



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



**NOVI DETEKCIONI SISTEM ZA MERENJE PROSTORNE
DISTRIBUCIJE AMBIJENTALNOG DOZNOG
EKVIVALENTA**

-master rad-

Novi Sad, 2026.god.

Mentor: Miodrag Krmar

Student: Branko Radojković

*Na prvom mestu zahvaljujem svom sinu **Bogdanu** i supruzi **Sanji** na podršci i strpljenju koju su mi nesebično darivali dok sam završavao studije medicinske Fizike i ovaj rad.*

*Takodje se zahvaljujem i svom mentoru prof dr **Miodragu Krmaru** na pomoći i strpljenju tokom izrade završnog rada.*

*Zahvaljujem se svojim saradnicima i prijateljima **mr Goranu Maniću** i prof **dr Vesni Manić** koji me 28 godina vode kroz svet nuklearne fizike - vrhuski stručnjaci iz oblasti merenja jonizujućeg zračenja. Njihova pomoć mi je bila veoma dragocena oko studija i završetka mog završnog rada.*

*Takodje veliku zahvalnost dugujem svojoj firmi “**Zavodu za zdravstvenu zaštitu radnika Niš**” iz Niša, svojim kolegama iz Odeljenja za zaštitu od zračenja i direktorima Zavoda **Sladani Majkić dr med.** i **Aleksandru Popoviću dipl ekon.** Zavod je finansirao moje studije Medicinske fizike.*

Izražavam zahvalnost naprednom AI asistentu za doprinos u razvoju softverskih drajvera i optimizaciji SCADA algoritama.

1 Sadržaj

1	Uvod	1
2	DOZIMETRIJSKE VELIČINE U RADIACIONOJ ZAŠTITI.....	3
2.1	Fundamentalne fizičke veličine: Apsorbovana doza i ekspozicija.....	3
2.2	Veličine za procenu radiološkog rizika	4
2.3	Operativne veličine za nadzor i nuklearnu medicinu	5
3	Rendgensko zračenje	6
3.1	Dobijanje rendgenskog zračenja.....	6
3.2	Interakcija rendgenskog zračenja sa materijom.....	7
3.2.1	Rejljevo rasejanje	8
3.2.2	Fotoelektrični efekat	8
3.2.3	Komptonov efekat	12
3.2.4	Stvaranje parova pozitron-elektron	14
4	IZVORI RENDGENSKOG ZRAČENJA I NJIHOVA METROLOŠKA KLASIFIKACIJA.....	15
4.1	Prirodni i neželjeni (parazitski) izvori	15
4.2	Veštački i tehnološki izvori zračenja.....	16
5	DETEKTORSKI MEDIJUMI I FIZIČKI PRINCIPI DETEKCIJE ZRAČENJA	18
5.1	Metrološka klasifikacija detektora.....	18
5.2	Fizika poluprovodničkih i scintilacionih detekcionih medijuma	19
6	PROSTORNO MERENJE INTENZITETA ZRAČENJA POMOĆU SILICIJUMSKIH PIN FOTODIODA.....	20
6.1	Unutrašnji mehanizmi i režimi rada PIN poluprovodnika.....	20
6.2	Konfiguracija transimpedansnog pretpojačavača i oblikovanje pika.....	21
7	EKSPERIMENTALNI DEO.....	23
7.1	ARHITEKTURA SCADA RADIOMETRIJSKOG SISTEMA I CENTRALNOG PRIJEMNIKA 23	
7.1.1	Organizacija skladištenja podataka (SdFat i FAT32 format)	25
7.1.2	Interfejs komunikacije baze sa računarom	25
7.1.3	Kompletna softverski kod centralnog prijemnika (Arduino Mega 2560) ...	26
7.2	Topologija i integracija perifernih modula centralne baze prijemnika.....	31
	<i>Slika 7.2 Topologija i integracija perifernih modula centralne baze prijemnika</i>	<i>31</i>
7.3	TOPOLOGIJA BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE (WSN).....	33
7.3.1	Tehničke karakteristike i mrežni kapacitet.....	34
7.3.2	Algoritam sprečavanja zagušenja bafera (1s vremenski prozori).....	34
7.4	DIZAJN I KARAKTERIZACIJA MERNIH ČVOROVA	35

7.4.1	Čvorovi 1 i 2: Poluprovodnički detektori sa PIN fotodiodama (BPW34 i FD80)	35
7.4.2	Razvojna evolucija analogne elektronike i hronologija rešavanja problema detekcije slabih signala.....	36
7.4.3	Čvor 3: Interfejs sa profesionalnim instrumentom Inspector EXP.....	54
7.4.4	Čvor 4: Rešenje drajvera za višekanalni analizator Rainbow MCA 7010 ..	58
7.5	KALIBRACIJA BEŽIČNIH ČVOROVA SEKUNDARNOM KOMPARATIVNOM METODOM	65
7.5.1	Opis eksperimentalnog postupka i mernih kondicija	65
7.5.2	Rezultati poredbenih merenja i analiza kalibracione matrice.....	66
7.5.3	Integracija koeficijenata u kod prijemnika i softverski proračun doze	67
7.6	PC SCADA SOFTVERSKA PLATFORMA (VISUAL BASIC 6.0).....	68
7.6.1	Princip rada softverskog koda i upravljačkih drajvera	68
7.6.2	Korisničko uputstvo za upravljanje i rad sa SCADA aplikacijom	70
7.6.3	OLE automatizacija Microsoft Excel-a i proračun parametara	71
7.6.4	Kompletna softverski kod SCADA PC aplikacije.....	73
8	REZULTATI I DISKUSIJA.....	89
8.1	REZULTATI ISTRAŽIVANJA I KLINIČKA VERIFIKACIJA WSN SCADA PLATFORME U REALNIM USLOVIMA RASEJANOG POLJA.....	89
8.1.1	Evaluacija dinamičkog odziva sistema u uslovima realnih kliničkih ekspozicija nad pacijentima.....	89
8.1.2	Komparativna analiza sirovog mernog saobraćaja u realnom vremenu za svih 11 pacijenata	90
8.1.3	Dinamički grafički prikaz komparativne kliničke akvizicije	92
8.1.4	Analiza uticaja geometrijskih parametara kristala pod vršnim opterećenjem	92
8.1.5	Unificirana radijalna rekalkibracija i izvođenje apsolutnih kliničkih koeficijenata osetljivosti.....	93
8.2	EXPERIMENTALNA VERIFIKACIJA SISTEMA, METROLOŠKA ANALIZA PROSTORNOG SLABLJENJA I REKALIBRACIJA MERNIH ČVOROVA	95
8.2.1	Radiobiološka i fizička analiza etalonskih mernih izvora (^{60}Co , ^{90}Sr , ^{241}Am)	95
8.2.2	Verifikacija zakona prostiranja zračenja i nelinearni fit na gasnom etalonu Inspector EXP (Čvor 3)	96
8.2.3	Analiza odziva i prostornog slabljenja na scintilacionom mernom kanalu Rainbow MCA 7010 (Čvor 4).....	100
2.	Zašto prva tačka na 0 cm (1.50 cm efektivno) pada ispod krive? — Efekat mrtvog vremena i saturacija fotomultiplikatora.....	102
8.2.4	Fenomenološka analiza sirovog mernog prozora i termičkog drifta na sondi IHTM FD80 (Čvor 2)	105

8.2.5	Terenska unificirana rekalkulacija sistema na bazi apsolutnog etalona zračenja	106
9	ZAKLJUČAK.....	108
9.1	Oblasti praktične primene Sistema.....	110
10	LITERATURA	111
11	BIOGRAFIJA.....	113
12	SAŽETAK (ABSTRACT)	114
13	DODATAK (APPENDIX).....	116
13.1	FRITZING UPUTSTVO ZA CENTRALNI PRIJEMNIK (ARDUINO MEGA 2560)	116
13.2	FRITZING UPUTSTVO ZA SVA ČETIRI BEŽIČNA ČVORA (ARDUINO NANO)	117
13.3	EASYEDA UPUTSTVO ZA POJAČAVAČKI MODUL BPW34S (ČVOR 1)	118
	Net-lista i šema povezivanja komponenti:.....	118
13.4	EASYEDA UPUTSTVO ZA POJAČAVAČKI MODUL FD80 (ČVOR 2)....	119
13.5	Net-lista i šema povezivanja komponenti:	119
13.6	INŽENJERSKI SAVET ZA EKSTREMNI OKLOP (Faradejev kavez):.....	119
13.7	SPECIFIKACIJA HARDVERSKIH KOMPONENTI (Bill of Materials - BOM)	120

1 Uvod

Savremena primena jonizujućeg zračenja u medicinskoj dijagnostici, interventnoj radiologiji i nuklearnoj medicini donela je revolucionaran napredak u vizuelizaciji anatomskih struktura i lečenju onkoloških oboljenja. Međutim, paralelno sa ekspanzijom radioloških tehnika, pitanje radijacione zaštite, metrološkog nadzora i minimizacije profesionalnog izlaganja medicinskog osoblja postalo je jedan od ključnih prioriteta moderne medicinske fizike. Unutar kliničkih okruženja, kao što su rendgen sale, angio-sale i laboratorije za pripremu radiofarmaka, polja zračenja poseduju izraženu prostornu i vremensku dinamičnost, uslovljenu pulsnom prirodom rada rendgenskih cevi i pojavom sekundarnog, Komptonovog rasejanja fotona. Zbog toga, prosto tačkasto merenje zračenja u jednoj fiksnoj sekundi na jednoj lokaciji nije dovoljno za adekvatnu procenu radiološkog rizika, već se javlja imperativ za kontinualnim, online praćenjem prostorne distribucije ključnih dozimetrijskih veličina.

U domenu praktične radijacione zaštite, Međunarodna komisija za radijacione jedinice i mere (ICRU) [20] definisala je operativne veličine za nadzor spoljašnjeg izlaganja, među kojima centralno mesto zauzima **ambijentalni ekvivalent doze, $H^*(d)$** . Merenjem ove veličine na referentnoj dubini tkiva od $d = 10$ mm (odnosno $H^*(10)$), dobija se konzervativna i metrološki opravdana procena dubinske efektivne doze koju bi humani organizam primio u datoj tački prostora. Ipak, tradicionalni monitorski sistemi koji se koriste u bolnicama najčešće se sastoje od pojedinačnih, kablovski povezanih instrumenata koji su ekonomski izuzetno skupi, geometrijski kruti i nefleksibilni za simultano mapiranje više dislociranih tačaka u prostoru. Takođe, klasična nuklearna instrumentacija često zapostavlja uticaj ambijentalnih faktora, poput temperature vazduha, koja može dramatično uticati na unutrašnju struju curenja i stabilnost savremenih poluprovodničkih detekcionih medijuma, uvodeći parazitski šum u merni lanac.

Predmet i glavni cilj ovog master rada jeste projektovanje, hardverska realizacija i metrološka verifikacija **novog, autonomnog i višenamenskog bežičnog SCADA radiometrijskog sistema (SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition** u prevodu Sistem za nadzor, upravljanje i prikupljanje podataka) namenjenog online mapiranju prostorne distribucije ambijentalnog doznog ekvivalenta $H^*(10)$. Razvijeni

sistem uspešno prevazilazi nedostatke klasične opreme kroz topologiju bežične senzorske mreže (WSN) koja operiše u ISM opsegu na 2.4 GHz, omogućavajući simultanu akviziciju podataka sa četiri daljinska merna čvora koji pokrivaju različite aktivne volumene i fizičke principe registracije zračenja: od jeftinih poluprovodničkih PIN fotodioda (BPW34S i FD80) sa transimpedansnim pojačavačima, preko gasnih Gajger-Milerovih brojača, pa sve do visokoprecizne neorganske *NaI(Tl)* scintilacione spektrometrije .

Softversko jezgro ovog rada bazirano je na razvoju unificiranih asinhronih drajvera na mikrokontroleru ATmega2560 i razvoju namenske Windows PC SCADA aplikacije u Visual Basic 6.0 okruženju . Kroz implementaciju originalnih inženjerskih rešenja, kao što su industrijski blok-prijem u letu i "Tajmer tišine", postignuta je stopostotna stabilnost prenosa masivnih radijacionih dnevnika bez rizika od preopterećenja steka . Razvijeni softver kroz naprednu OLE automatizaciju sa Microsoft Excel-om u realnom vremenu raspoređuje podatke, računa integralni dozni teret i dinamički generiše komparativne grafikone radijacionih i termalnih profila . Eksperimentalna verifikacija sistema, sprovedena pod medicinskim zakočnim X-snopom od 80 kV, potvrdila je izuzetnu osetljivost i linearnost razvijenih poluprovodničkih sonde, demonstrirajući punu spremnost ove platforme za trajnu implementaciju u angio-salama, kardio-kateterizacionim laboratorijama i prostorijama za nuklearnu medicinu .

Pored primarne funkcije merenja visokog fluksa jonizujućeg zračenja tokom ultra-kratkih pulsnih ekspozicija medicinskih dijagnostičkih aparata, kao ravnopravni projektni zadatak razvijene WSN SCADA platforme postavlja se i kontinuirani monitoring ambijentalnog pozadinskog zračenja (fona) unutar medicinskih zona u režimu rada 24/7 . Implementacija ovog zadatka je metrološki i bezbednosno neophodna iz dva razloga: prvo, radi neprekidnog praćenja kumulativnog radiološkog opterećenja i nivoa rasejanog zračenja u radnoj sredini medicinskog osoblja, i drugo, radi obezbeđivanja konstantne verifikacije stabilnosti i funkcionalnosti celokupnog mernog lanca (bežične mreže, SD logera i serijskog drajvera) i u stanjima mirovanja izvora, čime se sprečava parazitsko otkazivanje sistema .

2 DOZIMETRIJSKE VELIČINE U RADIACIONOJ ZAŠTITI

Fundament savremene radijacione zaštite, medicinske fizike i radiobiologije počiva na strogo definisanom sistemu dozimetrijskih veličina. Ove veličine, koje je standardizovala Međunarodna komisija za radijacione jedinice i mere (ICRU), omogućavaju kvantitativno izražavanje interakcije jonizujućeg zračenja sa materijom, krećući se od bazičnih fizikalnih parametara do kompleksnih indikatora biološkog rizika.

2.1 Fundamentalne fizičke veličine: Apsorbovana doza i ekspozicija

Osnovnu fizikalnu veličinu u radiometriji predstavlja **apsorbovana doza (D)**, koja se definiše kao srednja energija jonizujućeg zračenja predata jedinici mase određenog materijala. Matematički se izražava relacijom:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (1)$$

gde je $d\bar{\epsilon}$ srednja predata energija materiji mase dm . Izvedena jedinica u SI sistemu je Grej (**Gy**), pri čemu jedan Grej odgovara predataj energiji od jednog Džula po kilogramu mase (**1 J/kg**), dok starija vansistemska jedinica **rad** iznosi stoti deo Greja (**1 Gy = 100 rad**). Sa metrološkog aspekta, apsorbovana doza je primarni parametar čiji intenzitet direktno zavisi od atomske strukture ozračenog medijuma, što implicira da će isto polje zračenja indukovati različite doze unutar humanog tkiva u poređenju sa olovnom štitom.

Istorijski važna, ali praktično ograničena veličina je **ekspozicija (X)**, koja služi kao mera jonske sposobnosti isključivo fotonskog (X ili gama) zračenja unutar vazdušnog medijuma. Ona opisuje apsolutnu vrednost ukupnog naelektrisanja jona jednog znaka (dQ) oslobođenih u vazduhu po jedinici mase (dm), prema formuli:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (2)$$

Zvanična SI jedinica je Kulon po kilogramu (C/kg), dok se u starijoj praksi koristio Rendgen (R), pri čemu je $1 R \approx 2.58 \times 10^{-4} C/kg$. S obzirom na njenu striktnu ograničenost na vazduh i fotonske snopove, ekspozicija se u savremenoj dozimetriji retko primenjuje i uglavnom je rezervisana za bazične kalibracione procedure.

