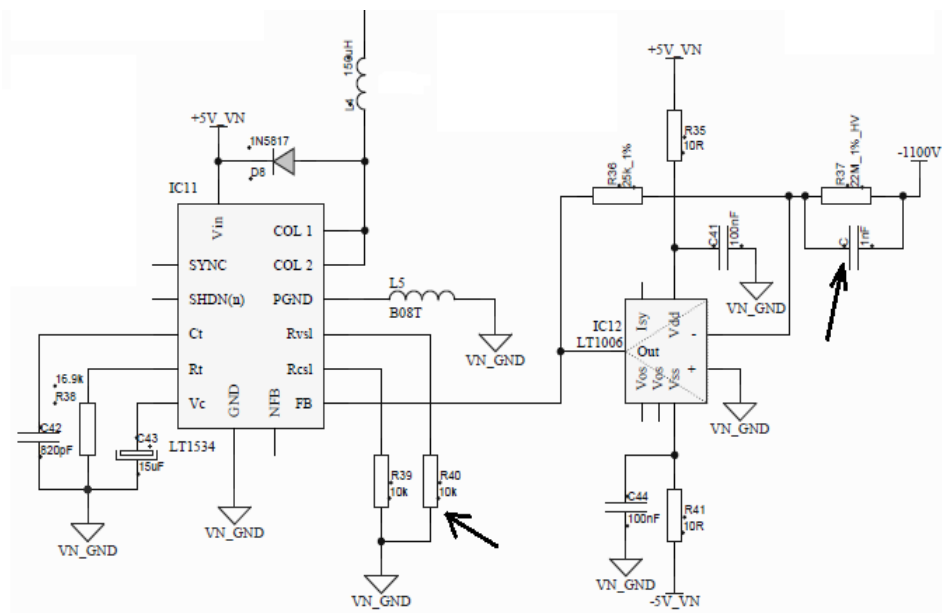
Pri praktični izvedbi VN vira na tiskanem vezju sem naletel na nekaj težav, ki so bile posledica slabo načrtovane tiskanine ali pa uporabe napačnih elementov.

Prvi problem se je pojavil pri meritvah šuma na VN izhodu. Ob vklopu je bila poleg enosmerne komponente prisotna še sinusna motnja s frekvenco 20 Hz in 5 V amplitudo, vedno ne glede na izhodno obremenitev. Zaradi dokaj nizke frekvence motenj so bili vzrok nihanja predvsem elementi s večjimi vrednostmi. Posumil sem na upor R37, ker ostali upori z kapacitivnostmi kondenzatorjev C39 in C40 ne tvorijo dovolj nizke časovne konstante. Težavo sem nato odpravil tako, da sem prispajkal vzporedno s uporom R37, 1 nF kondenzator. Rešitev na tiskanini je prikazana na sliki 23 in na sliki 24.



Slika 23: Kondenzator (črna puščica), »odrešitev« 20 Hz oscilacij.

Kljub uporabi stikalnega usmernika je bila poraba ob priključitvi na delilnik fotopomnoževalke ($3.97 \text{ M}\Omega$ - $315 \mu\text{A}$) 1.75 W oziroma 350 mA pri 5 V napajanju - daleč od zelenih 200 mA . Zato sem najprej povečal skupno upornost delilnika fotopomnoževalke na $4.68 \text{ M}\Omega$ (12 $390 \text{ k}\Omega$ uporov), kar še vedno delno zadostuje pogoju linearnosti. Na račun ojačanja fotopomnoževalke sem zmanjšal VN napetost za 150 V , torej na -1100 V , s spremembo R37 na $22 \text{ M}\Omega$ in temu ustrezno tudi R36, ter povečal tako tokovno kot napetostno strmino preklopa stikalnega usmernika IC11 iz $0.8 \text{ A}/\mu\text{s}$ in $9 \text{ V}/\mu\text{s}$ na teoretičnih $22 \text{ V}/\mu\text{s}$ in $3.3 \text{ A}/\mu\text{s}$ [15] z zmanjšanjem vrednosti obeh uporov R39 in R40 na $10 \text{ k}\Omega$. S temi ukrepi sem dosegel porabo okrog 210 mA pri 5 V ter še vedno obdržal šum izhodne -1100 V napetosti pod 0.05% . Spremembe so prikazane na spodnji shemi.



Slika 24: Shema VN vira. Dodan C (1nF) ter spremenjene vrednosti R36, R37, R39 in R40.

5 Pretvorba nabojnih impulzov

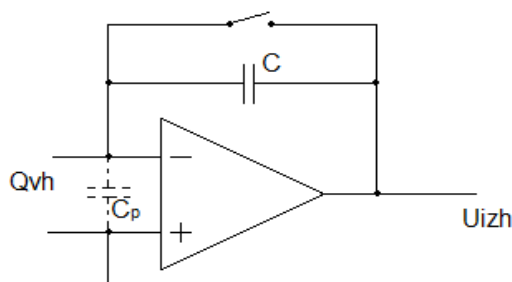
Izhodni signal fotopomnoževalke predstavljajo tokovni sunki, ki jih je potrebno pretvoriti v signal, primeren za meritve z AD pretvornikom. Za izbiro pravih komponent in topologije vezja, moramo poznati velikost tokovnega sunka. Največji naboj fotopomnoževalke, ki ga dobimo lahko izračunamo preko naslednje enačbe:

$$Q_f = A \cdot n_{fk} \cdot n_{zb} \cdot e_0 \cdot N_{sc} \cdot E_{max} \cdot 10^{-6} \quad (15)$$

kjer je A ojačanje fotopomnoževalke, n_{fk} kvantni izkoristek fotokatode, n_{zb} izkoristek zbiranja, N število scintilacijskih fotonov na 1 MeV absorbirane energije γ fotona, ter $E_{\gamma max}$ največja energija sevanja, ki jo še želimo meriti.

Ojačanje nastavlja napetost napajanja fotopomnoževalke, za R878 pri -1100 V je ojačanje okrog $0.4 \cdot 10^6$, določeno s pomočjo grafa na sliki 15. Kvantni izkoristek in izkoristek zbiranja lahko skupno določimo s pomočjo enačbe (7), kjer uporabimo valovno dolžino scintilacijskih fotonov in spektralni odziv pri tej valovni dolžini ($S \sim 90 \text{ mA/W}$). Skupni izkoristek je torej 27%. N za NaI(Tl) kristal je 38000 f/MeV. Ker bo namen instrumenta merjenje radioaktivnih izotopov, ki ne sevajo energij večjih od 2.6 MeV naj bo $E_{\gamma max} = 2.6 \text{ MeV}$. Največji tokovni sunek, ki ga dobimo iz fotopomnoževalke je torej 1.7 nAs. Ker lahko pride zaradi starosti in obrabe do degradacije materialov pa tudi karakteristike enakih fotopomnoževalk niso iste, se zgodi, da se ojačanje in izkoristek fotopomnoževalke zmanjšata. Posledica tega se je pokazala pri poznejših meritvah, kjer je naboj pri 2.6 MeV za 0.2 nAs manjši torej 1.5 nAs.

Najboljša izbira za naš namen je nabojno občutljivi ojačevalnik. Pretvorba naboja v napetostni impulz bo opravljena s pomočjo transimpedančnega ojačevalnika, kjer bo upor nadomeščen s kondenzatorjem kot je prikazano na spodnji sliki 25.



Slika 25: Nabojni ojačevalnik s stikalnim praznjenjem kondenzatorja.

Vhodni naboj se porazdeli med parazitno kapacitivnost C_p , ki predstavlja vhodno kapacitivnost op. ojačevalnika in kapacitivnost kabla ter med kapacitivnost kondenzatorja C v povratni vezavi. Iz izraza $Q=U \cdot C$ lahko izpeljemo naslednjo enačbo:

$$Q_{vh} = U_{vh} \cdot C_p + U_{izh} \cdot C \quad (16)$$

Ker postane pri normalnih pogojih napetostna razlika med invertirajočim in neinvertirajočim vhodom op. ojačevalnika zelo majhna, lahko parazitne kapacitivnosti zanemarimo. Tako dobimo iz enačbe (16) naslednjo enačbo, za izhodno napetost nabojnega ojačevalnika:

$$U_{izh} = -\frac{Q_{vh}}{C} \quad (17)$$

Tako bo višina izhodnega impulza ojačevalnika premo sorazmerna vhodnemu naboju. Iz te enačbe lahko določimo velikost kondenzatorja. Ker bo uporabljen notranji AD pretvornik mikrokrmilnika, ki bo imel 1 V referenčno napetost, naj bo torej največji nabojni impulz 1.5 nAs predstavljal sunek z amplitudo 1 V. Torej mora biti najmanjša vrednost kondenzatorja C 1.5 nF, da bomo še lahko merili do 2.6 MeV energije sevanja.

Operacijski ojačevalnik, ki bo uporabljen kot nabojni ojačevalnik mora imeti zaradi visoke izhodne impedance fotopomnoževalke, čim manjši vhodni tok, zato je uporaba operacijskega ojačevalnika z JFET vhodno stopnjo obvezna. Zaradi relativno kratkih impulzov ($\sim 0.5 \mu s$) mora imeti dovolj veliko strmino naraščanja izhodne napetosti (ang. slew rate) $> 5 V/\mu s$. Paziti sem moral tudi na dovoljen izhodni tok, da je dovolj velik za polnjenje kondenzatorja pri izbrani strmini. Dobro je tudi da je vhodna ničelna napetost zelo majhna, da ne pride do prevelikega vpliva parazitnih kapacitivnosti. Po pregledu zgornjih zahtev sem izbral OPA140 ojačevalnik podjetja Texas Instruments.

Kot stikalo za praznjenje merilnega kondenzatorja sem uporabil n kanalni JFET tranzistor, ki mora imeti napetost preščitvenja ($U_{(GS)off}$) večjo od -5 V (napetost negativnega napajanja ostalih delov vezja), da bo tranzistor pri meritvi naboja zaprt. Uporabil sem SST201 tranzistor, ki ima $U_{(GS)off}$ okrog -1.5V. Krmiljen je z mikrokrmilnikom preko invertirajočega ojačevalnika, ki ne zahteva večje pozornosti. Dobro je le, da ima nizko porabo ter območje izhodne napetosti čim bližje napajalni (ang. rail to rail), če bi se izkazalo, da tranzistor potrebuje nižjo napetost za preščitvenje kanala. Zato je tudi ojačanje za začetek nastavljeno tako, da je ob 3.3 V vhodu iz mikrokrmilnika izhod na -4.8 V.

Signal nabojnega ojačevalnika je nato speljan preko napetostnih sledilnikov na analogni primerjalnik in AD pretvornik v mikrokrmilniku.

Napajanje vseh IC2, IC3 in IC4 je prav tako kot napajanje IC12 na sliki 24, priključeno preko RC filtra na glavne napajalne linije.