2.2 Veličine za procenu radiološkog rizika

U domenu radijacione zaštite, fundamentalne veličine nisu dovoljne jer različiti tipovi zračenja poseduju različitu biološku efektivnost pri istoj količini predate energije. Iz tog razloga uvodi se **ekvivalentna doza** (H_T), koja predstavlja apsorbovanu dozu u određenom organu ili tkivu ponderisanu namenskim faktorom zračenja (w_R). Formula za izračunavanje glasi: $H_T = w_R \cdot D_{T,R}$ gde je $D_{T,R}$ apsorbovana doza u tkivu T usled izlaganja zračenju tipa R . Jedinica ekvivalentne doze je Sivert (Sv). Vrednost faktora kvaliteta w_R odražava biološku destruktivnost čestica, pa tako za fotone, elektrone i mione iznosi 1, za protone skoči na 2, dok za alfa čestice i teške fisijske fragmente dostiže vrednost 20, omogućavajući preciznu procenu stohastičkih efekata i karcinogeneze u specifičnom organu. Najvažniju operativnu veličinu za celokupni organizam predstavlja **efektivna doza** (E), koja opisuje zbir ekvivalentnih doza u svim tkivima tela ponderisanih prema njihovoj specifičnoj radio-osetljivosti. Izračunava se preko matematičkog izraza:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (3)$$

gde faktor w_T predstavlja tkivni ponderirajući koeficijent definisan preporukama ICRP 103, čiji ukupni zbir za celo telo iznosi 1. Najvišu osetljivost i koeficijent od 0.12 poseduju vitalni sistemi poput crvene koštane srži, pluća i želuca, dok manje osetljiva tkiva poput kože i mozga imaju faktor 0.01. Efektivna doza, iskazana takođe u Sivertima (Sv), predstavlja ključni parametar u radijacionoj zaštiti jer omogućava svođenje neuniformnog ozračivanja različitih delova tela na jedinstveni ekvivalent ukupnog zdravstvenog rizika, na osnovu čega se zakonski definišu granice profesionalnog izlaganja.

2.3 Operativne veličine za nadzor i nuklearnu medicinu

Za direktno instrumentalno merenje i procenu doza koriste se operativne veličine za nadzor. U domenu monitoringa radnog i ambijentalnog prostora primenjuje se **ambijentalni ekvivalent doze $H^*(d)$** , dok se za ličnu dozimetriju koristi **individualni ekvivalent doze $H_p(d)$** , gde dubina tkiva od $d = 10$ mm (odnosno $H^*(10)$ i $H_p(10)$) služi za procenu dubinske efektivne doze celog tela, dok dubina od 0.07 mm opisuje izloženost kože i očiju. U nuklearnoj medicini i radiobiologiji blisko povezana sa apsorbovanom dozom je **kerma (K)**, koja meri početnu kinetičku energiju svih naelektrisanih čestica oslobođenih dejstvom nenabijenog zračenja po jedinici mase materije, iskazana u Grejima (**Gy**). Na ćelijskom nivou, fluktuacije energije usled statističke prirode interakcija opisuju se preko **specifične apsorbovane energije (z)**, koja je ključna za mikrodozimetriju. Sa druge strane, sama kvantitativna količina radioaktivnog materijala izražava se preko **aktivnosti (A)**, koja definiše broj raspada jezgra u jedinici vremena i meri se u Bekerelima (**Bq** = 1 raspad/s), zamenjujući stariju jedinicu Kiri (1 Ci = 3.7×10^{10} Bq). Dozimetrijske veličine na taj način grade striktnu hijerarhiju koja povezuje čisto fizičke interakcije sa realnim biološkim efektima.

3 Rendgensko zračenje

Rendgensko zračenje (X zračenje) pripada elektromagnetnom spektru talasnih dužina od 0,01 do 10 nanometara. Osnovna razlika između gama i X zraka je u samom načinu nastajanja. X zraci nastaju u elektronskom omotaču atomskog jezgra dok gama zraci nastaju u jezgri atoma.

Apsorpcija rendgenskih zraka u tkivima i organima, na osnovu njihovih atomskih osobina, osnova je za različite metode snimanja koje se koriste u dijagnostičkoj radiologiji. Principi u proizvodnji rendgenskih zraka ostali su isti od njihovog otkrića. Međutim, mnogo usavršavanja je uloženo u dizajn rendgenskih cevi da bi se postigle performanse potrebne za današnje radiološke preglede.

3.1 Dobijanje rendgenskog zračenja

Kada se elektroni ubrzaju do energije većih od 5 keV i zatim se usmere na ciljnu površinu, može doći do emisije rendgenskih zraka. Rendgenski zraci uglavnom potiču od naglog usporavanja elektrona kada stupaju u interakciju sa kulonovim poljem jezgara atoma mete. Ovi rendgenski zraci su poznati kao 'Bremsstrahlung' ili zakočno zračenje. Energetski spektar ovako emitovanog zračenja je kontinualan. Energija emitovanog zračenja raste sa porastom energije elektrona i atomskim brojem materijala u kome se vrši usporavanje. [Todorović N. , 2009.]

Pored zakočnog zračenja, postoji i karakteristično zračenje. Ono nastaje kada dolazi do deeksitacije elektrona. Ubrzan elektron izbacuje elektron iz neke od unutrašnjih ljuski atoma i ostavlja atom u eksitovanom stanju i njegov spektar linijski (tačno određene energije). Naime, izbijanjem elektrona sa nekog od elektronskih nivoa u atomu mete, nastaje prazno mesto koje se popunjava prelaskom elektrona sa nekih od viših elektronskih nivoa u atomu. Tom prilikom se emituje energija u vidu fotona karakterističnog X zračenja, čija energija odgovara energiji prelaza (razlici u energijama nivoa između kojih se prelaz vrši). [Todorović N., 2009.]

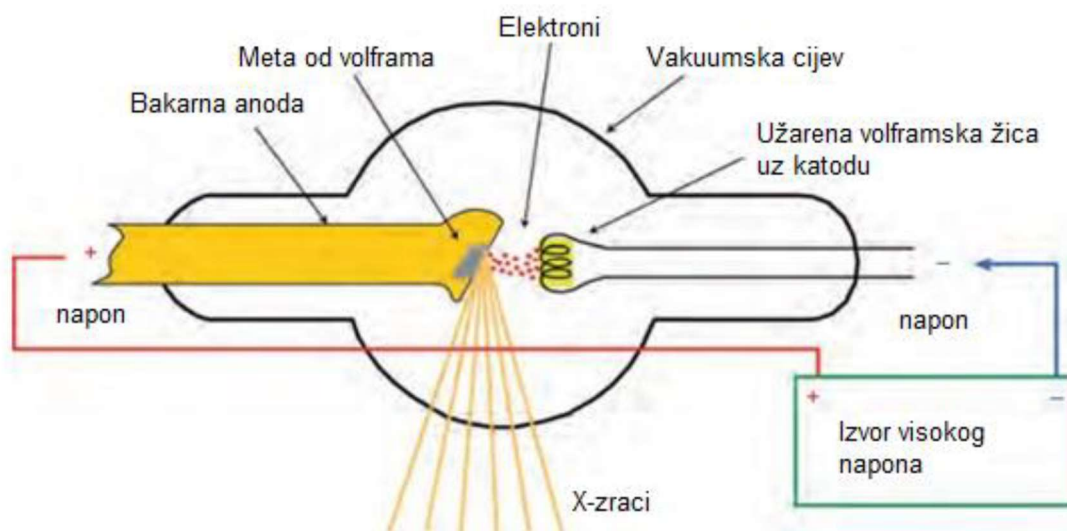
Merenja pokazuju, da se oko 99% energije elektrona koji padaju pri tome na površinu antikatode pretvara u toplotu i antikatoda se jako zagreva. Većina elektrona vrši elastične

sudare sa česticama materije povećavajući njihovu kinetičku energiju, čime se srednja vrednost kinetičke energije atoma materijala antikatode povećava, a time i njena temperatura. Samo 1% snage se pretvara u energiju X zračenja. [Janjić I., 1992.]

U većini slučajeva X zraci se proizvode u rendgenskim cevima. U cevi kinetička energija elektrona pretvara se u toplotnu i energiju zračenja. Kinetičku energiju elektroni dobijau od električnog polja, tako da je elektrostatička energija izvor svemu.

Osnovne karakteristike jednostavne rendgenske cevi su:

1. Zagrejana metalna nit koja obezbeđuje snabdevanje elektronima termoionskom emisijom i deluje kao katoda,
2. Evakuisana staklena cev preko koje se može primeniti razlika potencijala,
3. Metalna anoda (meta) sa visok redni broj atoma materijala za konverziju energije elektrona u rendgenske zrake,
4. Aluminijski filteri koji treba da apsorbuju zračenje niskih energija,
5. Sve ovo se nalazi u olovnom kućištu.



Slika 3.1 Rendgenska cev

3.2 Interakcija rendgenskog zračenja sa materijom

Interakcija rendgenskih zraka sa tkivom igra značajnu ulogu u dijagnostičkim pregledima.

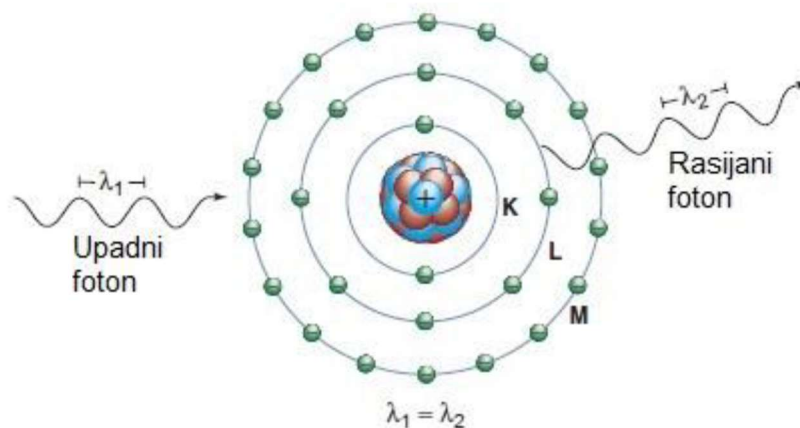
Postoje tri osnovne interakcije elektromagnetnog zračenja sa materijom, a to su:

1. Rejljevo rasejanje
2. fotoelektrični efekat
3. Komptonovo rasejanje,
4. stvaranje parova.

U ovom radu razmotrićemo samo one interakcije koje su bitne u dijagnostičkoj radiologiji, a to su fotoelektrični efekat i Komptonovo rasejanje.

3.2.1 Rejljevo rasejanje

Pri Rejljevom rasejanju, upadni foton interaguje sa celim atomom i pobuđuje ga, za razliku od pojedinačnih elektrona kao kod Komptonovog rasejanja ili fotoelektričnog efekta (o kojima će biti reči kasnije). Ova interakcija se dešava uglavnom sa rendgenskim zracima veoma niske energije (15 do 30 keV). Tokom Rejljevog rasejanja, električno polje elektromagnetnog talasa upadnog fotona predaje svu svoju energiju, uzrokujući da svi elektroni u rasejanom atomu osciluju u fazi. Oblak elektrona odmah emituje ovu energiju, emitujući pri tom foton iste energije, ali u malo drugačijem pravcu (Slika 3.2). U ovoj interakciji ne dolazi do izbacivanja elektrona iz orbite atoma, pa stoga ne dolazi do jonizacije. Uopšteno, prosečni ugao rasejanja opada kako se energija rendgenskog zraka povećava.



Slika 3.2 Prikaz Rejljevog rasejanja

3.2.2 Fotoelektrični efekat

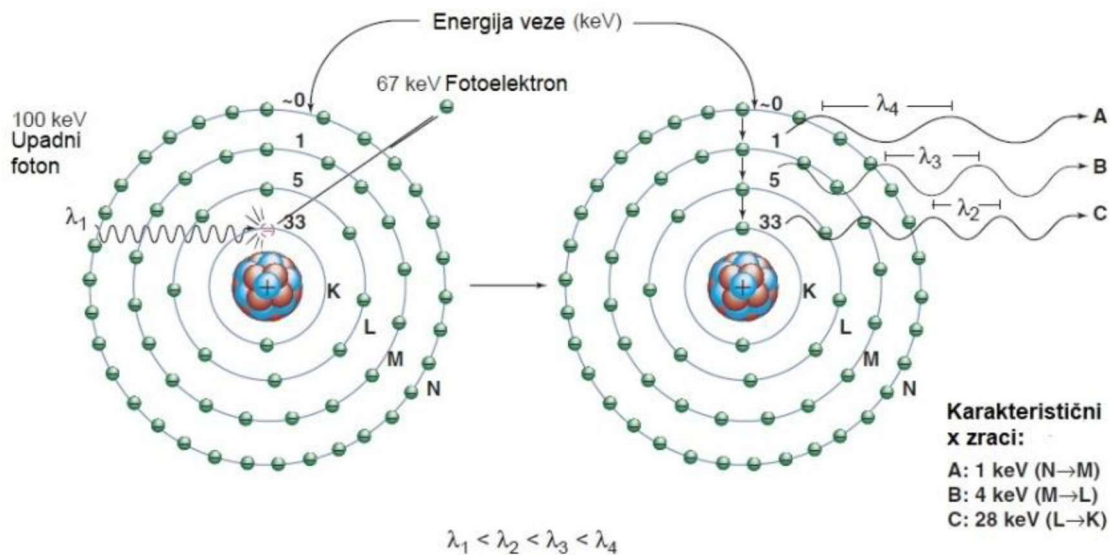
Na nižem kraju dijagnostičkog opsega energija fotona, fotoelektrični efekat je dominantan proces. Sa tačke gledišta snimanja, ovo je najvažnija interakcija koja se može

desiti između rendgenskih zraka i vezanih elektrona.

Fotoelektrični efekat je proces u kojem foton predaje svoju kompletnu energiju orbitalnom elektronu. Foton tom prilikom prestaje da postoji a elektron se udalji iz atoma sa energijom:

$$E_e = E_f - E_v \quad (4)$$

gde je E_f energija koju je foton posedovao pre interakcije, a E_v je energija veze orbitalnog elektrona. [Krmar M., 2013.]

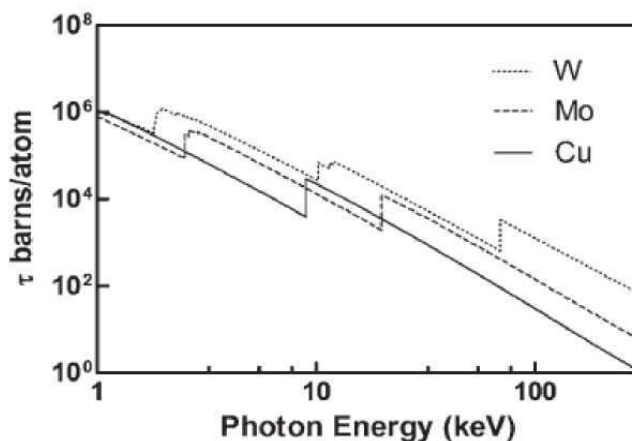


Slika 3.3 Šematski prikaz fotoelektričnog efekta

Na Slici 3.3 vidimo šematski prikaz fotoelektričnog efekta, (a) Upadni foton izbacuje elektron ostavljajući prazno mesto u omotaču. (b) Elektron veće energije popunjava prazno mesto i emituje karakteristični rendgenski foton. (c) Proizvedeni pozitivno naelektrisani jon i slobodni elektron (jonski par).

Dakle, energija fotona se utroši na rad potreban da se elektron izbaci iz atoma kao i na njegovu kinetičku energiju. Fotoelektrični efekat moguć je samo na vezanom elektronu što je uslovljeno zakonom održanja impulsa. Neophodno je da još jedno telo na sebe preuzme deo impulsa fotona (u ovom slučaju to je atom). Efikasni presek, mera verovatnoće nastanka fotoefekta, se smanjuje kako raste energija, uz nekoliko oštarih skokova na energijama koje odgovaraju energijama veze orbitalnih elektrona. Ukoliko foton poseduje energiju koja je

znatno viša od energije veze K- elektrona, onda je verovatnoća za fotoefekat relativno mala. Kako se energija fotona smanjuje, verovatnoća fotoefekta raste da bi dostigla lokalni maksimum baš za energije fotona koje su jednake vezivnoj energiji K-elektrona.



Slika 3.4 Zavisnost efikasnog preseka od energije fotona

Teoretski, fotoefekat može da se odigra na svakom pojedinačnom orbitalnom elektronu, ali se verovatnoća odvijanja ovog procesa razlikuje od elektrona do elektrona. Što je energija veze elektrona bliža energiji fotona elektron će biti čvršće vezan, pa je i verovatnoća dešavanja fotoefekta na takvom elektronu viša. I obrnuto, ako foton poseduje energiju znatno višu od energije veze elektrona, verovatnoća za fotoefekat je mala, pošto se sa aspekta energije fotona elektroni ne mogu smatrati dovoljno čvrsto vezanim da bi se fotoefekat odigrao. Ukoliko je energija fotona neznatno niža od energije veze K-elektrona, foton neće imati mogućnost da ga izbaci iz atoma pa se verovatnoća fotoefekta naglo smanjuje. Na tim energijama moguć je samo fotoefekat na L i M-elektronima. S obzirom da ovde foton ima znatno višu energiju od energija kojim su vezani L i M-elektroni, efikasni presek za fotoefekat ponovo ima nisku vrednost. No kako se energija fotona približava energiji veze L-elektrona, vrednost efikasnog preseka raste i dobija se još jedan maksimum, kada je energija fotona upravo jednaka energiji veze elektrona na L-ljusci. Nakon maksimuma, idući ka nižim energijama, efikasni presek naglo opada pošto fotoni nemaju dovoljnu energiju da izbace L-elektrone. Lako je zaključiti da se situacija na identičan način ponavlja i sa M-elektronima.

Stoga, ne samo da je fotoefekat moguć jedino na vezanom elektronu, nego je i verovatnoća za njegovo odvijanje utoliko veća ukoliko vezivna energija elektrona ima višu vrednost. Ako foton poseduje dovoljno visoku energiju, najveća će verovatnoća biti da se fotoefekat odigra baš na elektronima koji se nalaze na K ljusci. Verovatnoća za fotoefekat

na K ljusci je oko 5 puta veća od verovatnoće za da se isti proces odigra na L ljusci, a otprilike 20 puta veća od verovatnoće fotoefekta na M ljusci. Procena je da se oko 80% od svih 18 fotoefekata odigra na K-elektronima, naravno, ukoliko je energija fotona veća od vezivne energije K- elektrona. Ukoliko je energija fotona niža od energije veze elektrona na K-ljusci, najveći broj fotoefekata će se odigrati na L-elektronima.

Efikasni presek za fotoefekat je prilično kompleksna funkcija energije, tako da je teško pronaći neku relativno prostu funkciju koja bi tu zavisnost dobro opisala u širokom opsegu energija. Vredi pomenuti da se zavisnost efikasnog preseka u oblasti energija koje su neznatno više od energije veze K elektrona može opisati funkcijom $E^{7/2}$. Na energijama koje su znatno više od energije veze elektrona, ova funkcija polako prelazi u E^{-1} . Efikasni presek za fotoefekat veoma zavisi od rednog broja materijala. Ustanovljeno je da se verovatnoća za fotoefekat povećava proporcionalno sa Z^5 . Ovako brzo povećavanje verovatnoće fotoefekta sa rednim brojem materijala se može objasniti činjenicom da energije veza elektrona takođe rastu sa povećanjem rednog broja. Tako na primer, vezivna energija K elektrona u atomu aluminijuma iznosi 2.5 keV, dok je kod uranijuma ona 116 keV. Budući da se fotoefekat odvija u većoj meri tamo gde su elektroni čvršće vezani, jasno je da mora postojati veoma jaka zavisnost efikasnog preseka i rednog broja materijala. Dakle, zavisnost efikasnog preseka fotoefekta od energije i rednog broja materijala je:

$$\sigma_{fe} \sim \frac{Z^5}{E^{7/2}} zaE_f > E_V^K \quad (5)$$

$$\sigma_{fe} \sim \frac{Z^5}{E^{7/2}} zaE_f \gg E_V^K \quad (6)$$

Nakon što jedan od elektrona bude izbačen iz atoma u procesu fotoelektričnog efekta, na njegovo mesto dolazi elektron sa neke od viših orbitala. Tom prilikom dolazi do emisije zračenja. Ukoliko se taj proces odigrao na K elektronu, emitovana radijacija za većinu elemenata, osim onih najlakših, biva u oblasti rendgenskog zračenja. To je takozvano karakteristično rendgensko zračenje, koje uvek neizbežno prati proces fotoelektričnog efekta. Ponekad je moguće da atom umesto emisije fotona koja bi usledila nakon popunjavanja praznog mesta na nekoj od orbitala, energiju pobude direktno preda nekom od

elektrona iz omotača i na taj način siđe u osnovno energetska stanje. Elektroni emitovani na ovaj način se nazivaju Ožerovi elektroni. [Krmar M., 2013.].

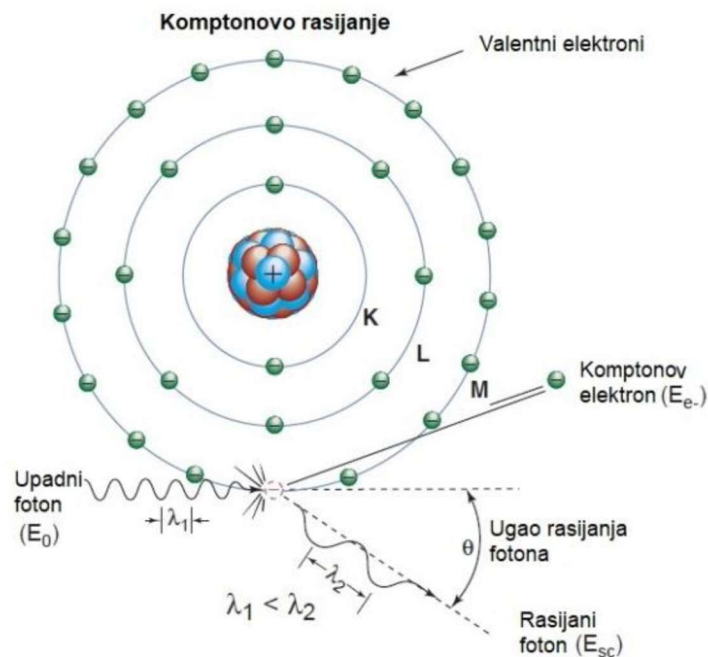
3.2.3 Komptonov efekat

Komptonovo rasejanje se može opisati kao elastično rasejanje fotona, kao čestice na slobodnom elektronu (Slika 3.5). Na osnovu zakona održanja energije i impulsa primenjenog na elastični sudar dobija se odlična saglasnost računskih sa eksperimentalnim rezultatima. Energija fotona koji se rasejao pod uglom θ se može izraziti kao:

$$E = \frac{E_{f_0}}{1 + \frac{E_{f_0}}{mc^2}(1 - \cos \theta)} \quad (7)$$

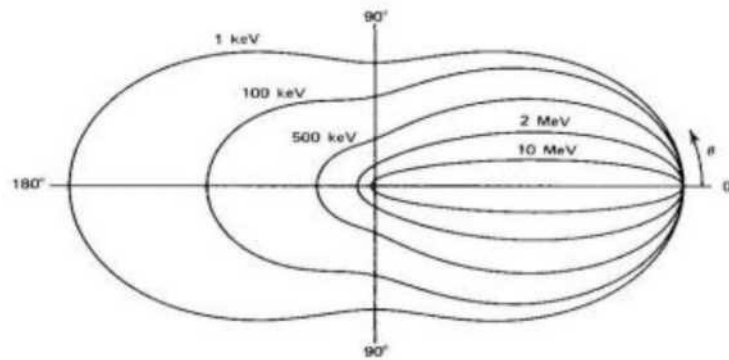
Može se videti da je za male uglove skretanja, kada veličina $\cos \theta$ ima vrednost veoma blisku jedinici, energija rasejanog fotona približno jednaka energiji upadnog fotona. Kako ugao rasejanja raste, tako raste i razlika u energijama fotona pre i nakon interakcije. Najmanju energiju ima foton koji se rasejava unatrag pod 180° . Za visoke energije upadnog fotona, energija rasejanog fotona će biti:

$$E \approx \frac{E_{f_0}}{1 - \cos \theta} \quad (8)$$



Slika 3.5 Šematski prikaz Komptonovog rasejanja

Diferencijalni efikasni presek, kao verovatnoća skretanja pod datim uglom za rasejanje fotona na jednom elektronu, izveli su Klajn i Nišina. Na osnovu njega moguće je odrediti kako verovatnoću rasejanja fotona pod nekim uglom, tako i intenzitet zračenja koje će se rasejati pod datim uglom, u zavisnosti od energije upadnog fotona. Ova ugaona zavisnost intenziteta rasejanog zračenja prikazana je na Slici 3.6. Za male energije, verovatnoća rasejanja fotona je simetrična, tj. jednaka je verovatnoća da će foton biti rasejan unapred kao i unazad. Kako energija fotona raste, ova distribucija se



Slika 3.6 Ugaona distribucija intenziteta rasejanog Komptonovog zračenja za različite energije upadnih fotona

pomera ka unapred (u pravcu i smeru kretanja upadnog fotona), da bi za visoke energije imali slučaj da su gotovo svi fotoni nakon rasejanja usmereni ka napred.

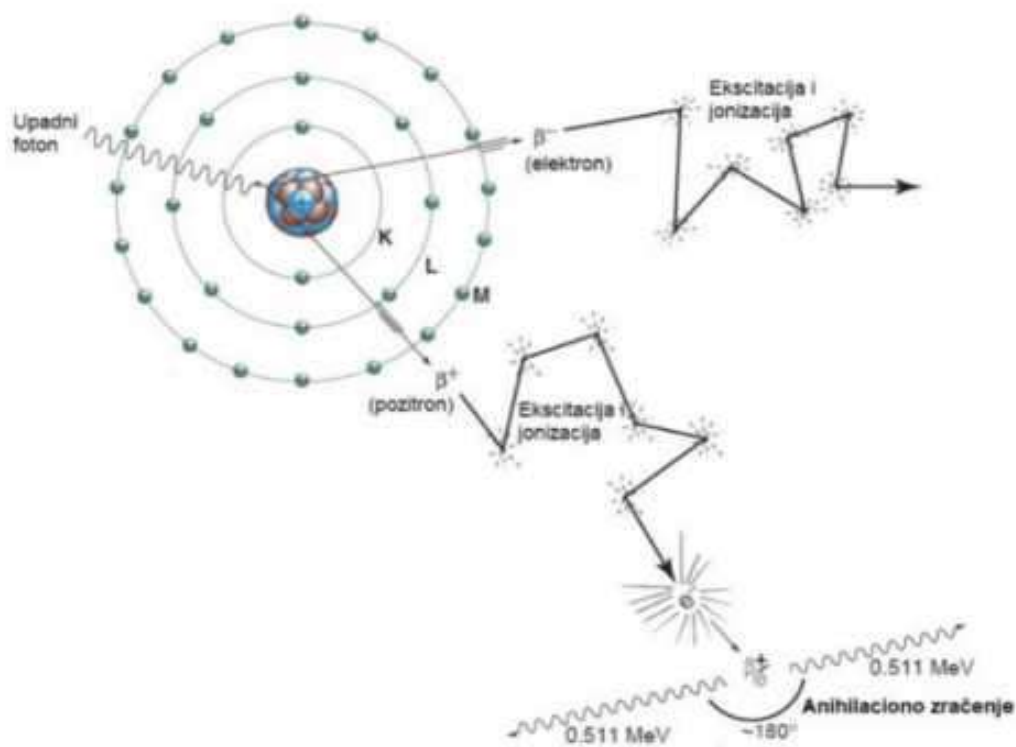
Na osnovu Klajn-Nišinine relacije, moguće je odrediti ukupni efikasni presek za Komptonovo rasejanje, integracijom po svim mogućim uglovima rasejanja. Dobija se relativno komplikovana relacija, koja se često uprošćava na taj način što se odvojeno posmatraju različite energetske oblasti. Za sve obrasce koji se dobijaju na ovaj način, zajedničko je da je totalni efikasni presek za rasejanje fotona na jednom elektronu obrnuto proporcionalan njegovoj energiji. Ako se još uzme u obzir da atom ima Z elektrona, konačno se dobija da je:

$$\sigma_{Com} \sim \frac{Z}{E} \quad (9)$$

Dakle, i verovatnoća Komptonovog efekta se smanjuje sa porastom energije fotona, ali u mnogo manjoj meri nego što je to bio slučaj sa fotoelektričnim efektom. Osim toga, verovatnoća Komptonovog efekta manje zavisi od rednog broja materijala, u odnosu na fotoelektrični efekat. [Krmar M., 2013.]

3.2.4 Stvaranje parova pozitron-elektron

Nastanak para može se desiti samo kada energija rendgenskih ili gama fotona prelazi 1.02 MeV. Pri produkciji para, rendgenski ili gama fotoni stupaju u interakciju sa električnim poljem jezgra atoma. Energija fotona se transformiše u par elektron-pozitron (slika 9). Preostali ekvivalent mase i energije svakog elektrona je 0.511 MeV i zbog toga je energetski prag za ovu vrstu interakcije 1.02 MeV. Energija fotona iznad ovog praga se prenosi na elektron i pozitron kao kinetička energija. Elektron i pozitron gube svoju kinetičku energiju ekscitacijom i jonizacijom. Kao što je ranije diskutovano, kada se pozitron zaustavi, on stupa u interakciju sa negativno naelektrisanim elektronom, što dovodi do formiranja dva suprotno usmjerena anihilaciona fotona od 0.511 MeV (Slika 3.7).



Slika 3.7 Stvaranje para pozitron-elektron

4 IZVORI RENDGENSKOG ZRAČENJA I NJIHOVA METROLOŠKA KLASIFIKACIJA

U savremenoj naučnoj i medicinskoj praksi, polja elektromagnetnog zračenja u X-opsegu generišu se putem različitih fizičkih mehanizama, koji se na osnovu svog porekla fundamentalno mogu klasifikovati u tri velike kategorije: prirodne i neželjene (parazitske) i veštačke (namenske) izvore. Razumevanje energetskih i spektralnih karakteristika ovih izvora predstavlja polaznu tačku u projektovanju adekvatnih SCADA sistema za prostorni monitoring i zaštitu od zračenja (**SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition** u prevodu Sistem za nadzor, upravljanje i prikupljanje podataka).

4.1 Prirodni i neželjeni (parazitski) izvori

Iako su veštački izvori apsolutno dominantni u radiologiji, X-zračenje je prisutno i u prirodi kao komponenta kosmičkog zračenja i prirodne radioaktivnosti. Kosmički X-zraci primarno potiču sa Sunca, kao i od udaljenih objekata visokog energetskog intenziteta poput pulsara, supernova i akrecionih diskova crnih rupa. Ipak, zahvaljujući zemljinoj atmosferi koja deluje kao masivan prirodni štit, kosmičko X-zračenje biva gotovo u potpunosti apsorbovano u gornjim slojevima, čineći njegov doprinos prirodnom fonu na površini Zemlje zanemarljivim. Zemaljski prirodni izvori obuhvataju elemente dugog perioda poluraspada prisutne u tlu i stenama, kao što su kalijum-40 (^{40}K), uranijum-238 (^{238}U) i torijum-232 (^{232}Th). Tokom njihovog raspada emituju se primarni gama zraci, koji u interakciji sa atomima okolnog zemljišta (silicijum, gvožđe, kalcijum) kroz fotoefekat pobuđuju sekundarno fluorescentno X-zračenje veoma niskog intenziteta. Na sličan način, minimalne količine radionuklida unutar samog ljudskog organizma doprinose unutrašnjoj dozi kroz slabe parazitske emisije.