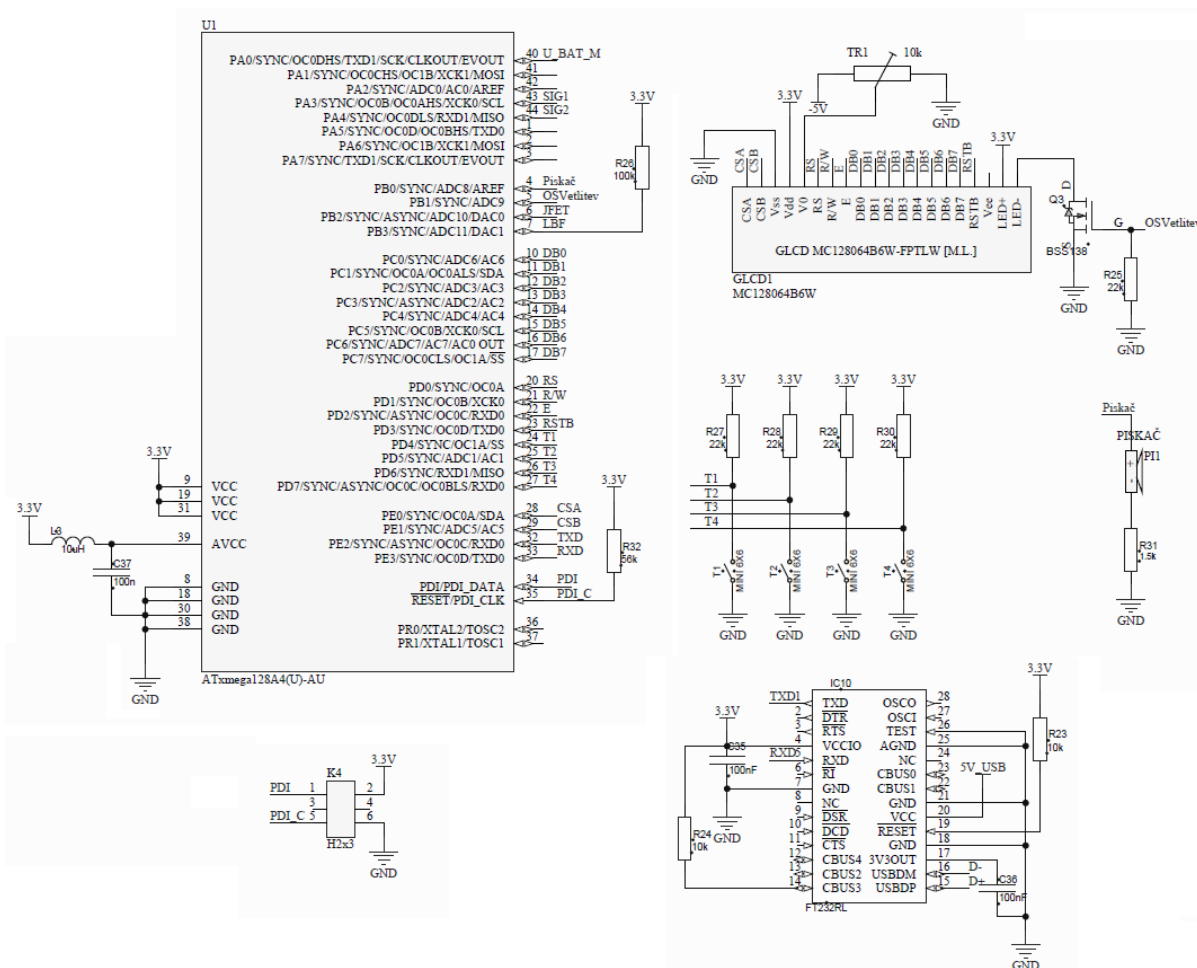
6 Digitalni del

Digitalni del vezja mora poskrbeti za obdelavo in prikaz podatkov. Vsebovati mora AD pretvornik, mikrokrmilnik s katerim bomo upravljali različne dele vezja, nekaj tipk za upravljanje instrumenta s strani uporabnika, grafični prikazovalnik za smiselni prikaz meritev in nek vmesnik za povezavo z računalnikom.

Mikrokrmilnik mora imeti dovolj vhodno/izhodnih priključkov za upravljanje s prikazovalnikom, tipkami, analognim delom in povezavo z računalnikom. Če je možnost, naj ima tudi dovolj dober integrirani AD pretvornik, da izključimo uporabo zunanega, ter čim nižjo porabo, ker bo instrument baterijsko napajan. Za upravljanje in obdelavo meritev, sem uporabil ATXMEGA128A4U mikrokrmilnik. Ta ima že vgrajen dober štiri kanalni AD pretvornik s 12 bitno ločljivostjo in zajemom signala s frekvenco do 2 MHz. To je za meritve impulzov nabojnega ojačevalnika v mojem primeru čisto dovolj. Poleg tega ima tudi analogni primerjalnik in z 12 bitni DA pretvornik, ki ju bom potreboval. Na voljo ima 32 splošno namenskih vhodno/izhodnih priključkov, ter dovolj programskega pomnilnika (128kB flash pomnilnika) za shranjevanje 2048 16 bitnih meritev posameznih energij sevanja in ostalih dodatkov. K izbiri te družine mikrokrmilnikov je prispevala tudi možnost več nivojskih prekinitev programa. Več o tem pa v poglavju »9 Program«. Vir ure bo notranji oscilator mikrokrmilnika. Programiranje pa bo potekalo preko PDI protokola s pomočjo AVR ISP MK II programatorja.

Za komunikacijo z računalnikom sem uporabil USB/UART FT232RL vmesnik, povezan z okoliškimi elementi tako kot veleva podatkovni list. Pri tem sem naredil le majhno napako, ker nisem povezal tudi CBUS3 vhoda na mikrokrmilnik. Tako bi lahko na ukaz, ko ni priključenega USB-ja, vmesnik izključil, ter zmanjšal porabo.

Za prikaz meritev bo skrbel grafični tekočerkristalni prikazovalnik velikosti 128x64 točk z NT7107C kontrolerjem, kjer bo možen grob prikaz spektra sevanja. Izbral sem odsevno-prepustni prikazovalnik zato, da ni potrebe po stalni osvetlitvi zaslona. Za povezavo z mikrokrmilnikom uporablja paralelno povezavo, ki je značilna za NT7107C. Za spreminjanje nastavitev instrumenta so namenjene štiri tipke. Dodan je še piskač, ki bo uporabljen kot zvočno opozorilo ali alarm. Osvetlitev prikazovalnika je krmiljena preko Q3 MOSFET tranzistorja z mikrokrmilnikom.



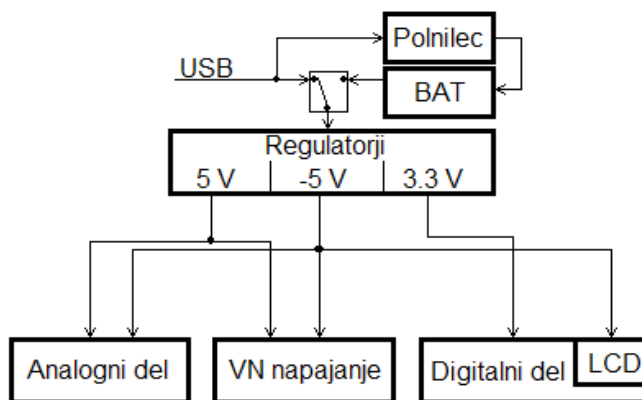
Slika 27: Digitalni del vezja.

Napajanje analognega dela (AVCC) je zaščiteno preko nizko prepustnega sita L3 in C37. Upor R32 drži RESET vhod na visokem nivoju. Napetostni 3.3 V regulator ima možnost signalizacije prenizke napajalne napetosti. Ta signal je povezan na PB3 vhod mikrokrmilnika, zato je uporabljen tudi R26, ki ga priporoča podatkovni list regulatorja. Ker je 3.3 V napetost prenizka za negativno napajanje prikazovalnika preko Vee izhoda, je zato izvedeno z zunanjo -5 V, priključeno na V0 priključek. Nastavljiv upor pa je namenjen nastavitvi kontrasta.

7 Napajanje

Končni izdelek bo instrument, ki mora biti prenosen, zato bo baterijsko napajan. Trenutno najboljša izbira, glede na ceno, kapaciteto, možnost ponovne polnitve in nizke nevarnosti za okolje so litij-ionske (Li-ion) baterije. Zato bom uporabil enocelično 3.7 V Li-ion baterijo s kapaciteto 3000 mAh, ki bo čisto dovolj pri 310 mA (povprečna poraba instrumenta) porabi za večurno avtonomnost naprave.

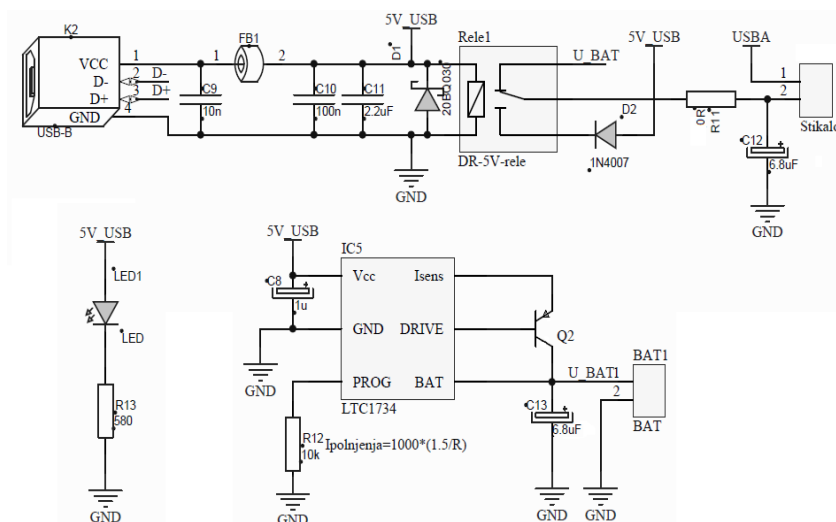
Različni deli vezja potrebujejo različne napajalne napetosti. VN vir zahteva 5 V / 210 mA napajanje, večina op. ojačevalnikov dvojno simetrično napajanje, digitalni del pa 3.3 V napajanje. Za 5 V napajanje bo moral skrbeti stikalni regulator, za negativnih -5 V napetostni pretvornik, za 3.3 V napajanje pa linearni regulator z nizkim padcem napetosti (LDO). Seveda stikalni regulatorji vnašajo nove motnje v vezje zato bo potrebna večja pozornost pri izbiri regulatorja in načrtovanju tiskanine.



Slika 28: Potrebe napajanja različnih sklopov vezja.

Ko bomo rezultate meritev pošiljali na računalnik, naj se ob tem tudi instrument napaja preko USB-ja, ter hkrati polni baterijo. Ker mora biti pri polnjenju baterija odklopljena od porabnikov, sem za ta namen uporabil navaden rele z hermetičnim kontaktom in izmeničnim stikalom, označen z »Rele1« na sliki 29. Čim bližje vhodnemu priključku USB-ja so dodani še C9, C10 in C11 kondenzatorji ter FB1 dušilka z feritnim jedrom za zadušitev motenj iz računalnika. Dioda D1 služi za premostitev motenj relejne tuljave, D2 pa 0.6 V padcu napetosti, ki jo potrebuje 5 V stikalni napajalnik za pravilno regulacijo izhodne napetosti, če se napaja s 5 V preko USB vodila. Če bi bila vhodna kapacitivnost za USB vrata računalnika prevelika [18], bi zato uporabil R11 upor, ki bi zmanjšal začetni vhodni tok. Pri

postavitvi tega upora v vezje sem naredil novo napako, saj bi v primeru uporabe zaradi padca napetosti na njemu znižal tudi že tako nizko napajalno napetost baterije. Pravilna postavitev bi bila zaporedno z diodo D2.



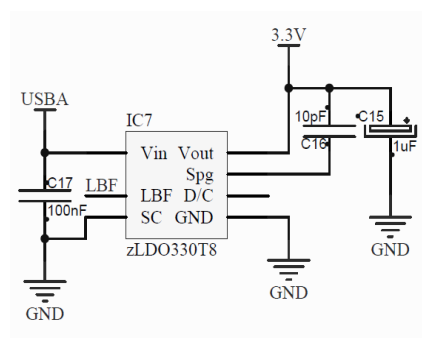
Slika 29: Shema izvedbe odklopa baterije in polnilca baterije IC5. Na shemi oznaka 5V_USB predstavlja zunanje napajanje, U_BAT napajanje preko baterije, USBA pa izbrano napajanje preko releja.