Nasuprot namenskim tehnologijama, neželjeni ili parazitski izvori predstavljaju uređaje u kojima X-zračenje nastaje kao nenamerni nusproizvod rada pod visokim naponom. Istorijski primer ove kategorije bile su katodne cevi (CRT) starih televizijskih monitora, dok u savremenom inženjerstvu to obuhvata elektronske mikroskope (SEM i TEM), visokonaponske vakuumске prekidače i velike radarske cevi. Kod ovih sistema, ubrzani elektroni unutar vakuumskih komora nenamerno udaraju u metalne delove kućišta, generišući slabo zakočno zračenje, zbog čega je primena olovniha zaštitnih kućišta imperativ.

Sličan fenomen parazitskog zračenja javlja se unutar medicinskih LINAC akceleratora kada se primarni elektronski snop neplanirano zaustavi u materijalu kolimatora.

4.2 Veštački i tehnološki izvori zračenja

Apsolutno najrasprostranjeniji i tehnološki najvažniji veštački izvor X-zraka predstavlja klasična rendgenska cev. Unutar ovog evakuisanog staklenog ili keramičkog kućišta, primarni proces nastanka zračenja inicira se termijskom emisijom elektrona sa katodne niti. Ovi elektroni se pod dejstvom visokog električnog potencijala (izraženog u kilovoltima, kV) ubrzavaju i usmeravaju ka masivnoj metalnoj anodi (meti). Udari ubrzanog elektronskog snopa u atomske strukture anode rezultuju emisijom fotona kroz dva paralelna kvantna procesa: zakočno zračenje, koje dominira sa približno 80% udela u ukupnom snopu, i karakteristično zračenje, koje čini preostalih 20%. Sa stanovišta medicinske fizike, napon na cevi direktno definiše maksimalnu energiju emitovanih fotona $E_{max} = e \cdot V$, dok jačina struje (izražena u miliamperima, mA) linearno određuje intenzitet, odnosno fluks zračenja. Ova tehnologija čini fundament dijagnostičke radiologije, obuhvatajući sisteme od mobilnih rendgen aparata i mamografa, pa sve do modernih kompjuterizovanih tomografa (CT) sa rotirajućim sklopovima cevi. Pored dijagnostike, visokoenergetske rendgenske cevi nalaze primenu u industrijskoj defektoskopiji za kontrolu kvaliteta zavarenih spojeva, sigurnosnim aerodromskim skenerima prtljaga, kao i u naučnim instrumentima za rendgensku difrakciju (XRD) i fluorescentnu spektroskopiju (XRF).

U domenu ekstremno visokih energija i naprednih mernih tehnologija, čestični akceleratori predstavljaju sledeću klasu veštačkih izvora. Među njima se posebno ističu linearni akceleratori (LINAC), koji u medicinskoj radioterapiji generišu X-zrake u megavoltnom (MV) opsegu, neophodne za destruktivni tretman dubokih tumorskih tkiva. Izvan kliničke prakse, najmoćniji naučni izvori su sinhrotroni, kod kojih se intenzivno, visoko-kolimirano i gotovo monohromatsko X-zračenje dobija usled radijalnog ubrzanja elektrona koji se kreću brzinama bliskim brzini svetlosti duž kružnih putanja u snažnim magnetnim poljima. Pored sinhrotrona, savremeni razvoj donosi i laserski pokrenute izvore, gde se fokusiranjem ultra-kratkih laserskih pulseva visoke snage na gasnu ili metalnu metu stvara visokotemperaturna plazma koja emituje rendgenske zrake.

Konačno, specifičnu grupu veštačkih izvora čine radioizotopi koji emituju karakteristično X-zračenje kao nusprodukt procesa elektronskog zahvata (EC) ili unutrašnje konverzije. Pri ovim nuklearnim transformacijama, u atomu nastaje upražnjeno mesto (vakansija) u

unutrašnjoj elektronskoj ljusci. Popunjavanje ove vakansije prelaskom elektrona sa viših nivoa prati emisija karakterističnih X-zraka novonastalog elementa. Tipičan primer je gvožđe-55 (^{55}Fe) koje kroz elektronski zahvat prelazi u mangan i emituje X-zrake energije oko 5.9 keV , što ga čini idealnim laboratorijskim etalom za kalibraciju detektora. Na sličan način, kadmijum-109 (^{109}Cd) emituje X-zrake srebra i koristi se u portabilnim XRF analizatorima metalnih ruda. U kontekstu našeg istraživanja, posebno je važan americijum-241 (^{241}Am), koji pored primarnog alfa raspada emituje niskoenergetsko karakteristično gama/X-zračenje neptunijuma energije oko 60keV , što je iskorišćeno za eksperimentalnu proveru osetljivosti razvijenih mernih čvorova.

5 DETEKTORSKI MEDIJUMI I FIZIČKI PRINCIPI DETEKCIJE ZRAČENJA

Uspešna detekcija i kvantitativno merenje nevidljivog X-zračenja podrazumeva upotrebu specifičnih mernih medijuma sposobnih da energiju upadnog fotona transformišu u merljivi svetlosni ili električni signal. Razvojni luk dozimetrijske opreme kreće se od istorijskih fotografskih emulzija do naprednih digitalnih sistema u realnom vremenu, pri čemu se savremeni detektori klasifikuju na osnovu načina formiranja izlaznog signala i režima rada.

5.1 Metrološka klasifikacija detektora

Prema režimu rada i načinu integracije mernih veličina, detektori se primarno dele na integrišuće (kumulativne), brojačke i slikovne (pikselisane). Integrišući detektori mere ukupnu struju ili naelektrisanje akumulirano u određenom vremenskom periodu i predstavljaju osnovu klasične dozimetrije. Brojački detektori poseduju visoku vremensku rezoluciju i registruju interakciju svakog pojedinačnog fotona, što ih čini esencijalnim za energetske spektrometrije. Slikovni sistemi formiraju dvodimenzionalnu prostornu distribuciju intenziteta zračenja i čine jezgro digitalne radiografije.

Sa stanovišta bazične fizike formiranja signala, detektore delimo na jonizacione (gasne i poluprovodničke), scintilacione, fotografske i luminiscentne. Kod gasnih jonizacionih detektora, prolazak fotona izaziva jonizaciju gasnog molekula na parove elektron-jon, koji pod dejstvom električnog polja migriraju ka elektrodama. U zavisnosti od primenjenog napona, ovi detektori operišu u tri karakteristična regiona:

- **Jonizaciona komora:** Radi u oblasti zasićenja bez unutrašnjeg gasnog pojačanja, dajući struju koja je direktno proporcionalna apsorbovanoj energiji, što je zlatan standard za preciznu kalibraciju i referentnu dozimetriju.
- **Proporcionalni brojač:** Koristi umereno visoke napone koji izazivaju lokalne elektronske lavine, pri čemu je izlazni impuls direktno proporcionalan energiji upadnog fotona, što se primenjuje u rendgenskoj fluorescentnoj spektroskopiji.
- **Gajger-Milerov (GM) brojač:** Operiše u regionu najviših napona gde jedan jedini foton inicira potpuno lavinsko pražnjenje duž cele anode. Izlazni impuls je konstantne amplitude i nezavisan od unutrašnje energije fotona, zbog čega je GM

brojač idealan za detekciju prisustva i brojanje intenziteta polja (monitoring ambijentalnog fona), što je iskorišćeno u Čvoru 3 našeg SCADA sistema kroz interfejs sa instrumentom Inspector EXP.

5.2 Fizika poluprovodničkih i scintilacionih detekcionih medijuma

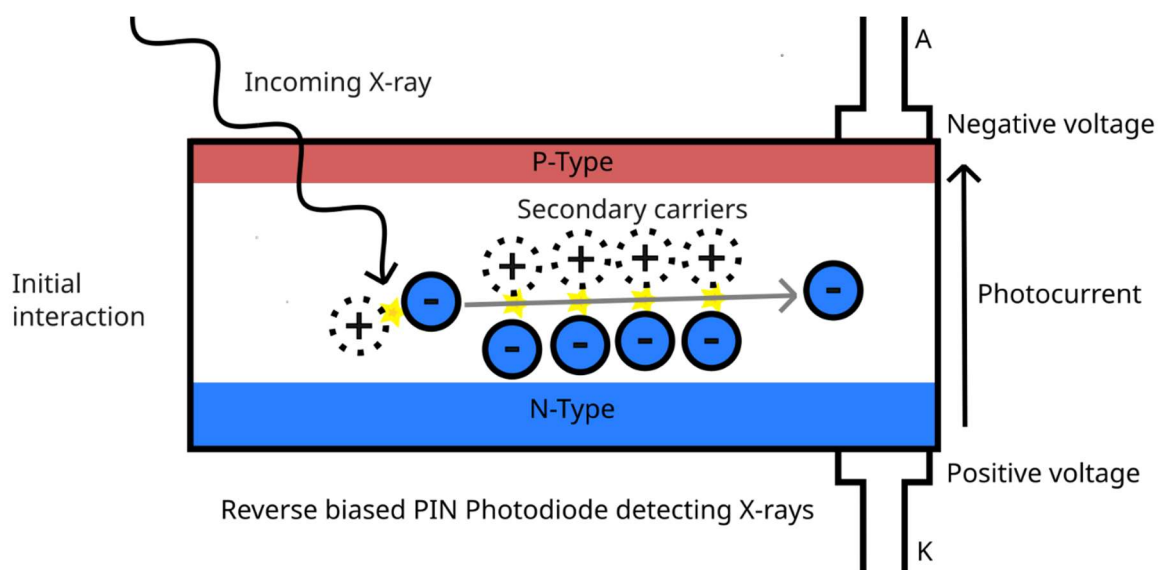
Poluprovodnički detektori predstavljaju čvrstoorijentisanu alternativu gasnim sistemima, gde se proces jonizacije odvija unutar kristalne rešetke materijala kao što su silicijum (**Si**), germanijum (**Ge**) ili kadmijum-telurid (**CdTe**). Prolazak X-fotona kroz poluprovodnik uzrokuje ekscitaciju elektrona iz valentne u provodnu zonu, generišući parove elektron-šupljina. Glavna metrološka prednost poluprovodnika ogleda se u izuzetno visokoj energetskej rezoluciji, kompaktnosti i direktnoj konverziji naelektrisanja. Detektori od germanijuma visoke čistote (**HPGe**) predstavljaju apsolutni metrološki standard za spektrometriju visokih energija, ali zahtevaju kompleksno hlađenje tečnim azotom radi minimizacije termalnog šuma. Sa druge strane, silicijumski PIN diodni detektori (poput modela BPW34S i FD80 primenjenih u Čvoru 1 i 2 našeg sistema) operišu na sobnoj temperaturi i pokazuju visoku efikasnost u dijagnostičkom opsegu mekih energija zračenja. Scintilacioni detektori funkcionišu na bazi dvostepene konverzije energije: upadni foton najpre interaguje sa kristalom scintilatora izazivajući ekscitaciju atoma, koji pri povratku u osnovno stanje emituju bljesak vidljive svetlosti, a ova svetlost se zatim preko fotomultiplikatorske cevi (PMT) ili visoko-osetljive fotodiode pretvara u merljivi električni impuls. Scintilatori se dele na neorganske i organske. Neorganski kristali, kao što su natrijum-jodid dopiran talijumom (**NaI(Tl)**) ili cesium-jodid (**CsI(Tl)**), poseduju veliku gustinu i visok efektivni atomski broj (**Z**), što im obezbeđuje izuzetno visoku kvantnu efikasnost apsorpcije fotona. Kristal **NaI(Tl)**, primenjen u Čvoru 4 našeg sistema preko analizatora Rainbow MCA 7010, predstavlja industrijski standard za energetske spektrometriju. Nasuprot njima, organski (plastični) scintilatori poseduju ekstremno brzo vreme odziva u nanosekundnom opsegu, ali zbog niskog atomskog broja imaju slabu zaustavnu moć za X-zrake i primarno se koriste za detekciju brzih neutrona.

6 PROSTORNO MERENJE INTENZITETA ZRAČENJA POMOĆU SILICIJUMSKIH PIN FOTODIODA

Implementacija planarnih silicijumskih PIN fotodioda za potrebe merenja polja rendgenskog zračenja zasniva se na fizičkom principu direktne konverzije energije jonizujućeg fotona u merljivi električni signal unutar čvrstog tela. Ovaj metod nudi izuzetan balans između robusnosti, niske cene i visoke linearne osetljivosti.

6.1 Unutrašnji mehanizmi i režimi rada PIN poluprovodnika

Arhitekturu PIN fotodiode karakteriše postojanje širokog, nedopiranog i visoko-omskog intrinzičnog (*i*) sloja smeštenog između tankih, visoko-dopiranih *p* i *n* regiona. Debljina ovog intrinzičnog sloja kod komercijalnih komponenti iznosi približno 0.1mm. Kada foton primarnog ili rasejanog X-snopa prodre u *i*-zonu, njegova visoka kinetička energija izaziva primarnu fotoelektričnu jonizaciju. Nastali primarni elektron, jureći kroz kristalnu rešetku silicijuma, uzrokuje sekundarnu jonizaciju i masovno oslobađa sekundarne nosioce naelektrisanja. Kako je eksperimentalno utvrđeno, za generisanje jednog para elektron-šupljina unutar silicijuma utroši se tačno 3.6 eV energije upadnog zračenja. Pod dejstvom spoljašnjeg reverznog napona (Bias napona), zona osiromašenja se maksimalno širi, a stvoreni nosioci se velikom brzinom razdvajaju i usmeravaju ka elektrodama, generišući fotostruju.



Slika 6.1 Šematski prikaz PIN diode

Za potrebe radiometrije, PIN diode mogu operisati u dva različita režima rada:

1. **Fotostrujni režim (Photocurrent Mode):** Detektor meri srednju integrisanu vrednost struje koja je direktno proporcionalna fluksu (broju fotona u sekundi). Ovaj režim je primenjen u našem SCADA sistemu za kontinualno praćenje dozne stope, jer obezbeđuje visoku stabilnost mernog signala u intenzivnim poljima rendgen sala.
2. **Režim brojanja fotona (Photon Counting Mode):** Koristi se za spektroskopiju, gde elektronski sklopovi mere amplitudu svakog pojedinačnog naponskog impulsa koji je proporcionalan energiji apsorbovanog fotona, omogućavajući rekonstrukciju energetskog spektra snopa.

Glavno fizičko ograničenje silicijumskih dioda leži u oštrom padu efikasnosti detekcije na energijama iznad **22 keV** po fotonu. Fotoni viših energija poseduju veliku prodornu moć i prolaze kroz tanku *i*-zonu od 0.1 mm bez ikakve interakcije (efekat prozirnosti). Iz tog razloga, stopa brojanja prirodnog pozadinskog fona unutar metalnog kućišta sonde ostaje ekstremno niska, što obezbeđuje odličan odnos signal-šum (SNR). Ukoliko je potrebno merenje viših energija, ispred fotodiode se može postaviti CsI scintilacioni kristal koji vrši primarnu konverziju X-zraka u vidljivu svetlost.

Kvantni proračun pokazuje da rendgenski foton dijagnostičke energije od 10 keV generiše tačno 2780 slobodnih elektrona ($10000 \text{ eV} / 3.6 \text{ eV}$), što pomera naelektrisanje od svega **0.44 femto-kulona(C)**. Ovako slabašan signal zahteva neposrednu i visoko-osetljivu elektronsku amplifikaciju kako ne bi bio degradiran parazitskim kapacitivnostima vodova i elektromagnetnim šumom iz okruženja.