Za polnjenje baterije preko USB-priključka, naj ima polnilec možnost nastavljanja toka polnjenja od 100-200 mA, ter naj v mirovanju porabi čimmanj toka baterije. Za polnjenje Li-ion baterije sem uporabil LTC1734 polnilnik, ki zadostuje zgornjim zahtevam. Poleg upora R12 za nastavitev polnilnega toka potrebuje še PNP tranzistor, in dva kondenzatorja za zagotovitev stabilnosti. Za signalizacijo priklopa zunanjega napajanja in polnjenja baterije je dodana še LED dioda.

7.1 Napetostni regulatorji

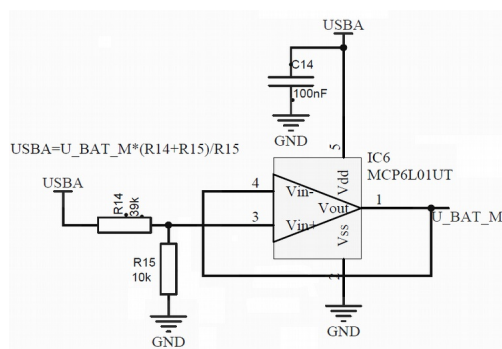
Napetost napajanja digitalnega dela narekuje tekočerkristalni prikazovalnik, saj začne logični del vezja prikazovalnika delovati šele pri 3 V. Da sem se izognil še enemu regulatorju, ki bi napajal zaradi manjše porabe mikrokrmilnik z nižjo napetostjo na primer s 2.7 V, ter komplikaciji logičnih nivojev pri komunikaciji s prikazovalnikom, je celoten digitalni del napajan s 3.3 V. Zaradi nižje napetosti od baterijske je možna uporaba linearnega regulatorja, namesto stikalnega, da čimbolj zmanjšam vnos šuma v ostale dele vezja. Regulator mora imeti

nizek padec napetosti, zaradi samo 0.2 V razlike med napetostjo skoraj prazne baterije in 3.3 V. Da ne bo osvetljenost prikazovalnika odvisna od napetosti baterije, naj bo tudi ta napajana preko 3.3 V regulatorja. Iz podatkovnih listov lahko razberemo povprečno približno porabo posameznih delov. Tako je poraba osvetlitve ~35 mA, mikrokrmilnika ~8 mA in prikazovalnika ~2 mA. Skupna poraba digitalnega dela bo okrog 45 mA. Za 3.3 V napajanje sem uporabil torej ZLDO330T8 regulator z nizkim padcem napetosti od proizvajalca Zetex, ki ima ob 100 mA toku le 30 mV padec napetosti. Za stabilno delovanje potrebuje na izhodu le še 1 uF in 10 pF kondenzator, in 100 nF na vhodu.



Slika 30: 3.3 V Zetex regulator.

Uporabljeni regulator ima na voljo dodaten izhod imenovan LBF (low battery flag), ki signalizira, ko napetost čez regulator pade pod 300 mV, kar je priročno pri zaznavanju prazne baterije. Ker pa to ni dovolj, mikrokrmilnik pa ima na voljo več analognih vhodov, je tudi napetost baterije priključena preko napetostnega sledilnika IC6 na analogni vhod mikrokrmilnika. Tako bo lahko mogoče programsko spremljanje izpraznjenosti baterije ter prepoznavanje preko napetosti, kdaj bo priključeno zunanje napajanje. Prilagoditev napetosti je narejena s pomočjo uporovnega delilnika in napetostnega sledilnika, kot je prikazano na spodnji shemi.

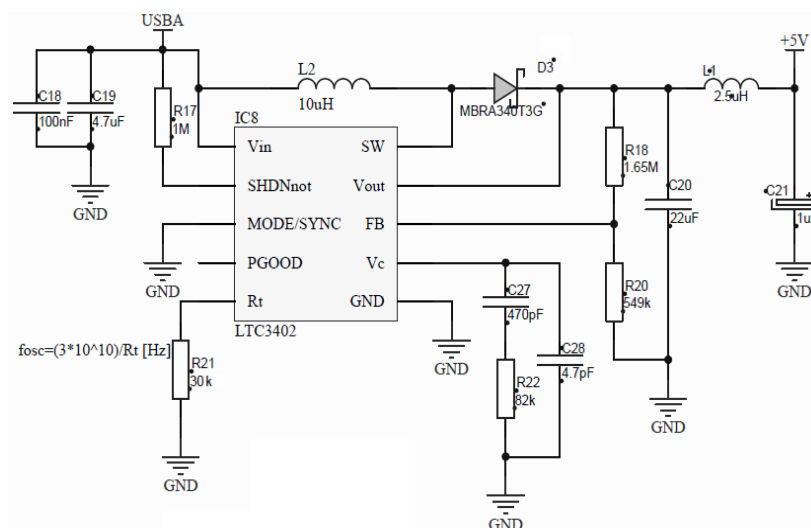


Slika 31: Vezje za prilagoditev napetosti.

Delilnik (R14 in R15) je nastavljen tako, da je ob vhodni napetosti 5 V izhod sledilnika enak referenčni napetosti AD pretvornika, torej 1 V.

Visokonapetostni vir potrebuje za delovanje 5 V napajanje. Za linearni regulator bi potreboval vsaj dve zaporedno vezani bateriji. Ampak, ker se hočem izogniti uporabi dveh baterij zaradi okoljskih težav s reciklažo, večjo težo instrumenta ter nepotrebnih komplikacij pri polnjenju dveh baterij preko USB napajanja, bom uporabil raje samo eno baterijo kot že v začetku rečeno ter stikalni usmernik v boost režimu, kateri bo dvignil napetost baterije 3.7 V na potrebnih 5 V. Ker bo tudi analogni del napajen s 5 V napetostjo, bo potrebna večja pazljivost pri izbiri regulatorja in načrtovanju tiskanine tako, da bo vnos šuma v vezje iz stikalnega regulatorja čim manjši.

Iz velike izbire različnih regulatorjev sem izbral LTC3402 boost pretvornik. Ta ponuja veliko učinkovitost ~95% pri 300 mA porabi, nizek šum s izbranim načinom delovanja, nizko lastno porabo ~ 35 uA in velik obseg vhodne napetosti.



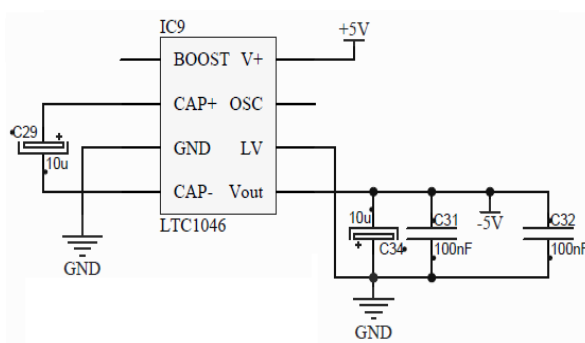
Slika 32: Vezje 5 V stikalnega regulatorja.

Za pravilno delovanje oziroma velik izkoristek in čim manjši šum je izbira pravilnega delovanja regulatorja ter izbira pravih elementov ključnega pomena. Delovanje s ustaljeno frekvenco ponuja manjši šum kot pa v sunkovnem načinu. Pri porabi 300 mA je učinkovitost skoraj neodvisna od frekvence (od 300 kHz do 1 MHz) delovanja regulatorja. Ker AD pretvornik uporabljenega mikrokrmilnika ponuja dvakratni zajema signala v razmaku 0.5 us, lahko ob izračunu povprečne vrednosti meritve, skoraj zanemarimo 1 MHz valovitost napajanja, ker dvakrat pomerim spodnji in zgornji nivo 1 MHz motnje. Zato bo tudi stikalni usmernik deloval na tej frekvenci, ki jo nastavimo z uporom R21.

Za dobro učinkovitost mora imeti dušilka L2 visokofrekvenčno feritno jedro, nizek ESR za zmanjšanje izgub in zdržati vršne tokove dušilke brez nasičenja jedra. Podatkovni list [19] za 5 V izhodno napetost priporoča 10uH induktivnost dušilke. Za zmanjšanje izhodne valovitosti (ang. Ripple) sem uporabil 22 uF keramični kondenzator s nizkim ESR, saj je valovitost premo sorazmerna ESR-ju kondenzatorja. Priporočljiva je uporaba vsaj 4.7 uF kapacitivnost vhodnega kondenzatorja (C19) za zmanjšanje tokovnih špic iz vira. Za izhodne napetosti večje od 4.3 V, se za večjo učinkovitost uporabi hitro Schottky diodo. Nastavitev izhodne napetosti pa realiziramo s R18 in R20 uporoma, kjer mora biti referenčna napetost FB sponke 1.25 V, pri 5 V izhodne napetosti. Elementi C27, C28 in R22 služijo frekvenčni kompenzaciji, večjih pozornosti ne zahtevajo. Kot dodatna zaščita je na koncu dodan še LC filter (L1 in C21), za zmanjšanje šuma regulatorja.

Za zmanjšanje valovitosti izhodne napetosti bi bilo dobro dodati k izhodnemu C20 kondenzatorju 1 uF kondenzator s še nižjo ESR ter mogoče uporabiti C20 s višjo kapacitivnostjo.

Negativno napajanje -5 V pa je lahko zaradi manjših potreb po moči, skupaj okrog 8 mA (skupna približna poraba op. ojačevalnikov in napajanja prikazovalnika) pri -5 V izvedeno s pomočjo stikalnega kondenzatorskega napetostnega pretvornika. Za ta namen sem izbral LTC1046, ki je sicer namenjen napajanju porabnikov do 50 mA, ampak ima zato manjši padec napetosti pri manjši porabi, kot pa ostali iz iste družine. Pri izbiri kondenzatorjev je potrebno paziti le na ESR, da pride do čim manjših izgub. To velja še posebej za C29, saj se njegova serijska upornost štirikrat poveča ter prišteje k izhodni impedanci. Preklopna frekvenca je določena s kapacitivnostjo izhodnega kondenzatorja, in je pri 10 uF enaka 30 kHz.



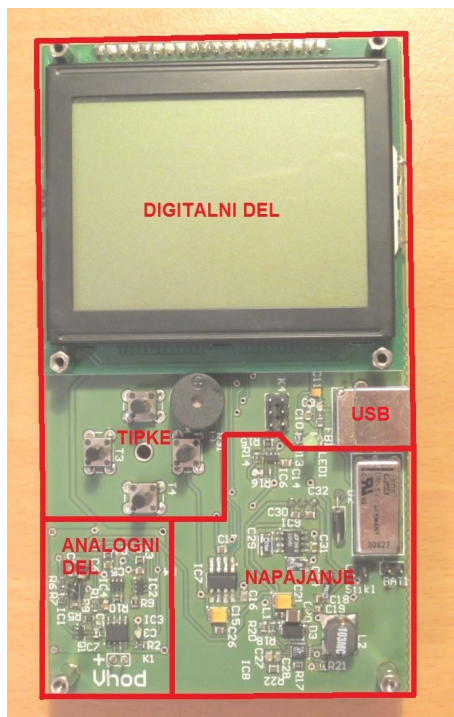
Slika 33: Vezje napetostnega pretvornika za negativno napajanje, izvedeno z LTC1046.

8 Tiskano vezje

Tiskano vezje mora biti načrtovano tako, da bodo imele motnje različnih sklopov čim manjši vpliv na analogni del. Prav tako mora biti postavitve izhodnih priključkov ter prikazovalnika in tipk na vezju praktična za uporabnika. Na koncu pa bo tiskanina vgrajena v neko ohišje, zato je potreben poudarek tudi na mehanski pritrditvi tiskanine.