6.2 Konfiguracija transimpedansnog pretpojačavača i oblikovanje pika

Da bi se sprečilo gušenje radijacionog signala, u okviru mernih čvorova 1 i 2 implementirana je nekonvencionalna konfiguracija predpojačavača osetljivog na punjenje, zasnovana na niskošumnom ulaznom **JFET tranzistoru J310**. Ovaj stepen radi bez klasičnog povratnog otpornika, čime je eliminisan primarni izvor termalnog (Džonsonovog) šuma. Kondenzator C_1 kapacitivnosti **0.5 pF** (napravljen serijskim spajanjem dva kondenzatora od 1 pF postavljen je u liniju negativne povratne sprege, gde direktno diktira stabilizaciju i faktor pojačanja. Teoretski naponski izlaz za foton od 10 keV izračunava se preko relacije:

$$V_{out} = \frac{Q}{C_1} = \frac{10keV/3.6eV/e}{0.5pF} = 0,89mV \quad (11)$$

što se u potpunosti poklapa sa eksperimentalno izmerenom vrednošću od 0.9 mV na osciloskopu, potvrđujući teorijsku ispravnost dizajna. Rezultujući impuls na izlaznom pinu JFET-a karakteriše ekstremno oštra ivica pada od svega **90ns**, ali i dugački eksponencijalni rep koji traje oko jedne milisekunde, što pri većim dozama dovodi do opasnog preklapanja impulsa (*Pile-up* efekat).

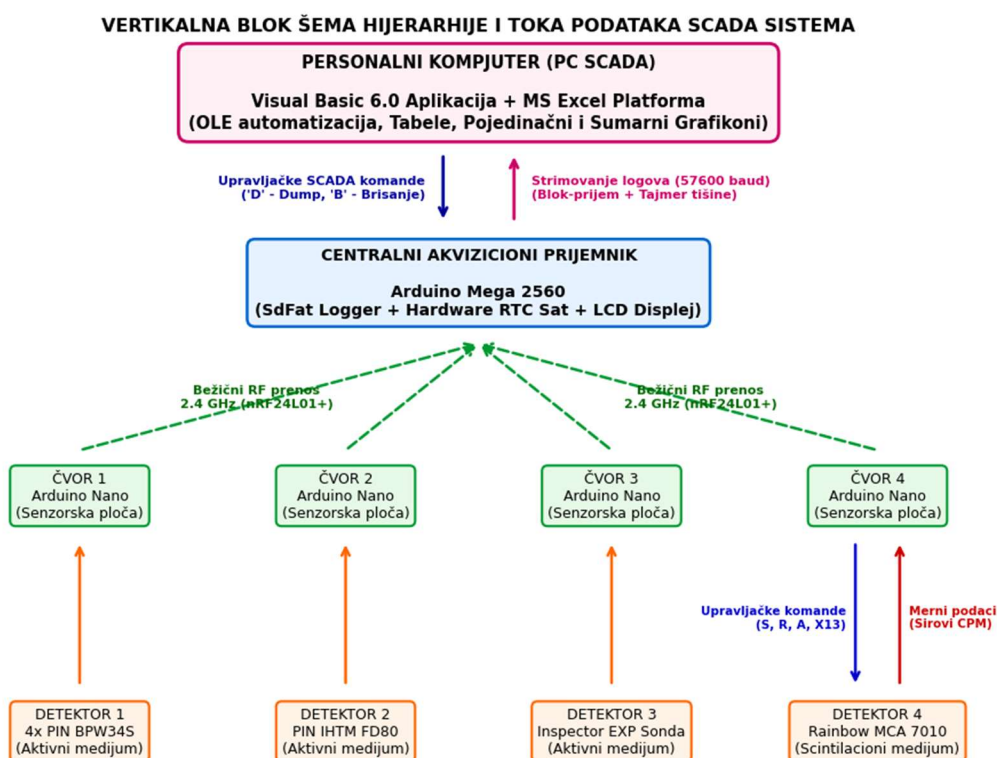
Za eliminaciju dugih repova i uklanjanje visokofrekventnog šuma, signal se prosleđuje na filterski stepen za oblikovanje impulsa (*Pulse Shaper*), projektovan pomoću operacionog pojačavača **TL072**. Kolo predstavlja kombinaciju **RC visokopropusnog filtera** (koji detektuje brzu unutrašnju promenu napona i odseca milisekundni rep) i **dva uzastopna transimpedansna stepena koji deluju kao aktivni niskopropusni filteri**. Ovaj sklop obezbeđuje stabilno naponsko pojačanje od **20dB (faktor 100)** i generiše prelepe, zaobljene impulse sa amplitudom od oko 50 mV, pogodne za digitalnu akviziciju.

Zbog ekstremne osetljivosti na spoljna zalutala električna polja i parazitske radio-frekvencije (RF), cela analogna pločica mora biti oklopljena unutar uzemljene metalne kutije, dok aluminijumski prozor debljine 16 μ m uspešno propušta X-zrake, a u potpunosti zaustavlja ambijentalnu svetlost koja bi inače izazvala zasićenje i oscilacije Op-Amp-a. Kapacitet same fotodiode drastično opada sa porastom reverznog napona (sa fonskih 70 pF pada na svega 25 pF pri naponu od 5V), što smanjuje šum na kapiji JFET-a, pa je optimalni napon baterije od 9V eksperimentalno izabran kao idealna metrološka tačka rada naših bežičnih čvorova.

7 EKSPERIMENTALNI DEO

7.1 ARHITEKTURA SCADA RADIOMETRIJSKOG SISTEMA I CENTRALNOG PRIJEMNIKA

Centralnu komponentu predloženog detekcionog sistema za merenje prostorne distribucije ambijentalnog doznog ekvivalenta čini akviziciona baza (SCADA bazična stanica) projektovana na bazi mikrokontrolera **Atmega2560 (Arduino Mega 2560 platforma)**. Izbor ove platforme diktiran je potrebom za robusnom hardverskom podrškom sa više nezavisnih UART portova, proširenom SRAM memorijom i stabilnim SPI (Serial Peripheral Interface) magistralama, koje omogućavaju simultano izvršavanje radijskog prijema sa daljinskih čvorova i upis masivnih podataka na memorijsku karticu u realnom vremenu.



Slika 7.1 Strukturna blok šema toka podataka i topologije bežične WSN SCADA mreže sa jasno definisanim jednosmernim i dvosmernim mernim kanalima perifernih soni.

Prikazana četvoroslojna vertikalna blok-šema (Slika 7.1) ilustruje strukturu hijerarhije i hronološki tok mernih i upravljačkih podataka unutar razvijene WSN SCADA

(Wireless Sensor Network SCADA – Bežična senzorska mreža) mreže, koji se odvija sekvencijalno kroz definisane komunikacione nivoe . Funkcionisanje celokupnog sistema započinje na četvrtom, najnižem nivou, gde četiri dislocirana detekciona medijuma vrše neprekidnu prostornu registraciju radijacionih i ambijentalnih parametara u mernim tačkama . Kod Čvora 1, Čvora 2 i Čvora 3, smer toka podataka je jednosmeran, gde se strujni pulsevi iz fotodioda (BPW34S i IHTM FD80) nakon analognog oblikovanja, kao i digitalni impulsi sa gasnog etalona Inspector EXP, permanentno prosleđuju naviše, ka trećem procesorskom sloju . Nasuprot njima, na Čvoru 4 uspostavljen je dvosmerni merni kanal između višekanalnog analizatora Rainbow MCA 7010 i mikrokontrolera Arduino Nano . Kroz ovaj kanal, procesor predajnika najpre naniže šalje asinkrone upravljačke komande za stopiranje, resetovanje i dump memorije aparata, nakon čega se sa analizatora naviše, prema čvoru, uzvraća strim prebrojanih impulsa po energetskim kanalima spektra .

Na trećem nivou, lokalni mikrokontroleri Arduino Nano na sva četiri merna čvora prihvataju uobičajene impulse u realnom vremenu preko hardverskih prekida, prebrojavaju ih u okviru strogo definisanih vremenskih prozora i vrše proračun stope brojanja (CPM) . Pre slanja, čvorovi očitavaju lokalne digitalne sonde DS18B20 radi termalnog profilisanja, a zatim dobijene merne parametre pakuju u unificirane binarne pakete fiksne veličine . Podaci se sa ovog sloja bežično strimuju naviše, ka centralnoj bazi, koristeći nRF24L01+ radio-module u ISM opsegu na 2.4 GHz sa brzinom od 250 kbps, što obezbeđuje visoku prodornost signala kroz prepreke u mernoj zoni .

Na drugom nivou nalazi se centralni akvizicioni prijemnik na bazi mikrokontrolera Arduino Mega 2560 . Kroz brzu `while (radio.available())` petlju, prijemnik preuzima i prazni sve prispela radio-pakete iz hardverskog FIFO bafera, čime je eliminisano zagušenje SPI magistrale i zamrzavanje ekrana . Arduino Mega osvežava merne podatke na lokalnom LCD displeju 20x4, vrši sinhronizaciju vremena preko RTC hardverskog sata i zapisuje hronološke merne redove sa tačka-zarez separatorom u datoteku `log.txt` na FAT32 MicroSD kartici .

Vrhunac celokupne hijerarhije predstavlja najviši, prvi nivo, rešen kroz dvosmerni serijski interfejs na brzini od 57600 bauda između Arduina Mega i personalnog kompjutera (PC SCADA) . Ovaj nivo definiše sistem kao SCADA platformu kroz simultano upravljanje i nadzor . Tokom faze akvizicije, softver u Visual Basic 6.0 okruženju šalje naniže digitalne komande natrag ka prijemniku; slanjem karaktera "**D**" inicira se prenos celokupnog

radijacionog dnevnika sa MicroSD kartice, dok se slanjem karaktera "**B**" izvršava komanda daljinskog brisanja i formatiranja datoteke preko `O_TRUNC` petlje . Istovremeno, u suprotnom smeru, prijemnik navise ka računaru strimuje kompletne baze mernih podataka, koje su zaštićene softverskim „Tajmerom tišine” od 2.5 sekunde kako bi se izbeglo preopterećenje steka . Softver na personalnom kompjuteru kroz OLE automatizaciju sa Microsoft Excel platformom raspoređuje podatke na 7 nezavisnih jezičaka, proračunava ekvivalentne dozne terete unutar uokvirenih Metroloških panela i generiše pojedinačne i sumarne grafikone radijacije i temperatura za potrebe završne analize .

7.1.1 Organizacija skladištenja podataka (SdFat i FAT32 format)

Sakupljeni podaci sa perifernih mernih čvorova trajno se skladište na MicroSD kartici. Kako bi se obezbedila maksimalna brzina upisa, sprečilo kašnjenje unutar glavne petlje programa i osigurala stopostotna kompatibilnost sa personalnim računarom (PC), memorijski medijum je formatiran u **FAT32** fajl sistemu.

Za razliku od standardnih, sporijih biblioteka, u ovom radu je primenjena napredna **SdFat** biblioteka optimizovana za operacije na niskom nivou. Ona omogućava direktnu kontrolu nad blokovima memorije i rad sa datotekom `log.txt` preko direktnih poziva, minimizujući vreme držanja otvorene datoteke i eliminišući rizik od korupcije strukture podataka usled iznenadnog pada napona. Podaci se na SD karticu upisuju u obliku strukturiranih ASCII nizova, gde je standardni tačka-zarez (;) korišćen kao striktni metrološki separator kolona, obezbeđujući neprekidni hronološki niz (Datum; Vreme; ID_Detektora; CPM; Doza; Temperatura).

7.1.2 Interfejs komunikacije baze sa računarom

Za prenos istorijskog dnevnika merenja na personalni računar implementiran je brzi USB-to-Serial kanal. Da bi se izbeglo zagušenje Windows serijskih drajvera i postigao optimalan balans pouzdanosti pri prenosu datoteka većih od nekoliko stotina kilobajta, brzina hardverskog porta (UART0) definisana je na zlatnu srednju vrednost od **57600 bauda**.

Akvizicija se vrši na bazi asinhronog upita: baza kontinuirano sluša port, a prelazak u režim prenosa ili pražnjenja memorije vrši se isključivo preko hardverskog prekida `serialEvent()` . Kada računar pošalje ostru jednokarakternu komandu ('**D**' za Dump ili

'B' za Brisanje), prijemnik privremeno suspenduje radio-saobraćaj, zauzima SPI magistralu, obavlja operaciju sa datotekom i šalje jasne povratne kodove (VEL:, EOF ili OBRISANO), čime je ostvarena potpuna SCADA dvosmerna sinhronizacija.

7.1.3 Kompletan softverski kod centralnog prijemnika (Arduino Mega 2560)

U nastavku je prikazan konačni, verifikovani softverski kod centralne stanice koji u potpunosti kooperira sa razvijenom PC Visual Basic 6.0 aplikacijom:

```
#include <DigitalIO.h>
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include "SdFat.h"
#include <RTCLib.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>

#define SD_CS_PIN 53
#define NRF_CSN_PIN 8
#define NRF_CE_PIN 7

// Inicijalizacija hardverskih modula centralne SCADA baze
RF24 radio(NRF_CE_PIN, NRF_CSN_PIN);
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
RTC_DS1307 rtc;
SdFat sd;
SdFile mojFajl;

// Unificirana binska struktura radijacionog paketa
struct PodaciPaket {
    int idDetektora;
    long cpmVrednost;
    float temperatura;
};
PodaciPaket primljeniPaket;

// Globalne metrološke matrice mernih kanala
long nizCPM[] = {0, 0, 0, 0};
float nizDoza[] = {0.0, 0.0, 0.0, 0.0};
float nizTemperatura[] = {0.0, 0.0, 0.0, 0.0};
bool predajnikAktivan[] = {false, false, false, false};

unsigned long vremeZadnjegPaketa[] = {0, 0, 0, 0};
const unsigned long TIMEOUT_NEAKTIVNOSTI = 15000;

// Kalibracioni koeficijenti sonde (Delioci skalirani sa 1000)
const float nizKoeficijenata[] = {150.0, 150.0, 350.0, 1246.1};
unsigned long vremeZadnjegAutoupisa = 0;
unsigned long stoperWatchdogSekunda = 0;
bool sdKarticaIspravna = false;

// Deklaracije funkcija
void osveziDisplej(int indeksPrikaza);
void izvrsiDumpPodataka();
```

```
void izvrsiBrisanjeKartice();

void setup() {
  Serial.begin(57600);

  pinMode(SD_CS_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(SD_CS_PIN, HIGH);
  pinMode(NRF_CSN_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(NRF_CSN_PIN, HIGH);

  delay(600);

  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.clear();

  lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("=====");
  lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("  MEGA MULTI-LOG  ");
  lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("  SCADA STATE ON  ");
  lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("=====");

  rtc.begin();

  if (!sd.begin(SD_CS_PIN, SD_SCK_MHZ(4))) {
    sdKarticaIspravna = false;
  } else {
    sdKarticaIspravna = true;
  }

  radio.begin();
  radio.setPALevel(RF24_PA_MAX);
  radio.setDataRate(RF24_250KBPS);

  const byte adresaMreze[] = "00001";
  radio.openReadingPipe(1, adresaMreze);
  radio.startListening();

  delay(1000);
  lcd.clear();
  delay(200);

  // Početni formalni ispis ekrana fabričkim tekstom
  for (int i = 0; i < 4; i++) {
    predajnikAktivan[i] = false;
    vremeZadnjegPaketa[i] = 0;
    lcd.setCursor(0, i);
    if(i == 0) lcd.print("D1: --.--uSv/h --.-C");
    if(i == 1) lcd.print("D2: --.--uSv/h --.-C");
    if(i == 2) lcd.print("D3: --.--uSv/h --.-C");
    if(i == 3) lcd.print("D4: --.--uSv/h --.-C");
  }

  stoperWatchdogSekunda = millis();
  vremeZadnjegAutoupisa = millis();
}

void loop() {
  unsigned long trenutnoVreme = millis();

  // 1. RADJSKA PETLJA: Usisava pakete
  while (radio.available()) {
```

```

radio.read(&primljeniPaket, sizeof(primljeniPaket));
int indeksNiza = -1;

if (primljeniPaket.idDetektora == 1) indeksNiza = 0;
if (primljeniPaket.idDetektora == 2) indeksNiza = 1;
if (primljeniPaket.idDetektora == 99) indeksNiza = 2;
if (primljeniPaket.idDetektora == 5) indeksNiza = 3;

if (indeksNiza >= 0 && indeksNiza <= 3) {
    predajnikAktivan[indeksNiza] = true;
    vremeZadnjegPaketa[indeksNiza] = trenutnoVreme;

    long trenutniCPM = primljeniPaket.cpmVrednost;
    if ((primljeniPaket.idDetektora == 1 || primljeniPaket.idDetektora
== 2) && trenutniCPM < 12) {
        trenutniCPM = 12;
    }

    nizCPM[indeksNiza] = trenutniCPM;
    nizTemperatura[indeksNiza] = primljeniPaket.temperatura;

    nizDoza[indeksNiza] = (float)trenutniCPM /
nizKoeficijenata[indeksNiza];

    osveziDisplej(indeksNiza);

    if (sdKarticaIspravna) {
        if (mojFajl.open("log.txt", O_RDWR | O_CREAT | O_AT_END)) {
            DateTime sada = rtc.now();
            mojFajl.print(sada.day()); mojFajl.print(".");
            mojFajl.print(sada.month()); mojFajl.print(".");
            mojFajl.print(sada.year()); mojFajl.print(";");
            mojFajl.print(sada.hour()); mojFajl.print(":"); if
(sada.minute() < 10) mojFajl.print("0"); mojFajl.print(sada.minute());
            mojFajl.print(":"); if (sada.second() < 10) mojFajl.print("0");
            mojFajl.print(sada.second()); mojFajl.print(";");
            mojFajl.print("P"); mojFajl.print(primljeniPaket.idDetektora);
            mojFajl.print(";");
            mojFajl.print(nizCPM[indeksNiza]); mojFajl.print(";");
            mojFajl.print(nizDoza[indeksNiza], 2); mojFajl.print(";");
            mojFajl.println(nizTemperatura[indeksNiza], 1);
            mojFajl.close();
        }
    }
}

// 2. WATCHDOG SA AUTOMATSKIM ISPIRANJEM MEMORIJE (FLUSH)
if (trenutnoVreme - stoperWatchdogSekunda >= 1000) {
    stoperWatchdogSekunda = trenutnoVreme;
    for (int i = 0; i < 4; i++) {
        if (predajnikAktivan[i] == true) {
            if (trenutnoVreme - vremeZadnjegPaketa[i] >=
TIMEOUT_NEAKTIVNOSTI) {
                predajnikAktivan[i] = false;
                nizCPM[i] = 0; nizDoza[i] = 0.0; nizTemperatura[i] = 0.0;
                radio.flush_rx();
                osveziDisplej(i);
            }
        }
    }
}