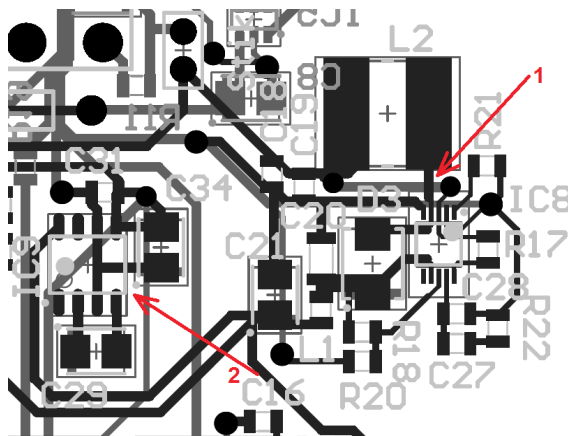
Za načrtovanje tiskanega vezja sem uporabil »Altium designer« programsko okolje. Že v začetku sem se odločil zaradi praktične izdelave za dvoplastno tiskanino. Ker je potrebna pazljivost pri višji napetosti (absolutno), ter zaradi preprostejšje vgraditve v ohišje in v začetku lažjega testiranja posameznih sklopov vezja, bo VN del narejen na ločenem tiskanem vezju.

Na glavni tiskanini sem razporedil različne dele, vsakega posebej tako kot prikazuje spodnja slika. Napajalni del, USB priključek ter priključek baterije so postavljeni skupaj tako, da so napajalne linije do regulatorjev na tiskanini čim krajše. Analogni del je nekoliko ločen od ostalega vezja, ter z ločeno analogno maso, ki je povezana skupaj z ostalimi pri napajalnem delu. Pod prikazovalnikom na digitalnem delu se nahaja še mikrokrmilnik, ki sem ga postavil tako, da gredo analogne signalne linije neposredno na vhodne priključke AD pretvornika.



Slika 34: Razpored različnih delov na glavni tiskanini.

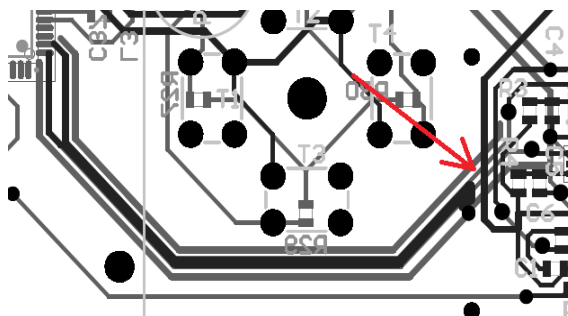
Posebno pozornost je bilo potrebno nameniti povezavam, okrog stikalnega niča. Kjer so povezave z visokimi tokovi direktne in čim krajše, torej povezave s L2 skozi regulator in izhodni kondenzator C20. Povratna vezava, sestavljena iz R18- in C19, je dobro da oklepa čim manjšo zanko. Podatkovni list prav tako priporoča povezave za elemente, ki skrbijo za frekvenčno kompenzacijo (C27, C28 in R22). Vse povezave tiskanega vezja prikazuje na sliki 35 puščica 1.



Slika 35: Povezave stikalnega 5 V in -5 V napetostnega pretvornika.

Prav tako je tudi za negativni napetostni pretvornik priporočljivo, da so povezave do kondenzatorjev C34 in C29 čim krajše in direktne. Izvedba je prikazana na sliki 35 in je označena s puščico 2.

Dodatna posebnost na vezju je še obkolitev analognega signala iz op. ojačevalnikov do vhodnih priključkov mikrokrmilnika prikazana na spodnji sliki. Analogni liniji sem obdal tako ob strani kot na zrealni ravnini z analogno maso do vhodnih priključkov. Celotna tiskanina je prikazana v prilogi C.

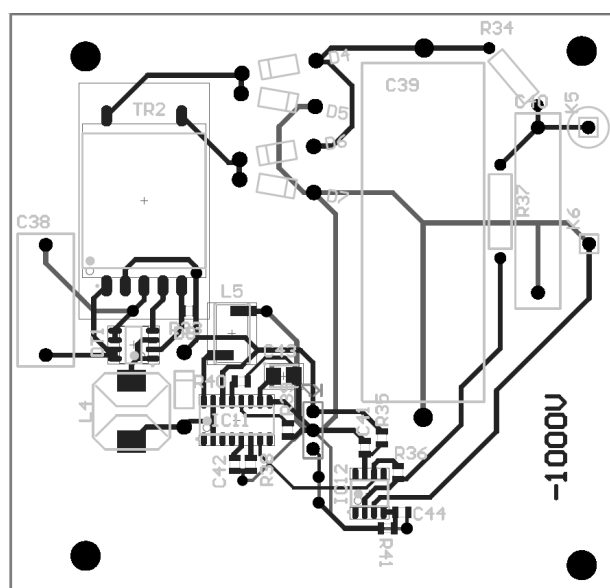


Slika 36: »Obkolitev« analognih povezav do mikrokrmilnika. Puščica nakazuje dve analogni povezavi.

8.1 Načrtovanje tiskanine VN dela

Pri višjih potencialnih razlikah lahko pride do različnih zanimivih pojavov, kot na primer korone ali napetostnega preboja, ki sta v našem primeru nezaželjena pojava. Čeprav 1100 V napetostna razlika ni tako visoka, saj je prebojna trdnost zraka okrog 3 kV/mm, ter FR4 laminata po daljšem časovnem obdobju 20 kV/1.5mm, vseeno različni ukrepi, ki sem jih uporabil zaradi umazanih tiskanih ali drugih nepredvidenih težav ne bodo odveč.

Tako kot v prejšnjem primeru je tudi pri LTC1534 stikalnemu regulatorju (IC11) potrebno poskrbeti, da so kritične povezave čim krajše in sestavljajo čim manjšo zanko. Isto velja za primarni del transformatorja oziroma Royer-jev oscilator.



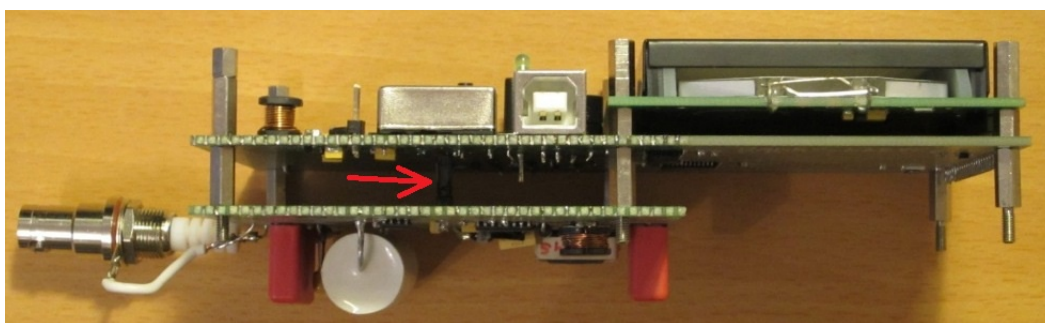
Slika 37: Povezave tiskanega vezja VN dela.

Da se izognemo nezaželenim pojavom korone ali napetostnega preboja so vse VN povezave ločene z vsaj nekaj milimetrsko (3-4mm) razdaljo ena od druge. Zaradi tega so tudi diode D4-D7 na »izhodni« desni strani odmaknjene. Prav tako se je zaradi pojava korone, ki predstavlja nove izgube in dodaten šum dobro izogniti ($>90^\circ$) ostrim robovom povezav. Pri še višjih napetostih je priporočljivo povezave narediti zaobljene. Iz istega razloga je tudi nujno prispajkati v obliko kroglice ostre konice odščipnjenih priključkov elementov na tiskani, saj se ob ostrih konicah prebojna trdnost zraka zmanjša tudi do trikrat. Praktična izvedba je prikazana na sliki 38.



Slika 38: Kroglice spajke na odščipnjenih žicah, kjer bo prisotna VN.

Tiskanina je pritrjena pod glavni del s štirimi M2.5 distančniki dolžine 1 cm, tako kot prikazuje spodnja slika. Prav tako je tudi tekoče-kristalni prikazovalnik pritrjen z distančniki M2.5 navoja. Obe tiskanini sta prikazani s spodnje in zgornje strani v prilogi C.



Slika 39: Pritrditev VN dela tiskanine na glavno. Puščica prikazuje napajalni priključek.

9 Program za mikrokrmilnik

Program Xmega128A4U mikrokrmilnika bo moral skrbeti za meritve prihajajočih sunkov nabojnega ojačevalnika, imeti bo moral nek primeren uporabniški vmesnik za nek smiseln prikaz meritev, ter dopuščati preprosto uporabo instrumenta s štirimi tipkami. Prav tako naj bo narejen tako, da bo mogoče instrument upravljati preko računalnika s programom LabView.

Program je napisan v C jeziku s pomočjo Atmel studio programskega okolja. Za programiranje mikrokrmilnika pa sem uporabil AVR isp mk II programator.

Za izvor ure procesorja bo služil notranji 32 MHz oscilator, ki je za naš namen skupaj s samostojno DFLL kalibracijo dovolj točen. Zaradi manjše porabe mikrokrmilnika je dobro nastaviti frekvenco delovanja čim nižje. Spodnjo mejo nam določa AD pretvornik. Za največje 2 MHz vzorčenje signala, ki ga še dovoljuje podatkovni list mikrokrmilnika torej potrebujemo 8 MHz uro, saj je '4' najmanjša vrednost delilnika ure za AD pretvornik. Ob vklopu ali ponastavitvi mikrokrmilnika je tovarniško nastavljen notranji 2 MHz oscilator, zato je potrebno vsakič najprej spremeniti vir ure in delilnik vira ure. Funkcija inicializacije 32 MHz ure in DFLL kalibracije je prikazana spodaj:

```
1.  OSC.CTRL |= 0x02;
2.  while((OSC.STATUS&OSC_RC32MRDY_bm)==0);
3.  CCP = CCP_IOREG_gc;
4.  CLK.CTRL = 0x01;
5.  CLK.PSCTRL = (0x3<<2);
6.  DFLLRC32M_CTRL = 1;
```

kjer je potrebno najprej omogočiti 32 MHz vir, počakati na stabilnost ure, omogočiti dostop do registrov za izbiro ure, izbrati 32 MHz vir, ter nastaviti delilnik na '4' za 8 MHz, ter nato še omogočiti DFLL kalibracijo.

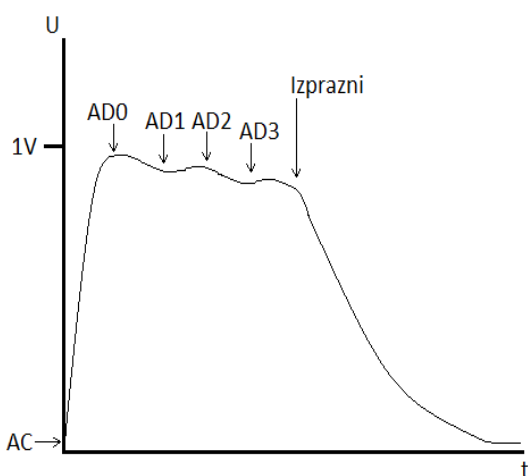
Notranji AD pretvornik ponuja nekaj zanimivih načinov delovanja. Za namen meritev impulzov bo ura pretvornika nastavljena na 2 MHz. Uporabljena bo 12 bitna resolucija (s hitrejšim delovanjem je možna nastavitev tudi 8 bitne). Ker moramo shranjevati število impulzov, ki predstavljajo jakost posamezne energije sevanja, potrebujemo za 12 bitni AD pretvornik 4096 16-bitnih spremenljivk. Ampak za tako veliko zbirko ni dovolj pomnilnika. Zato je AD pretvornik nastavljen na nesimetrično in predznačeno delovanje (ang. Single-ended, signed), kjer se resolucija navidezno zmanjša na 11. Tako bo na

približno rečeno predstavljal 1 keV energije γ sevanja malo več kot 1 bit, kar je pri nekaj odstotni energijski ločljivosti kristala še vedno čisto dovolj. AD pretvornik ima štiri kanale, enega bom uporabili za meritev napetosti baterije, enega pa za signal fotopomnoževalke. Ko pa bo instrument meritve pošiljal na računalnik, bodo zaradi boljše resolucije za meritev impulzov namenjeni vsi štirje kanali. Za referenco pa bo uporabljen notranji 1 V generator.

Xmega družina mikrokrmilnikov omogoča tudi več-nivojske prekinitve. Na voljo imamo tri nivoje. S temi upravlja poseben del mikrokrmilnika imenovan programabilni več-nivojski prekinitveni nadzornik (ang. PMIC). Med katerimi lahko najvišje-nivojska prekinitev sproži prekinitev tudi, če se ravnokar izvaja katera izmed nižje-nivojskih prekinitev, ne pa obratno. Uporaba posameznih nivojev prekinitev je opisana v nadaljevanju.

9.1 Meritve impulzov

Meritve višine impulza, ki je proporcionalna energiji sevanja bo opravljena s pomočjo analognega primerjalnika (AC), AD pretvornika in DA pretvornika. Da je verjetnost za sočasne dogodke opisane v podpoglavju »2.2.3 Vsota sočasnih impulzov« čim manjša mora biti zajem signala hiter. Ker meritve impulzov analognega dela predstavlja glavni del programa je opravljena v najvišje-nivojski prekinitvi, tako da drugi deli programa ne motijo ali zakasnjijo zajema signala. Prekinitev je prožena s pomočjo analognega primerjalnika. Ko prihajajoči impulz povezan na pozitivni vhod analognega primerjalnika prekorači nastavljeno vrednost DA pretvornika, ki je na negativnem vhodu, se zgodi prekinitev v kateri pomerimo višino impulza s AD pretvornikom ter po končanem zajemu signala izpraznimo kondenzator za ponovno meritev. Na spodnji skici je prikazan približen potek meritve.



Slika 40: Približen potek napetostnega signala na izhodu nabojnega ojačevalnika.

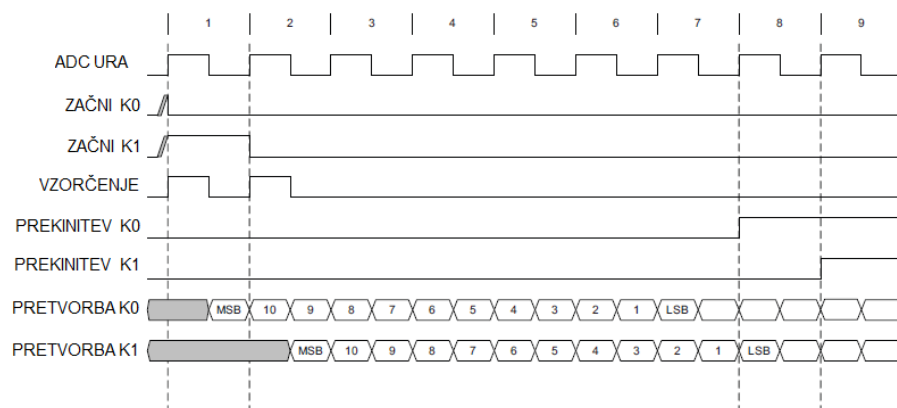
Kot je razvidno iz skice na sliki 40, je potrebno po proženi prekinitvi nekaj časa počakati, da se kondenzator do konca napolni, kar traja za 1 V impulz, skupaj s vsemi upornostmi v vezju, malo manj kot 1 us. Nato lahko s AD pretvornikom pomerimo signal (na skici označeno s AD0). Po končanem zajemu signala, kondenzator izpraznimo z JFET tranzistorjem. Medtem ko se prazni, AD pretvornik do konca pretvori impulz, ki ga nato shrani v zbirko »spekter« (vrstica 7 v spodnji programski kodi kodi). Praznjenje kondenzatorja skozi JFET tranzistor traja približno 4 us, zato mora biti tudi tranzistor toliko časa odprt. Spodaj je prikazana programska koda za eno kanalno meritev impulza:

```

1.  _delay_us(1);           //počakaj na poln kondenzator
2.  ADCA.CH0.CTRL|= 0x80;   //zajem signala skozi kanal 0
3.  _delay_us(1);           //počakaj na zajem
4.  PORTB.OUT&=~0x04;      //izprazni kondenzator
5.  while(!ADCA.CH0.INTFLAGS); //počakaj na konec pretvorbe,
6.  ADCrezultat1=ADCA.CH0.RES; /// ki traja 3.5 us
7.  spekter[ADCrezultat1]+=1; //povečaj zbirko za 1
8.  impulzi++;              //spremenljivka za imp/s
9.  _delay_us(1);           //počakaj na prazen kondenzator
10. PORTB.OUT|=0x04;        //omogoči novo meritev

```

Vsi štirje kanali uporabljajo isti cevovod AD pretvornika. Ta pa omogoča začetek nove pretvorbe oziroma zajem signala na vsak nov urin cikel. To pomeni, da lahko iz različnih kanalov hkrati poteka neodvisno več pretvorb skoraj sočasno z zamikom enega urinega cikla. Tako je čas začetka nove pretvorbe na naslednjem kanalu omejen samo z uro pretvornika.



Slika 41: Časovni potek AD pretvorbe za kanal 0 in 1 brez ojačanja [22].

Kot je prikazano na sliki 40, je signalni impulz štirikrat vzorčen v razmaku 0.5 μ s (AD0-AD3). Primer časovnega poteka pretvorbe dveh kanalov je prikazan na sliki 41. Na koncu je iz meritev vseh štirih kanalov izračunano povprečje. Tako sem s povprečenjem zmanjšal vpliv šumne frekvence 1 MHz 5 V stikalnega napajanja, s tem pa povečal ločljivost meritev.

Zgornji primer kode je uporabljen ko se meritve prikazuje le na vgrajenem prikazovalniku, kjer ni opazne razlike pri poslabšanju ločljivosti saj prestavlja en stolpič spektra seštevek šestnajstih sosednjih meritev, hkrati pa je eden izmed kanalov uporabljen za meritve napetosti baterije. Pri pošiljanju rezultatov na računalnik pa so uporabljeni vsi štirje kanali, kot je prikazano v programski kodi spodaj.

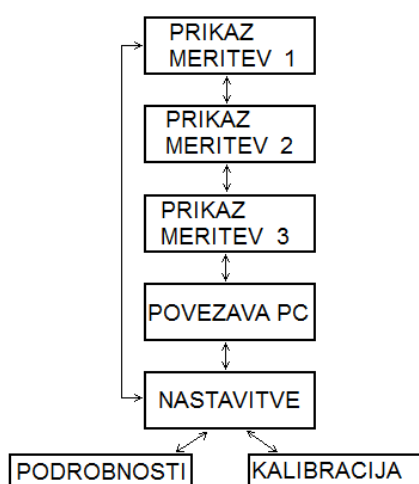
```

1.  _delay_us(1);           //počakaj na poln kondenzator
2.  ADCA.CH0.CTRL|= 0x80;    //zajem signala skozi kanal 0
3.  ADCA.CH1.CTRL|= 0x80;    //zajem signala skozi kanal 1
4.  ADCA.CH2.CTRL|= 0x80;    //zajem signala skozi kanal 2
5.  ADCA.CH3.CTRL|= 0x80;    //zajem signala skozi kanal 3
6.  _delay_us(1);           //počakaj na zajem
4.  PORTB.OUT&=~0x04;       //izprazni kondenzator
5.  while(!ADCA.CH3.INTFLAGS); //počakaj na konec zadnje
6.  ADCrezultat1=ADCA.CH0.RES; //pretvorbe
7.  ADCrezultat2=ADCA.CH1.RES;
8.  ADCrezultat3=ADCA.CH2.RES;
9.  ADCrezultat4=ADCA.CH3.RES;
10. ADCrezultat1=(ADCrezultat1+ //povprečenje meritev
        ADCrezultat2+
        ADCrezultat3+
        ADCrezultat4 )/4;
11. spekter[ADCrezultat1]+=1; //povečaj zbirko za 1
12. impulzi++;              //spremenljivka za imp/s
13. PORTB.OUT|=0x04;        //omogoči novo meritev

```

9.2 Uporabniški vmesnik

Uporabniški vmesnik mora biti nazoren oziroma preprost za uporabo, zato je razdeljen na več menijev. V vsakem meniju so prikazane meritve, nastavitve ali povezava z računalnikom, kot je prikazano na sliki 42. Za preskakovanje med njimi in spreminjanje nastavitev so namenjene štiri tipke, ki morajo biti konsistentno uporabljene skozi celoten vmesnik. Za prikaz meritev in nastavitev instrumenta nam bo služil grafični prikazovalnik velikosti 128x64 točk. Zato je bilo potrebno najprej napraviti knjižnico za upravljanje s prikazovalnikom. Knjižnica sama po sebi ni nič posebnega ter vsebuje inicializacijo prikazovalnika, po meri narejeno zbirko črk (ang. Font) za izpis besedila, ter funkcije za izris nekaj osnovnih geometrijskih likov.



Slika 42: Blok shema različnih menijev vmesnika, ki jih lahko izbere uporabnik. Puščice nakazujejo možna preskakovanja med prikazi in nastavitvami.

Glavni del vmesnika predstavlja grafični prikaz energijskega spektra γ sevanja. Ker imamo na voljo samo 128 stolpcev, je zato glavna zbirka, ki vsebuje 2048 spremenljivk zmanjšana za šestnajstkrat. Tako en stolpec na prikazovalniku predstavlja seštevek šestnajstih vrednosti iz glavne zbirke. Težavo predstavlja tudi višina stolpcev, ker imamo na voljo samo 64 pik oziroma 48, ker je spodnja vrstica rezervirana za izpis aktivnosti in časa meritve, kot je prikazano na sliki 43. Zato je prikazana višina stolpiča na prikazovalniku kubični koren sešteti impulzov. Kubični koren je uporabljen, ker ravno dovolj »zaduši« višje vrednosti, da je spekter še vedno berljiv. Kot primer vzemimo vrednosti 10 in 1000 impulzov, ki so značilne za meritve šibkejših virov sevanja. V primeru logaritma se razlikuje rezultat samo za 2, pri

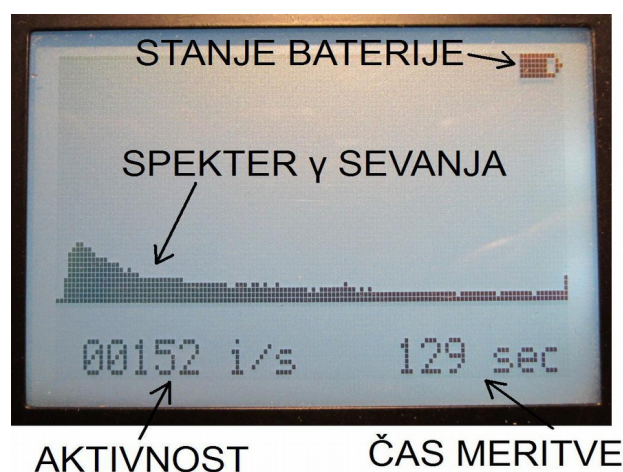
kubičnem korenu pa se razlikuje za 8. Tako je navidezni kontrast spektra večji in je zato lažje berljiv. Programska koda za prikaz spektra na prikazovalniku je kot primer prikazana spodaj.

```

1. for (m=0;m<=2047;m+=16)
2. {
3.   for (i=0;i<=15;i++)
4.   {
5.     n+=spekter[i+m];           //seštej vseh 16 vrednosti
6.   }
7.   DALJICA(16, (t+1), (cbrt(n)+16), (t+1), 1); //izris stolpiča
8.   t++;                         //naslednji stolpič
9.   n=0;
10.}

```

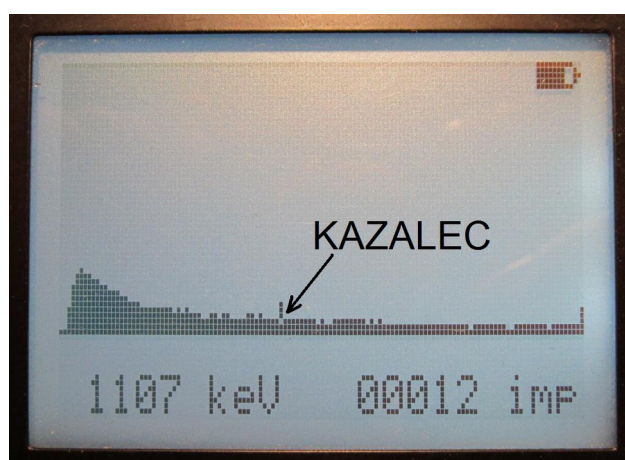
Poleg spektra je pametno prikazati še čas od začetka meritve, ki je ravno tako pomemben pri rezultatu meritev in aktivnost trenutne meritve v zaznanih impulzih na sekundo. Vse troje je prikazano na spodnji sliki, ki predstavlja »Prikaz meritev 1« na sliki 42.