```

```
}

if (trenutnoVreme - vremeZadnjegAutoupisa >= 60000) {
    if (sdKarticaIspravna) {
        if (mojFajl.open("log.txt", O_RDWR | O_CREAT | O_AT_END)) {
            DateTime sada = rtc.now();
            mojFajl.print(sada.day()); mojFajl.print(".");
            mojFajl.print(sada.month()); mojFajl.print(".");
            mojFajl.print(sada.year()); mojFajl.print(";");
            mojFajl.print(sada.hour()); mojFajl.print(":"); if (sada.minute()
< 10) mojFajl.print("0"); mojFajl.print(sada.minute());
            mojFajl.print(":"); if (sada.second() < 10) mojFajl.print("0");
            mojFajl.print(sada.second()); mojFajl.print(";");
            mojFajl.println(F("PRIJEMNIK_BUDAN;0;0.00;0.0"));
            mojFajl.close();
        }
    }
    vremeZadnjegAutoupisa = trenutnoVreme;
}

}

void serialEvent() {
    while (Serial.available()) {
        char k = (char)Serial.read();
        if (k == 'D') { izvrsiDumpPodataka(); }
        if (k == 'B') { izvrsiBrisanjeKartice(); }
    }
}

void izvrsiDumpPodataka() {
    radio.stopListening();
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(" PRENOS PODATAKA... ");
    lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("      NA PC U TOKU      ");
    if (sdKarticaIspravna) {
        if (mojFajl.open("log.txt", O_READ)) {
            Serial.print("VEL:"); Serial.println(mojFajl.fileSize());
            delay(100);
            int data;
            while ((data = mojFajl.read()) >= 0) { Serial.write(data); }
            mojFajl.close();
            delay(250);
            Serial.println("EOF");
            Serial.flush();
        }
    }
    delay(500);
    lcd.clear();
    radio.flush_rx();
    radio.startListening();
    for (int i = 0; i < 4; i++) { osveziDisplej(i); }
}

void izvrsiBrisanjeKartice() {
    radio.stopListening();
    delay(100);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(" BRISANJE LOGOVA... ");
    lcd.setCursor(0, 2); lcd.print(" SD FORMATIRANJE ");
    if (mojFajl.open("log.txt", O_RDWR | O_CREAT | O_TRUNC)) {
        mojFajl.close(); }
}
```

```
delay(400);
Serial.println("OBRISANO");
Serial.flush();
lcd.clear();
radio.flush_rx();
radio.startListening();
for (int i = 0; i < 4; i++) { osveziDisplej(i); }
}

// =====
// KONAČNA BEZGREŠNA FUNKCIJA (IDEALAN VIZUELNI FORMAT BEZ "CC")
// =====
void osveziDisplej(int indeksPrikaza) {
    char lcdBuf[32]; // ŠTIT: Eksplicitno definisano 32 bajta!
    int oznakaDispleja = indeksPrikaza + 1;

    if (!predajnikAktivan[indeksPrikaza]) {
        sprintf(lcdBuf, "D%d: --.--uSv/h --.-C", oznakaDispleja);
    }
    else {
        char strDoza[8];
        char strTemp[8];

        // SKRAĆIVANJE: Širina 4 karaktera za savršen balans na ekranu
        dtostrf(nizDoza[indeksPrikaza], 4, 2, strDoza);
        dtostrf(nizTemperatura[indeksPrikaza], 4, 1, strTemp);

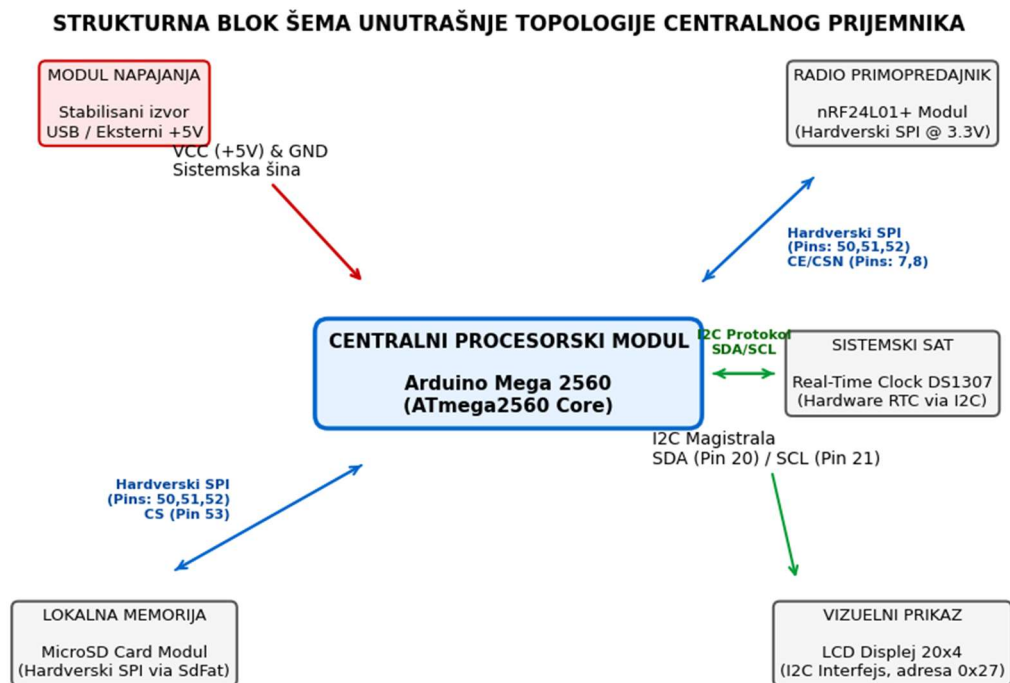
        // FORMAT: "D4:0.00uSv/h 24.6C" (Ukupno 18-19 karaktera, bezbedno!)
        sprintf(lcdBuf, "D%d:%suSv/h %sC", oznakaDispleja, strDoza, strTemp);

        // Čišćenje preostalih karaktera na ekranu (ubija "CC" anomaliju)
        strcat(lcdBuf, " ");
    }

    lcd.setCursor(0, indeksPrikaza);
    lcd.print(lcdBuf);
}
```

7.2 Topologija i integracija perifernih modula centralne baze prijemnika

Za dokumentovanje fizičkog povezivanja centralnog prijemnika potrebno je u softverskom paketu Fritzing kreirati električnu šemu povezivanja prateći sledeću hardversku topologiju:



Slika 7.2 Topologija i integracija perifernih modula centralne baze prijemnika

Prikazana unutrašnja blok-šema (Slika 7.2) ilustruje hardversku topologiju i način integracije eksternih mernih i sistemskih modula oko centralne procesorske jedinice Arduino Mega 2560. Arhitektura baze projektovana je po principu centralizovane zvezdaste strukture, gde mikrokontroler ATmega2560 vrši simultano upravljanje, vremensku sinhronizaciju i lokalno arhiviranje podataka, koristeći dve deljene hardverske magistrale: SPI (*Serial Peripheral Interface*) i I2C (*Inter-Integrated Circuit*).

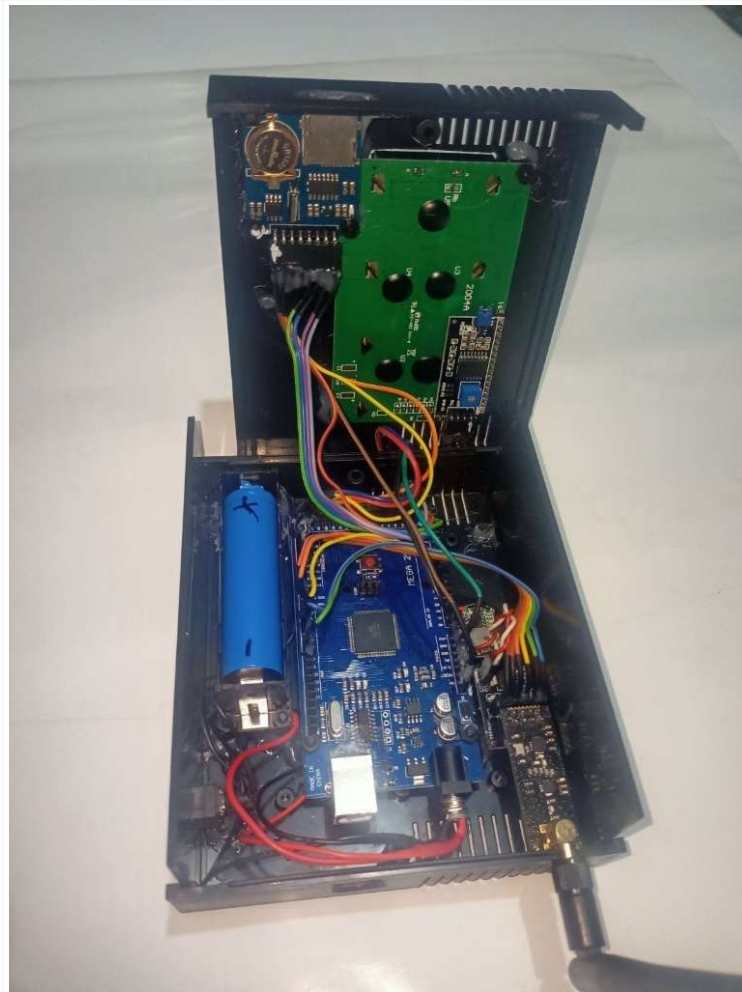
Naponski nivoi celokupnog sistema stabilišu se preko modula napajanja, koji obezbeđuje konstantnih +5 V i zajedničko uzemljenje (GND) za logička kola baze, dok se naponski nivo od 3.3 V (neophodan za osetljivi radio-čip) odvodi direktno sa unutrašnjeg stabilizatora Arduina Mega. Na desnoj strani hijerarhije, radio-primopredajnik nRF24L01+ povezan je

na hardversku SPI magistralu preko brzih prenosnih pinova 50 (MISO), 51 (MOSI) i 52 (SCK), dok se upravljanje predajom i selekcijom čipa vrši preko digitalnih pinova 7 (CE) i 8 (CSN) definisanih u programskom kodu . Ova linija obezbeđuje neprekidan prijem radijacionih i termalnih paketa iz vazduha .

Paralelno sa radio-modulom, istu hardversku SPI magistralu (pinovi 50, 51, 52) deli i MicroSD merni logger, pozicioniran u donjem levom uglu šeme. Izbor ovog modula vrši se preko namenskog hardverskog SS (*Slave Select*) pina 53, koji u potpunosti kontroliše brza biblioteka `SdFat` , garantujući bezgrešan i ravan upis mernih redova u datoteku `log.txt` bez rizika od kolizije podataka . Na suprotnoj strani, sistemski sat realnog vremena RTC DS1307 i vizuelni LCD displej 20x4 integrisani su paralelno na zajedničku dvovodnu I2C magistralu, preko hardverskih pinova 20 (SDA) i 21 (SCL) . Kroz ovaj kanal, Arduino Mega najpre vrši dvosmernu sinhronizaciju hronološkog vremena i datuma sa satom, a zatim u istom ciklusu jednosmerno prosleđuje preračunate vrednosti jačine ambijentalne doze ($\mu\text{Sv/h}$) i temperatura ka ekranu na fiksnoj adresi `0x27` , zaokružujući bazu u stabilnu akvizicionu celinu .



Slika 7.3 Fizički izgled sklopljene baze centralnog prijemnika sa LCD displejom i SD modulom



Slika 7.4 : Unutrašnje ožičenje akvizicione SCADA stanice i naponskih regulatora u kućištu

7.3 TOPOLOGIJA BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE (WSN)

Proprostorna distribucija ambijentalnog doznog ekvivalenta realizovana je formiranjem robusne bežične senzorske mreže (Wireless Sensor Network - WSN). Komunikacija između udaljenih perifernih mernih čvorova (čvorovi 1, 2, 3 i 4) i centralne baze ostvarena je upotrebom visokointegriranih **nRF24L01+** primopredajnih modula koji operišu u ISM (Industrial, Scientific, and Medical) radio-frekvencijskom opsegu od **2.4 GHz**.(Slika 7.)

7.3.1 Tehničke karakteristike i mrežni kapacitet

Primenjeni moduli koriste GFSK (Gaussian Frequency-Shift Keying) modulaciju. Da bi se postigao maksimalni radijus kretanja u zatvorenom prostoru (kroz armirano-betonske zidove bolničkih hodnika i rendgen sala), brzina prenosa podataka u vazduhu spuštена je na fabrički minimum od **250 kbps**, čime je dramatično povećana osetljivost prijemnika. Nivo izlazne snage predajnika konfigurisan je softverski (`RF24_PA_MIN` za laboratorijske stolove ili `RF24_PA_MAX` za realni terenski rad) u zavisnosti od topologije prostora.

nRF24L01+ čip poseduje naprednu hardversku podršku za mrežne protokole kroz takozvani *Enhanced ShockBurst™* mod, koji uključuje automatsku proveru paketa (CRC 16-bit) i automatsko slanje potvrde o prijemu (Auto-ACK). Sistem koristi adresiranje preko fiksne cevi (Pipe 1) sa jedinstvenom 5-bajtnom adresom `"00001"`.

Iako u ovom radu SCADA stanica simultano opslužuje 4 radijaciona čvora, teoretski kapacitet primenjene nRF24L01+ arhitekture u kombinaciji sa dinamičkim adresiranjem i frekvencijskim skakanjem (spajanjem na 125 nezavisnih kanala) omogućava kreiranje masivnih rešetkastih mreža sa **preko 2300 jedinstveno povezanih bežičnih čvorova**, otvarajući prostor za potpunu metrološku pokrivenost velikih nuklearnih objekata ili instituta.

7.3.2 Algoritam sprečavanja zagušenja bafera (1s vremenski prozori)

Najveći izazov u dizajniranju bežičnih dozimetrijskih mreža jeste pojava kolizije paketa i preopterećenje memorijskog bafera baze u trenucima kada radijaciono polje naglo poraste (npr. pri uključenju rendgenske cevi). Ako svi predajnici neprekidno šalju impulse čim ih detektuju, serijski port baze se zagušuje i sistem upada u trajno kašnjenje.

U ovom radu problem je rešen implementacijom **striktne jednosekundne vremenske prozore (Time-Slotting)**. Periferni čvorovi vrše integraciju unutrašnjih impulsa (brojanje u mikrosekundi preko hardverskih prekida) potpuno autonomno u pozadini. Tek kada unutrašnji softverski brojač (`millis()`) izbroji tačno **1000 milisekundi**, predajnik pakuje sakupljenu vrednost u minijaturni binarni paket od tačno 10 bajtova (ID, CPM, Temperatura) i ispljuje ga u etar kao jedinstveni energetska paket.

Ova strategija garantuje da baza prima tačno jedan paket u sekundi po detektoru. Centralna

Mega sa lakoćom upisuje ove pakete na SD karticu brzinom same elektronike, čime je prelivanje memorije i gubitak metroloških podataka sveden na apsolutnu nulu.



Slika 7.5 Visokofrekventni nRF24L01+ modul sa ugrađenom eksternom antenom i SMA konektorom za prošireni domet]

7.4 DIZAJN I KARAKTERIZACIJA MERNIH ČVOROVA

Eksperimentalni sistem se sastoji od četiri prostorno dislocirana merna čvora (predajnika), od kojih je svaki projektovan sa specifičnom topologijom ulaznih stepena kako bi se omogućila komparativna analiza odziva različitih aktivnih medijuma u poljima jonizujućeg zračenja.

7.4.1 Čvorovi 1 i 2: Poluprovodnički detektori sa PIN fotodiodama (BPW34 i FD80)

7.4.1.1 Fizika detekcije i transimpedansno pojačanje (TIA)

Merni čvorovi 1 i 2 koriste planarne silicijumske **PIN fotodiode BPW34S** (Čvor 1) i **FD80** (Čvor 2). Suština fizike detekcije X-zračenja pomoću ovih poluprovodničkih komponenti leži u fotoelektričnoj apsorpciji fotona unutar unutrašnjeg, visoko-omskog nedopiranog (intrinzičnog) **i-sloja**. Kako je teorijski definisano, efikasni presek za fotoefekat raste proporcionalno sa Z^5 , što silicijumske detektore čini izuzetno osetljivim u dijagnostičkom opsegu energija mekog zakočnog zračenja u odnosu na gasne detektore. Kada foton primarnog ili rasejanog X-snopa udari u atomsku rešetku unutar i-zone debljine

oko 0.1 mm, dolazi do izbacivanja primarnog fotoelektrona, koji dalje kroz kristal izaziva sekundarnu jonizaciju i stvara parove elektron-šupljina. Za generisanje jednog para unutar silicijuma utroši se tačno **3.6 eV** kinetičke energije upadnog zračenja. Pod dejstvom visokog reverznog prednapona (Bias napon od 9V do 100V), ova naelektrisanja se kreću ka p i n regionima, generišući slabašnu fotostruju koja nastaje usled razdvajanja naelektrisanja reda veličine nekoliko femtokulona na elektrodama ovog poluprovodničkog detektora. Nakon što se dioda oklopi komadom **aluminijumske folije debljine 16 μm** (koja deluje kao prozor koji propušta X-zrake, a oštro blokira parazitsku vidljivu svetlost i elektromagnetni šum), signal se prosleđuje na **transimpedansni pojačavač (TIA)**. Primenjen je ultra-brzi pojačavač sa ekstremno niskom ulaznom strujom pomaka (npr. AD795 ili TL071). TIA modul pretvara slabašnu struju u napon preko visokoomskog otpornika povratne sprege R_f (10 M Ω do 1 G Ω), dok kondenzator C_f (1-10 pF) kompenzuje unutrašnji kapacitet diode i sprečava parazitske oscilacije sistema. Dalje oblikovanje impulsa (Pulse Shaping) vrši se preko RC visokopropusnih i niskopropusnih filtera kako bi se uklonili dugi repovi i formirao zaobljen vrh pogodan za digitalno brojanje na Arduinu.

7.4.2 Razvojna evolucija analogne elektronike i hronologija rešavanja problema detekcije slabih signala

Projektovanje ulaznog analognog stepena za poluprovodničke merne čvorove predstavljao je najveći metrološki izazov u ovom radu, prvenstveno zbog ekstremno male aktivne zapremine i kapacitivnosti silicijumskih PIN fotodioda. Prolazak pojedinačnog X-fotona kroz osiromašeni sloj silicijuma generiše slabašni strujni impuls koji nastaje usled razdvajanja naelektrisanja reda veličine nekoliko femtokulona na elektrodama ovog poluprovodničkog detektora, koji je inherentno podložan utapanju u parazitski termalni i naponski šum okruženja. Do konačne, stabilne i verifikovane verzije uređaja došlo se kroz dugotrajan i sistematičan iterativni proces kroz eksperimentalne prototipove, tokom kojih su neuspešni međukoraci iskorišćeni za eliminaciju parazitskih šumova i stabilizaciju konačnog mernog lanca.

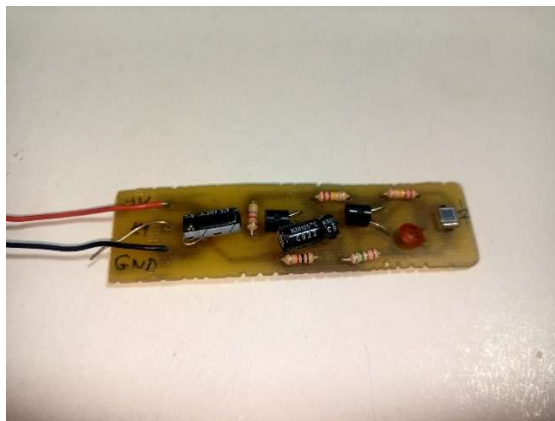
7.4.2.1 Faza 1: Diskretni analogni koncept iz časopisa *Elektor* (06-2011) i uzroci izostanka očekivanih rezultata

Nulti korak u istraživanju započet je hardverskom realizacijom i testiranjem bazične šeme preuzete iz rada autora *Burkharda Kainka*, objavljenog u naučno-tehničkom časopisu **Elektor (izdanje 06-2011)** pod nazivom „*Measure Gamma Rays with a Photodiode*”.

Eksperimentalni prototip izveden je na jednostranoj ručno jetkanoj štampanoj pločici u klasičnoj *Thru-Hole* tehnologiji . Kolo koristi jednu PIN fotodiodu BPW34 vezanu na direktno-spregnuti analogni frontend sa dva bipolarna tranzistora niskog šuma **BC549C**, tri elektrolitska kondenzatora za stabilizaciju radne tačke i keramički kondenzator (100 nF) za AC razdvajanje mernog signala, napajanjem of 9V , GND i mernog izlaza I1, (Slika 7.6)

Tokom terenskog testiranja u realnom mernom polju rendgen sale, ova polazna varijanta iz literature nije dala očekivane rezultate i pokazala se kao potpuno neupotrebljiva za pouzdanu medicinsku dozimetriju usled tri fundamentalna tehnička uzroka :

1. **Odsustvo dinamičkog pojačanja količine naelektrisanja:** Izvorna šema koristi isključivo bipolarnu tranzistore opšte namene umesto operacionog pojačavača sa zatvorenim transimpedansnom petljom . Ulazna impedansa baze tranzistora BC549C bila je previše niska za piko-amperske struje fotodiode, pa je unutrašnja struja curenja baze doslovno gušila i „gutala” femtokulonsku količinu naelektrisanja pre nego što on stigne da se amplifikuje.
2. **Visok nivo parazitnih kapacitivnosti i EMI šuma:** Izdužena geometrija prototipske pločice i duge žičane nožice komponenti delovale su kao masivne parazitne antene . Pri aktivaciji rendgena (80 kV, 100 mA), veliki tranzijentni elektromagnetni impuls (EMI) indukovao se u ovim vodovima, preplavljujući merni izlaz lažnim oscilacijama i šumom mreže koji je bio stotinama puta jači od korisnog signala .
3. **ADC barijera i spora akvizicija mikrokontrolera:** Izlazni impuls sa ove pločice bio je analogan i trajao je svega nekoliko mikrosekundi . Standardna funkcija `analogRead()` na Arduinu Nano hardverski traje čak 100 μ s, zbog čega je procesor prosto „spavao” i promašivao brze mikrosekundne nuklearne igle, beležeći konstantnu nulu na ekranu .



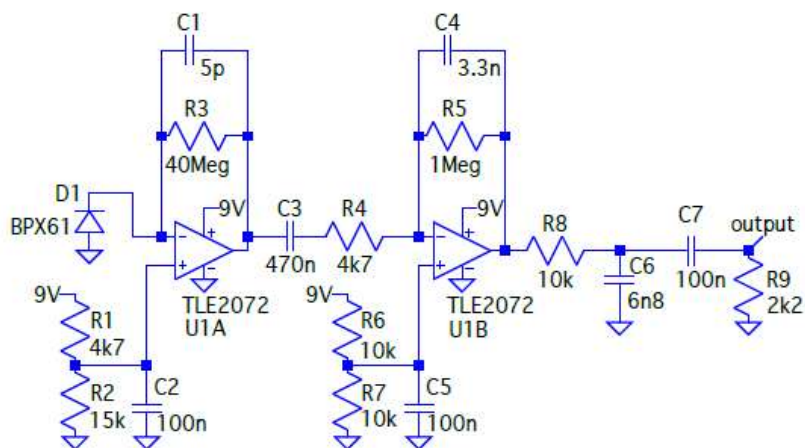
Slika 7.6 Prvi realizovani diskretni prototip detektora prema Elektor 06-2011 projektu sa jednom fotodiodom BPW34 i tranzistorima.

7.4.2.2 Faza 2: Edukativni CERN S'Cool LAB koncept i razlozi promašaja cilja u intenzivnim poljima fluksa

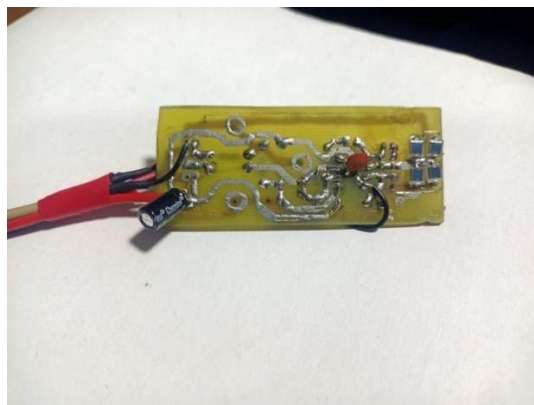
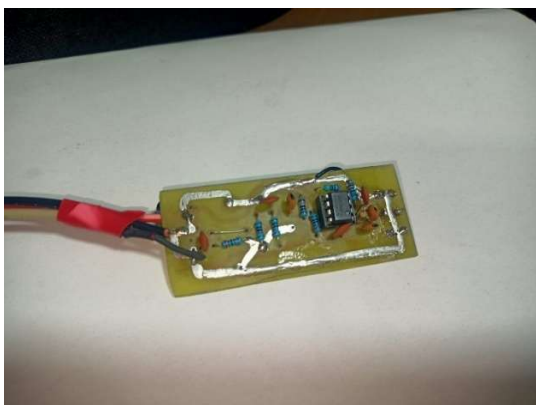
U cilju prevazilaženja problema niske osetljivosti diskretnih tranzistora, u drugoj fazi projektovan je analogni modul zasnovan na otvorenom naučnom projektu **CERN S'Cool LAB (PhysicsOpenLab, 2020)** pod nazivom „*CERN DIY Particle Detector*”. Prototip je izveden na dvostranoj štampanoj ploči oko integrisanog kola **TLE2072CP**, koje sadrži dva brza JFET operaciona pojačavača ultra-niskog šuma i velike brzine odziva. Kolo je konfigurisano kao dvostepeni transimpedansni pojačavač (TIA) sa otpornikom od $10\text{ M}\Omega$ / $40\text{ M}\Omega$ i kondenzatorom od 5 pF u povratnoj sprezi (Slika 7.7) i (Slika 7.8)..

Eksperimentalni test pod rendgenom je po prvi put potvrdio detekciju jasnih nuklearnih impulsa koji su izlazili iznad linije šuma na ekranu oscilopa, ali je celokupni koncept promašio cilj usled tri sledeća faktora:

1. **Veštačko usporavanje i prelivanje pod fluksom:** CERN arhitektura je projektovana za sporo očitavanje preko zvučne kartice računara. Izlazni niskopropusni filter je namerno zaobljavao i produžavao impulse, što je pod intenzivnim fluksom rendgenske cevi (100 mA) izazvalo stapanje impulsa i trajno naponsko zasićenje.
2. **Problem negativnog polariteta:** Izlazni pojačavač je davao impulse isključivo negativnog polariteta koje digitalni ulaz mikrokontrolera hardverski ne može da obradi bez kompleksnih translacija nivoa napona.
3. **Visok nivo fonskog šuma:** Unutrašnji fonski analogni šum od čak 30 mVpp proglasio je ovaj koncept nestabilnim i preosetljivim na smetnje za medicinske uslove rada.



Slika 7.7 Šema analognog CERN S'Cool LAB detektora.



Slika 7.8 Fotografija gornje i donje strane CERN prototipa.