Slika 43: Prikazana je trenutna aktivnost, čas meritve in spekter sevanja. Kjer so na abscisni osi posamezne energije sevanja, na ordinatni osi pa število impulzov posamezne energije. V zgornjem kotu je prikazano še stanje baterije.

Za aktivnost in čas meritve je uporabljen RTC števec, s notranjo 32 kHz uro. Ta števec je nastavljen tako da proži srednje-prednostno prekinitev vsako sekundo, kjer nato izračunamo aktivnost in prištejemo čas meritve.

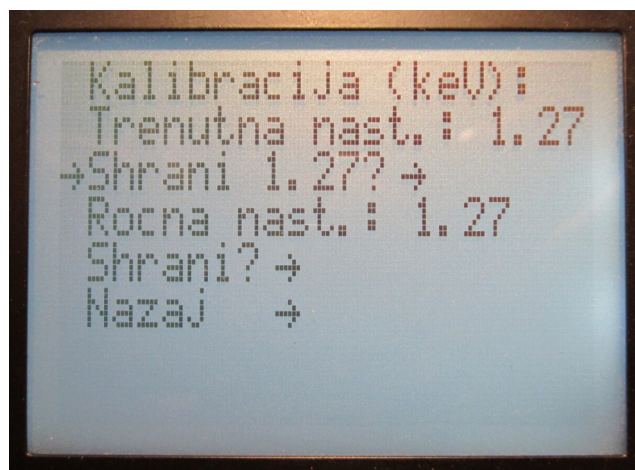
Ko se pojavi sredi spektra nek izrazit vrh, s težavo iz začetka ali konca spektra preštevamo točke prikazovalnika, ter tako določimo približno energijo vrha. Zato je v naslednjem meniju prikazan spekter po katerem lahko s pomočjo tipk premaknemo kazalec na posamezen stolpič. Energija in število impulzov stolpiča sta izpisani pod spektrom kjer je postavljen kazalec, kot je prikazano na sliki 44. Pri tem pa je potrebno poudariti, da izpisana energija predstavlja srednjo energijo šestnajstih vrednosti. Torej iz slike 44 kazalec, ki kaže na 1107 keV stolpič, predstavlja energije od 1100 keV do 1115 keV, pri katerih se je nabralo 12 impulzov.



Slika 44: Spekter sevanja s kazalcem na posamezno energijo, ki je izpisana spodaj levo.

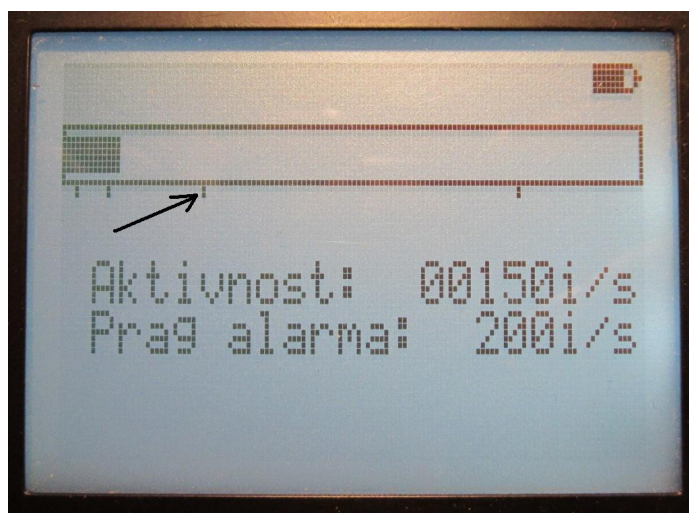
Desno pa je izpisano število impulzov pri prikazani energiji.

Izpisana energija stolpiča na katerega kaže kazalec mora biti umerjena. To je napravljeno s pomočjo LabView programa na računalniku kamor lahko pošiljamo rezultate meritev. Tam za znan spekter določimo energijske vrhove ter nato izračunamo faktor s katerim množimo vrednost kazalca. Za ta namen sem uporabil Americij 241, ki seva fotone z energijo 59.6 keV. Energijski spekter je bil za faktor 1.24 krat premaknjen v levo. Zato je vrednost na katero kaže kazalec pomnožena s tem rezultatom. Do menija za umerjanje oziroma kalibracijo dostopamo v nastavitvah. V tem meniju je prikazana trenutna nastavitev, ter nastavitev prvega umerjanja, če pri ročni nastavitvi pozabimo kakšna vrednost je prava. Ročno nastavitev lahko nato shranimo v EEPROM pomnilnik mikrokrmilnika.



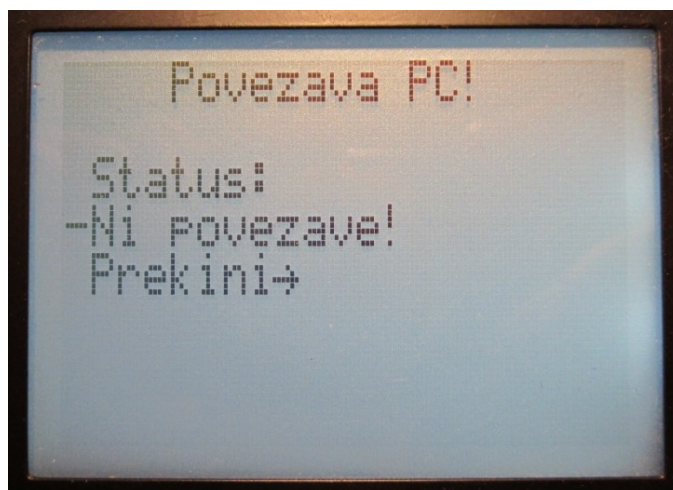
Slika 45: Kalibracija kazalca.

Včasih pa nas energijski spekter ne zanima, temveč nas zanima samo aktivnost γ sevanja. Zato je praktično analogno prikazati aktivnost trenutne meritve. Ta meni je prikazan na spodnji sliki.



Slika 46: Analogni prikaz trenutne aktivnosti meritve. Puščica nakazuje logaritmično merilo od 10 do 10^4 impulzov na sekundo (i/s).

Pod skalo je izpisana še aktivnost in prag alarma. Ta prag lahko nastavljamo od 0 pa do 250 i/s po 50 i/s korakih. Ko je prekoračen se vključi nadležen piskač, če pa imamo v nastavitvah izključena zvočna opozorila, se zato izpiše pod pragom alarma še »Prekoračen prag!«, da prej zapazimo spremembo aktivnosti.

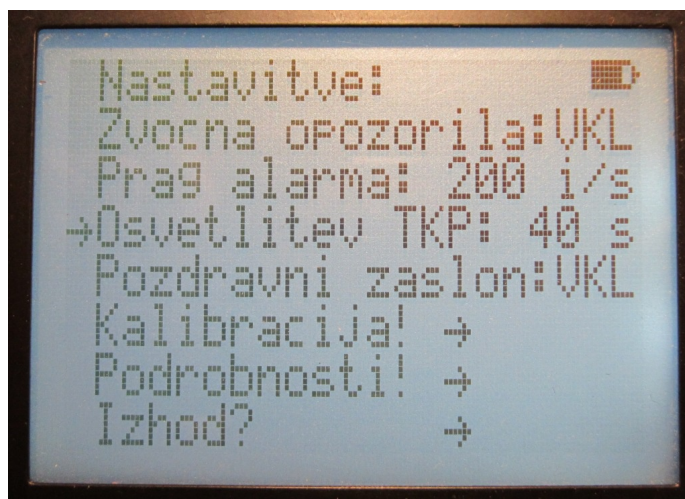


Slika 47: Prikaz stanja povezave s programom LabView na računalniku.

Za pošiljanje podatkov na računalnik in prejemanje ukazov iz računalnika je namenjen dodaten prikaz imenovan »Povezava PC!«. Kjer »Status:« nakazuje stanje povezave, za lažje reševanje težav ob morebitni neuspeli povezavi z LabView-jem. Možni izpisi so še »LabView odgovarja«, »Zaustavljeno!« in »Potek meritve«. Če pa želimo prekiniti meritev, lahko s tipko desno prekinemo pošiljanje rezultatov na računalnik.

Za komunikacijo sem uporabil RS232 protokol na TTL nivojih in FT232 vmesnik. Glavno zbirko, kjer se nabirajo impulzi energijskega spektra vedno po poslanem rezultatu program izbriše. Tako se spekter sešteva samo na računalniku ter prepreči »zapolnitev« 16-bitnih spremenljivk v mikrokrmilniku. Prejemanje ukazov iz računalnika pa je narejeno s pomočjo nizko-prednostne prekinitve USART pomnilnika.

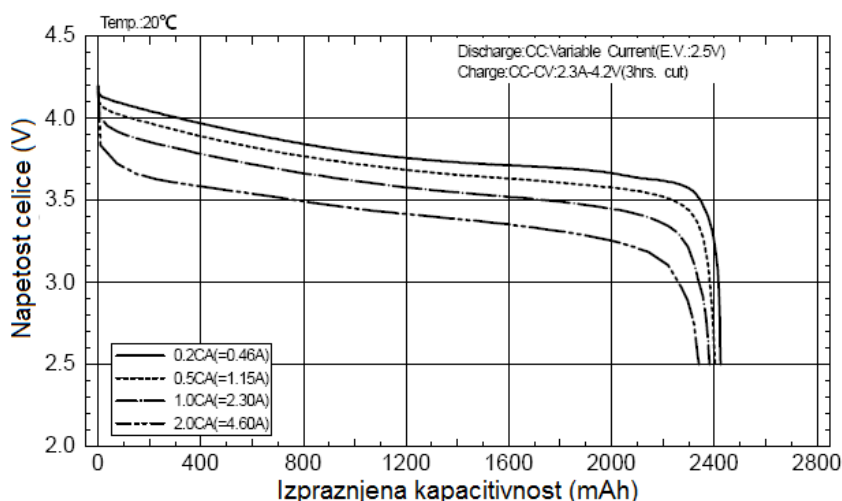
K vsakemu instrumentu spada še možnost spreminjanja različnih nastavitev. Pri tem instrumentu sem dodal možnost izključitve zvočnih opozoril, nastavitve praga alarma, časa osvetlitve tekoče-kristalnega prikazovalnika od 0 do 40 sekund od zadnjega pritiska tipke. Po nekajkratni uporabi pa postane pozdravni zaslon ob vključitvi naprave malce nadležen, zato sem dodal možnost izključitve le tega. Dodatno lahko dostopamo do kalibracije prikazane na sliki 45 in podrobnosti instrumenta, kjer je izpisana trenutna različica programske in strojne opreme. Meni z nastavitvami je prikazan na sliki 48. Posamezno izbrano nastavitev pa nakazuje puščica na levi strani prikazovalnika. Vse nastavitve so shranjene v EEPROM pomnilnik, da ostanejo nastavljene tudi ob izključitvi napajanja.



Slika 48: Nastavitve instrumenta.

Pred skokom v nastavitve se pojavi še dodatno okence, ki sprašuje če želimo vstopiti v nastavitve. Dodano je zato, da navidez ločimo ostale dele uporabniškega vmesnika od nastavitev instrumenta.

Pri baterijskem napajanju mora uporabnik poznati stanje oziroma približno izpraznjenost baterije, da lahko oceni čas uporabe naprave. Za ta namen je uporabljen eden izmed kanalov AD pretvornika, ki vsakih 30 sekund odčita napetost baterije preko vezja opisanega v poglavju 7 »Napajanje«. Na sliki 49 je prikazana napetost baterije pri različnih kapacitetah izpraznjenosti. Za naš primer velja graf označen z 0.2CA, ki prikazuje 0.46 A tok praznjenja baterije. V resnici je tok praznjenja instrumenta še manjši ampak se potek ne razlikuje veliko od 0.2CA na grafu.



Slika 49: Napetost Li-ion abaterije pri praznjenju [23].

Ker prikaz stanja baterije ne igra neke pomembnejše vloge ter služi samo za približen odčitek, sem pri izračunu in izrisu predpostavil da je potek od 4.1 V pa do 3.5 V linearen. Tako predstavlja znak baterije na sliki 10, pri 4.1 V polno baterijo in prazno pri 3.5 V napetosti napajanja. Ko pa je priključeno zunanje napajanje preko USB priključka, se namesto baterije izpiše znak USB kot je prikazano na spodnji sliki desno.



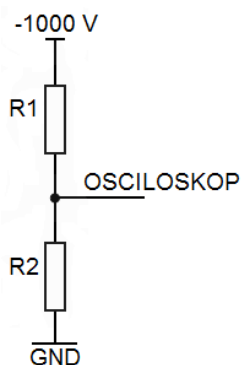
Slika 50: Indikator stanja baterije, in priključitve zunanjega napajanja (USB izpis).

Kot lepotni dodatek je k instrumentu dodan že omenjeni pozdravni zaslon ob vklopu naprave. Ta vsebuje znak za ionizirajoče sevanje. Časovno omejen prikaz znaka spremlja še večkratni pisk, ki predstavlja črko L v Morsejevi abecedi.

10 Testiranje prototipa

Kot je že v podpoglavju 3.1.2 »Ojačanje« nakazano, je ojačanje in s tem ločljivost zelo odvisna od stabilnosti napajalne napetosti fotopomnoževalke. Zato je bilo potrebno izmeriti nihanje izhoda VN napajalnika. Meritve so opravljene po spremembah, ki so zmanjšale porabo VN dela (povečana strmina preklopa stikalnega regulatorja, povečani upori delilnika v povratni vezavi VN dela...).

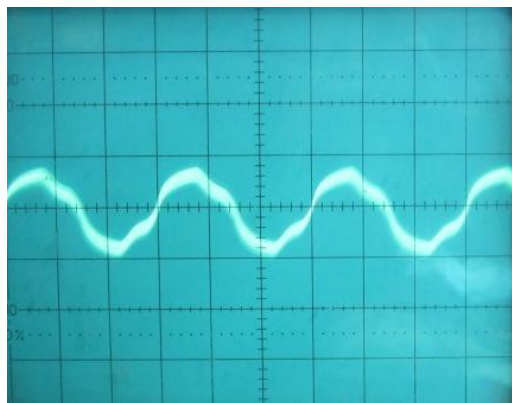
Za meritve nihanja izhodne napetosti VN dela sem uporabil analogni osciloskop Hameg HM 203-6 in Agilent U1232A multimeter. Da sem lahko izmeril lastnosti izhodne napetosti, sem si sestavil uporovni delilnik kot je prikazano na sliki 51, ki zmanjša napetost za 42.3-krat ter primerno obremeni VN vir. R1 upor je sestavljen iz zaporedne vezave šestih uporov s skupno vrednostjo $4.047\text{ M}\Omega$, R2 pa je $100\text{ k}\Omega$ vrednosti. Pri tako velikih upornostih je potrebno upoštevati še vhodno upornost osciloskopa, ki je v tem primeru $1\text{ M}\Omega$. Zato se faktor delilnika poveča na 46.



Slika 51: Uporovni delilnik, za namene meritev VN izhoda.

Iz slike 52 se vidi le nihanje Royer-jevega oscilatorja s frekvenco 66.6 kHz . Izmerjena amplituda nihanja na R2 uporu je 9 mV , kar predstavlja preko delilnika nihanje izhodne napetosti za 0.414 V oziroma 0.038% od -1100 V izhodne napetosti. Kar je še vedno pod 0.05% , ki jih priporoča proizvajalec [3] R878 fotopomnoževalke.

Izmerjeno nihanje je možno zmanjšati ob uporabi večjih, vsaj desetkratnih vrednosti, izhodnih kondenzatorjev v VN napajalniku. Ampak to za prenosni instrument ni praktično saj se tudi fizična velikost kondenzatorjev za približno tolikokrat poveča.

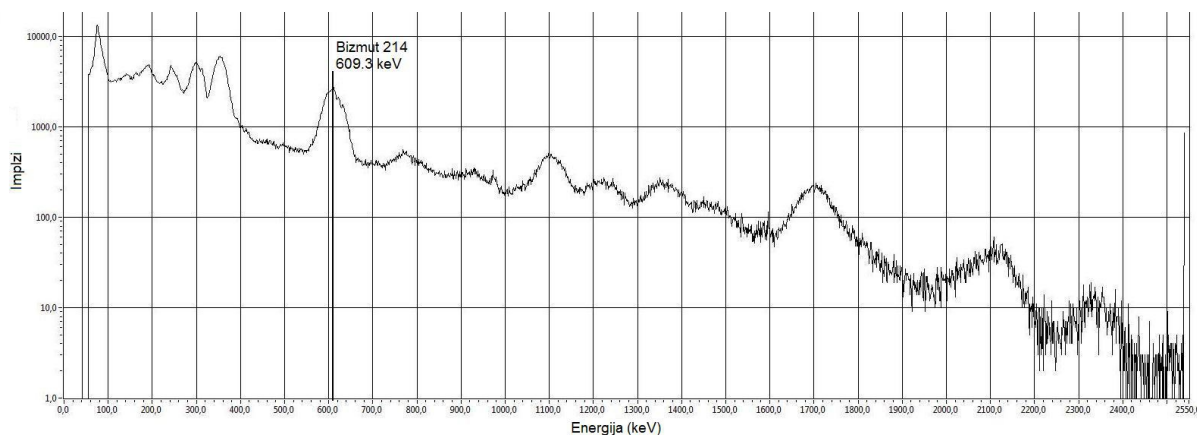


Slika 52: Valovitost VN napajanja (5mV/div, 5us/div).

Za meritve dosega, ločljivosti, linearnosti in izvedbe umerjanja energijskega spektra sevanja sem uporabil LabView programsko opremo, kjer sem napravil kratek program za izris spektra.

Da bi lahko določil doseg instrumenta in izvedel umerjanje, je bilo potrebno izmeriti energijski spekter že znanega izvora radioaktivnega sevanja. Za te namene se največkrat uporablja cezij-137 s sevalno energijo 661.7 keV ali kobalt-60 z 1.33MeV in 1.17 MeV energijo γ žarkov. Ampak ker teh izotopov nimam na dosegu roke, sem uporabil radioaktivni radij 226, ki ga imam.

Najprej sem za začetek predpostavil, da je linearnost meritev idealna, nato pa določil katera energija sevanja pripada določeni vrednosti AD pretvorbe. Za ta namen sem izbral sevanje bizmuta-214 (razpadni potomec radija) z vrhom energije γ žarkov pri 609 keV, ki je tudi označen na spodnji sliki.



Slika 53: Spekter Ra-226 po opravljenem umerjanju.

Pri tej energiji je bila vrednost AD pretvornika 490. Rezultate sem zato pomnožil z 1.243, da sem dobil energijo bizmuta-214. Na ta način sem lahko vsem vrednostim AD pretvornika določil pravo energijo in jih izrisal v spektru, kot je prikazano na sliki 53.

Spodnja meja, oziroma najmanjša vrednost energije ki jo lahko še merimo, je omejena s šumom in vhodno ničelno napetostjo operacijskih ojačevalnikov. Zato je s pomočjo primerjalnika in DA pretvornika spodnja meja postavljena na 20 mV, torej kar se da nizko, ampak še vedno nad nivojem šuma in ničelne napetosti. Ta napetost predstavlja približno 51 keV. Torej je doseg instrumenta od 51 keV pa do 2545 keV ($2048 \cdot 1.243$).

Eden glavnih parametrov spektrometra je ločljivost. Iz meritev spektra jo lahko določimo z naslednjo enačbo:

$$R = \frac{\Delta E}{E} \quad (18)$$

kjer je ΔE polna širina pri polovični višini vrha (FWHM), E pa temenska vrednost. Zaradi medsebojnega vpliva na širino merjenega vrha, je nujno uporabiti za meritve ločljivosti monoenergijske radioaktivne vire.

γ izvor	Energija (keV)	Ločljivost (%)
Fe-55	5.9	40 - 50
Am-241	59.6	12 - 15
Co-57	122	8.5 - 10
Na-22	511	7.5 - 9.0
Cs-137	662	6.5 - 8.5
Co-60	1170	5.0 - 6.5
	1330	4.5 - 5.5

Tabela 5: Značilne energijske ločljivosti spektrometrov z NaI(Tl) kristalom [3].

Ločljivost spektrometra sem izmeril s pomočjo americija-241 pri 59.6 keV in kalija-40 pri 1460 keV. Meritve so prikazane v spodnji tabeli.

E (keV)	E_{zgornja} (keV)	E_{spodnja} (keV)	ΔE (keV)	R
59.6	64	55	9	15 %
1460	1494	1416	78	5.3 %

Tabela 6: Meritve resolucije s pomočjo kalija-40 in americija-241.

Za meritve linearnosti pa sem spet uporabil spekter radia-226 zaradi več izrazitih vrhov pri točno določenih energijah od 77 keV pa do 2200 keV. Meritve so prikazane v spodnji tabeli. Zaradi ubranih bližnjic pri zmanjšanju porabe VN dela, je zato posledično linearnost uporabnega delilnika fotopomnoževalke pri večjih svetlobnih sunkih (večje energije γ žarkov) ali pri veliki pogostosti svetlobnih impulzov poslabšana. To se odraža tudi pri odstopanju izmerjenih vrednosti od pravih, kot prikazujejo meritve v spodnji tabeli.

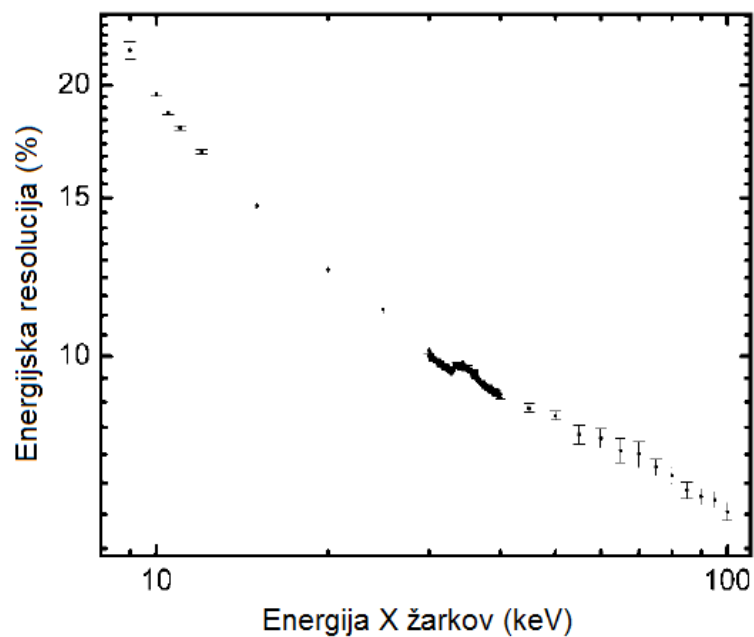
Element	γ E (keV)	Izmerjena E (keV)	Odstopanje (%)
X-žarki	77	75,6	1,8
Ra-226	186	189,5	-1,9
Pb-214	241,4	242,3	-0,4
Pb-214	295,2	300	-1,6
Pb-214	351,9	354	-0,6
Bi-214	609	610	-0,2
Bi-214	770	773	-0,4
Bi-214	1130	1106	2,1
Bi-214	1390	1357	2,4
Bi-214	1760	1710	2,8
Bi-214	2200	2120	3,6

Tabela 7: Odstopanje izmerjenih vrhov od prave vrednosti.

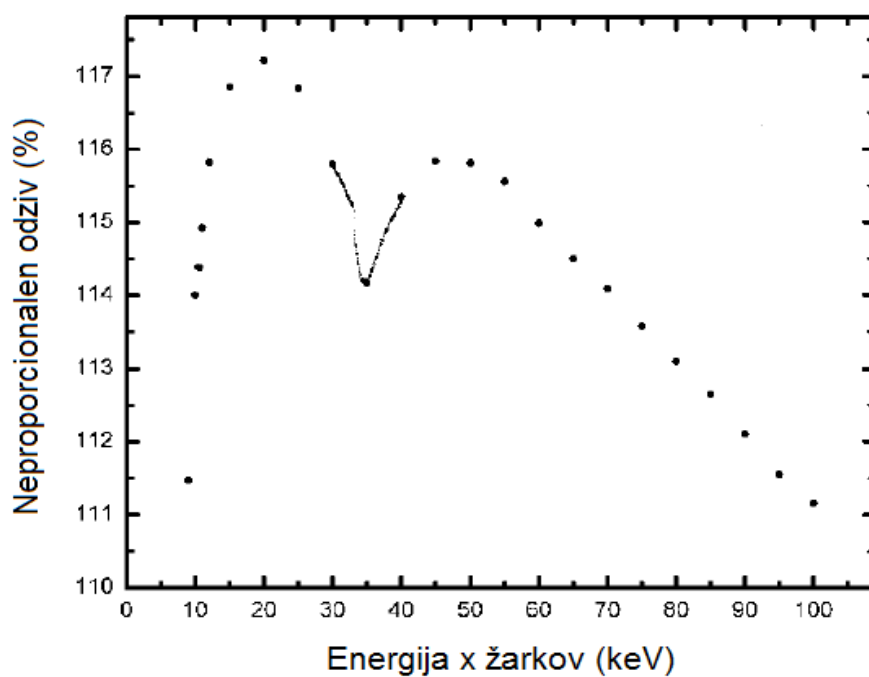
Zaradi velike nelinearnosti bi bilo torej potrebno najprej izboljšati napajalni vir, ter uporabiti manjše upornosti delilnika fotopomnoževalke in spremeniti analogni del tako, da bi lahko znižali spodnjo mejo dosega instrumenta.

Priloge

Priloga A



Energijska resolucija NaI(Tl) kristala [10].



Nesorazmeren odziv NaI(Tl) kristala v okolici jodovega roba K [10]. Idealna sorazmernost bi bila konstanta pri 100%.

Priloga B

Fotopomnoževalka skupaj s scintilatorjem zavita v svetlobno (1.) in magnetno (2.) zaščito.

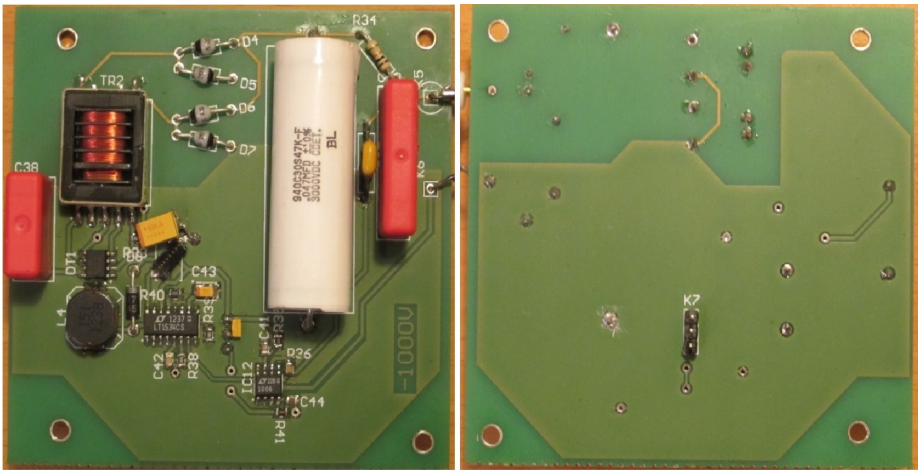
1.)



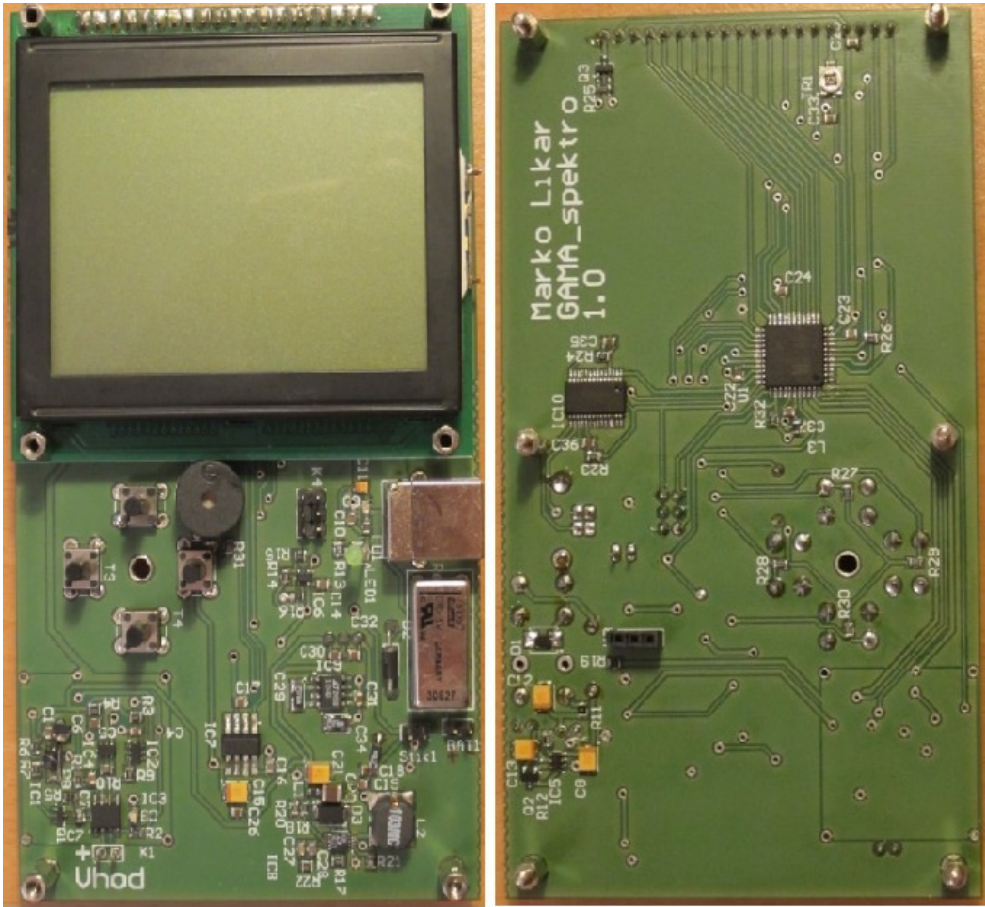
2.)



Priloga C



VN del instrumenta.



Glavni del instrumenta.

Viri in literatura

- [1] F. Cvelbar: Merjenje ionizirajočega sevanja, DMFA, Ljubljana 2003.
- [2] C. Grupen, B. Shwartz: Particle detectors, Cambridge 2008.
- [3] Hamamatsu: Photomultiplier tubes-Basic and applications, Hamamatsu photonics K. K. 2006.
- [4] Glenn F. Knoll: Radiation detection and measurement, John Wiley and Sons inc. 2010.
- [5] Piotr A. Rodnyi: Physical processes in inorganic scintillators, CRC 1997.
- [6] Robin Eilks: Principles of radiological physics, Churchill Livingstone 1987.
- [7] R. L. Heath: Scintillation spectrometry - *Gamma ray spectrum catalogue*, Ray spectrometry centre 1997.
- [8] Photomultiplier tubes, principles and applications, Photonis, Brive, France 2002.
- [9] Hamamatsu: »Osnovni princip fotopomnoževalke« Dosegljivo: <https://www.hamamatsu.com/us/en/technology/innovation/photocathode/index.html>. [Dostopano: 13.7.2014].
- [10] I. Khodyuk: Nonproportionality of inorganic scintillators, Uitgeverij BOXPress, Oisterwijk 2013.
- [11] Hamamatsu: Photon counting, *Using photomultiplier tubes*, Hamamatsu photonics K. K. 1998.
- [12] Hamamatsu: »Fotopomnoževalka R878« Dosegljivo: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/R878.html> [Dostopano: 1.7.2014].
- [13] Hamamatsu: Photomultiplier tubes and assemblies, *Scintillation counting and high energy physics*, Hamamatsu photonics K.K. 2012.
- [14] Linear technology: High voltage, Low noise, DC/DC Converters, *Application note 118* Linear technology corporation 2008.
- [15] Linear technology: Ultralow noise 2A switching regulators, Linear technology corporation 1998.
- [16] Metra mess: »Transducers with charge output« Dosegljivo: <http://www.mmf.de/instrumentation.htm> [Dostopano: 19.8.2014].

- [17] W. Jung: OpAmp Application handbook, Analog devices 2005.
- [18] R. Kollman, J Betten: Powering electronics from the USB port, Texas instruments Incorporated 2002.
- [19] Linear technology: LTC3402 2A, 3MHz Micropower synchronius boost converter, Linear technology corporation 2000.
- [20] R. Tarzwell, K. Bahl: High voltage printed corcuit design and manufacturing notebook, Sierra Proto express 2004.
- [21] Atmel: 8/16-bit Atmel XMEGA Microcontroller datasheet, Atmel corporation 2014.
- [22] Atmel: 8-bit Atmel XMEGA AU microcontroler AU manual, Atmel corporation 2013.
- [23] Getpebble forum: »Last charged x days ago« Dosegljivo:
<http://forums.getpebble.com/discussion/5516/last-charged-x-days-ago> [Dostopano 9.7.2014].
- [24] M. Likar: Merjenje ionizirajočega sevanja, Vipavski Križ 2013.

Izjava

Izjavljam, da sem diplomsko delo izdelal samostojno pod vodstvom mentorja doc. dr. Marko Jankovec.

Primorska 22.10.2014.

Marko Likar