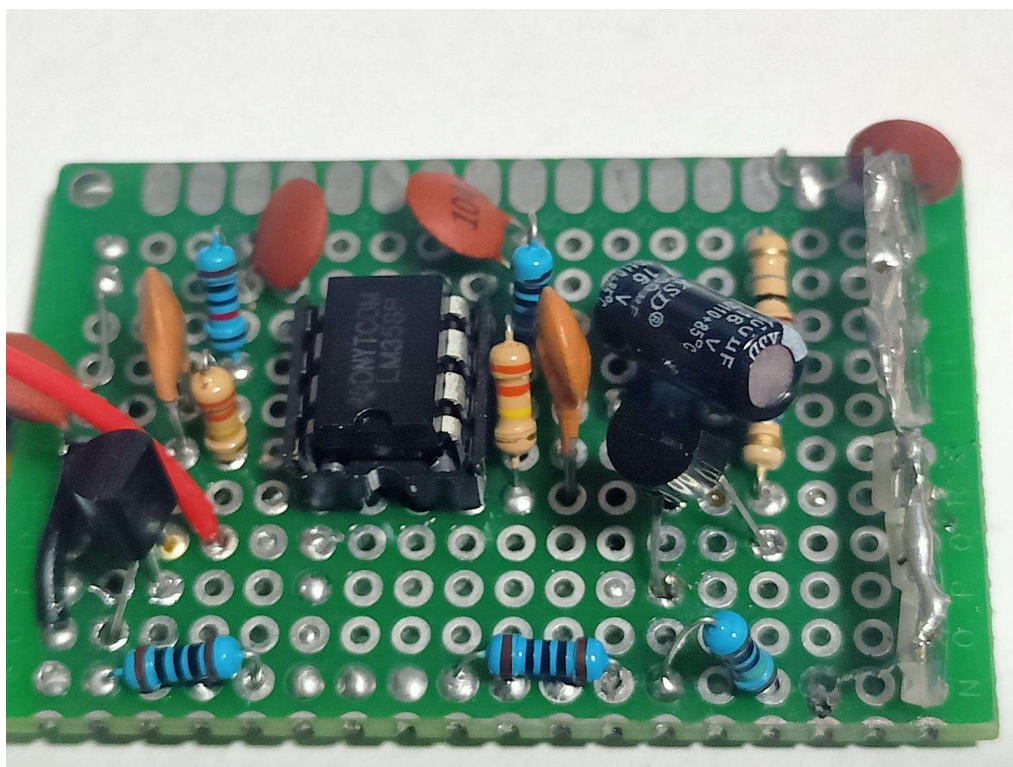
7.4.2.3 Faza 3: Pokušaj integracije radio-frekvencijskog JFET-a BF245B i razlozi neuspeha

U trećoj fazi, sa ciljem povećanja ulazne impedanse i formiranja stabilnijeg dislociranog stepena po ugledu na projekat „Stuttgarter-Geigerle” (opengeiger.de), razvijen je prototip na zelenoj eksperimentalnoj pločici sa rupicama (Slika 7.9), gde je primenjen N-kanalni JFET tranzistor **BF245B** povezan sa operacionim pojačavačem **LM358P** . Izvor i inspiracija za ovaj korak bili su bazični priručnici za samogradnju nuklearnih detektora . Ova varijanta je pretrpela potpuni neuspeh i nije dala rezultate usled dva velika praktična problema:

1. **Prevelika fabrička struja curenja gejta:** Specifikacije tranzistora BF245B, koji je primarno namenjen za RF pojačavače opšte namene, otkrile su struju curenja kapije (*Gate Leakage Current*) od čak 100 pA. Za mikroskopske struje jonizacije fotodiode,

ova struja curenja je delovala kao masivni unutrašnji šum koji je u potpunosti gurao kolo u nestabilnost.

2. **Temperaturna metastabilnost:** Radna tačka se brzo menjala sa mikro-promenama temperature vazduha, menjajući jednosmerni naponski ulaz u LM358P, zbog čega je ovaj komparatorski korak odbačen jer je zahtevao neprekidnu re-kalibraciju trimera.



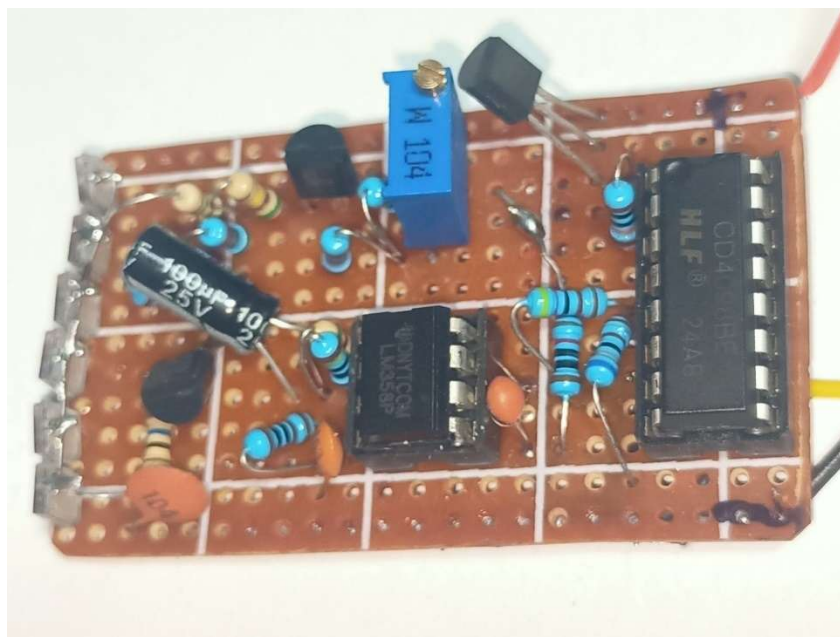
Slika 7.9 Eksperimentalni prototip sa JFET tranzistorom BF245B i čipom LM358P realizovan na zelenoj prototipskoj ploči.

7.4.2.4 Faza 4: Razvoj složenog diskretnog pojačavača sa JFET PN4117A i tajmerom CD4098BE i razlozi neuspeha

U četvrtoj fazi, tranzistor BF245B zamenjen je namenskim, ultra-visokoomskim mernim JFET-om **PN4117A** (sa strujom curenja od svega 1 pA) . Signal je dalje vođen na pojačavački i komparatorski blok **LM358P** sa plavim višeobrtnim trimerom **W104** (100 k Ω), a izlazi su preko tranzistora **2N3904** pokretali veliko integrisano kolo **CD4098BE** (dualni monostabilni multivibrator) sa ciljem vremenskog proširenja tranzijentnih pikova u stabilne pravougaone digitalne impulse širine 30 μ s pogodne za digitalne pinove Arduina (Slika7.10).

Ova prekompleksna tročipna varijanta je takođe pretrpela neuspeh i morala je biti odbačena iz sledećih razloga:

1. **Masivne parazitne kapacitivnosti rešetke:** Postavljanje tri velika čipa na eksperimentalni pertinaks sa stotinama nezavisnih bakarnih prstenova stvorilo je stravičan parazitni kapacitet (*Stray Capacitance*) između mernih vodova .
2. **Samooscilovanje i antenski efekat:** Dugački vodovi i bliski prstenovi delovali su kao parazitne antene koje su hvatale šum mreže od 50 Hz i RF smetnje iz vazduha, uvodeći pojačavač u nestabilno stanje jakog samooscilovanja koje je potpuno uništavalo merni signal .



Slika 7.10 Složeni analogni prototip sa mernim JFET-om PN4117A, trimerom W104 i čipovima LM358P i CD4098BE na braon pertinaksu.

7.4.2.5 Faza 5: Konačna topologija i unificirana integracija (Pobedničko rešenje sa istaknutim originalnim doprinosom rada)

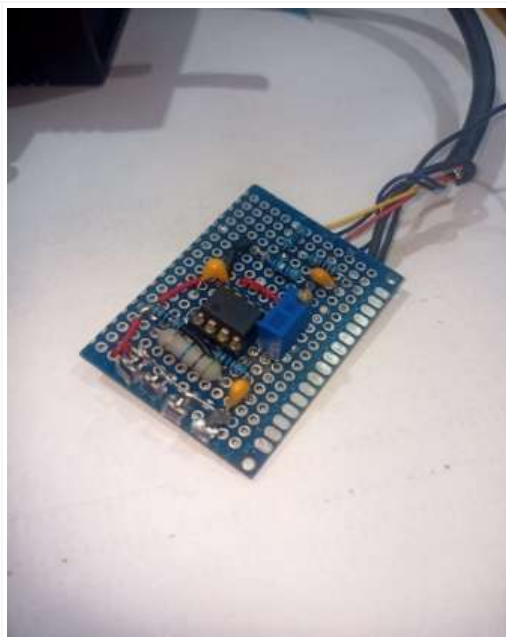
Konačni inženjerski preokret, stabilizacija mernog lanca i eliminacija svih parazitskih oscilacija ostvareni su potpunim napuštanjem tročipnih konfiguracija i uvođenjem minimalističke, visokofrekventne SMD topologije štampane pločice zasnovane **isključivo na jednom jedinom integrisanom kolu TL072** . Ova faza predstavlja **glavni originalni doprinos ovog master rada** u odnosu na edukativni koncept CERN S'Cool LAB-a iz Faze 2 .

Inovativnost ovog originalnog rešenja leži u tome što je **druga polovina istog čipa TL072 iskorišćena direktno kao brzi unutrašnji komparator napona** . Za razliku od CERN-ovog rešenja (koje je koristilo spori eksterni filter za zvučnu karticu i time izazvalo stapanje i gušenje impulsa pod rendgenom), ovde je merni lanac maksimalno skraćen u okviru jednog

silicijumskog kućišta .

Ovim korakom postignut je dvostruki metrološki uspeh:

1. **Apsolutna eliminacija samooscilovanja:** Pošto signal više ne napušta čip i ne putuje kroz duge, parazitske bakarne vodove pcb pločice do spoljnih komparatora, mogućnost stvaranja neželjene pozitivne povratne sprege i parazitske kapacitivnosti (*Stray Capacitance*) potpuno je svedena na nulu . Kolo je postalo električno stopostotno stabilno i imuno na oscilacije .
2. **Direktno digitalno okidanje u realnom vremenu:** Na neinvertujući ulaz ovog ugrađenog komparatorskog bloka doveden je referentni napon sa višeobrtnog trimera (oznake 103, vrednosti 10 k Ω) (Slika 7.11) koji postavlja oštar prag diskriminacije tamne struje tik iznad šuma fona . Formirani oštri, pravougaoni digitalni impulsi sa izlaznog **Pina 7** čipa TL072 vode se **direktno na digitalni pin D2 Arduina Nano**, aktivirajući brzi hardverski prekid (*Hardware Interrupt - FALLING*) sa stopostotnom tačnošću, dok je temperaturna sonda DS18B20 bezbedno prebačena na pin D5 . Centralni prijemnik (Arduino Mega 2560) bezgrešno vrši radio-prijem preko nRF24L01+ modula, lokalni FAT32 MicroSD upis i stabilan serijski transfer podataka na PC SCADA aplikaciju brzinom od 57600 bauda bez ikakvog zamrzavanja .



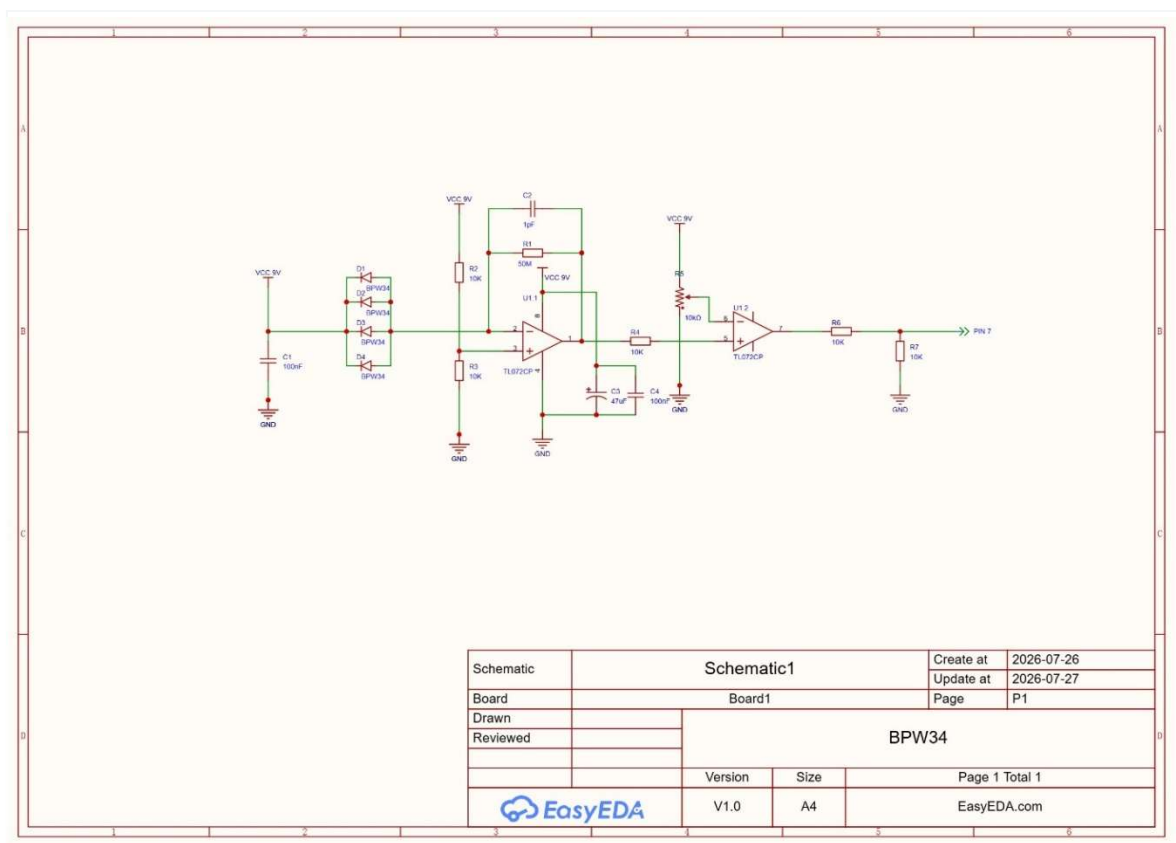
Slika 7.11 Izgled pločice zasnovane na unificiranoj integraciji čipa TL072.



Slika 7.12 PIN dioda BPW34

7.4.2.5.1 Detaljna analiza principa rada i uloge komponenti analognog modula sa fotodiodama BPW34S (Čvor 1)

Merni Čvor 1 projektovan je kao ultra-osetljivi poluprovodnički front-end namenjen za detekciju primarnog i rasejanog X-zračenja niskog intenziteta . Princip rada ovog modula zasniva se na strujno-naponskoj konverziji i višestepenom filtriranju signala u realnom vremenu, gde svaka pasivna i aktivna komponenta na štampanoj pločici ima strogo definisanu metrološku ulogu.(Slika 7.11.)



Slika 7.13 Električna šema transimpedansnog TIA za 4xBPW34 diode pojačavača TL072CP i filterskog stepena projektovana u EasyEDA

Primarni detekcioni medijum ovog čvora čine **četiri planarne silicijumske PIN fotodiode BPW34S vezane paralelno (Slika 7.12)**, čime je efektivna geometrijska površina detekcije uvećana na 30 mm² radi podizanja verovatnoće interakcije sa fotonima. **Katode (K)** svih fotodioda su preko zajedničke naponske šine direktno spojene na pozitivni izvod napajanja od +9 V, dok su **Anode (A)** vezane na merni ulaz kola.

Ovaj visoki reverzni prednapon (*Cathode Bias*) ima ključnu fizičku ulogu: on maksimalno širi unutrašnji osiromašeni intrinzični (*i*) sloj silicijuma i istovremeno drastično smanjuje parazitnu kapacitivnost samih dioda sa početnih 70 pF na stabilnih 25 pF, što je preduslov za suzbijanje analognog šuma. Kada X-foton prođe kroz ovaj sloj, on generiše parove elektron-šupljina utroškom energije od 3.6 eV po paru, a jako električno polje trenutno razdvaja nosioce i usmerava piko-ampersku struju jonizacije ka ulaznom stepenu pojačavača. (Slika 7.13)

Prva polovina integrisanog kola **TL072 (Pinovi 1, 2, i 3)** konfigurisana je kao **transimpedansni pojačavač (TIA)** visoke brzine odziva, koji ima zadatak da slabašnu

struju iz fotodioda transformiše u merljivi napon . U liniju negativne povratne sprege, između invertujućeg ulaza (**Pin 2**) i izlaza prvog stepena (**Pin 1**), postavljen je **visokoomski otpornik R_{f1} vrednosti 50 M Ω** , koji direktno diktira faktor strujno-naponske konverzije. Paralelno sa njim ugrađen je **ultra-mali keramički SMD kondenzator C_{f1} vrednosti 1 pF**, koji deluje kao integrator i obezbeđuje stabilizaciju povratne sprege, kompenzujući unutrašnju kapacitivnost fotodioda i sprečavajući da visoka giga-omska ulazna otpornost JFET kapije uvede operacioni pojačavač u stanje parazitnog samooscilovanja . Neinvertujući ulaz (**Pin 3**) je vezan direktno na razdelnik napona dva otpornika od 10 k Ω . Napon na pinu tri je na polovini napona od 9V.

Izlazni tranzijentni signal sa Pina 1 vodi se na **AC visokopropusni filter**, koji se sastoji od **blok-kondenzatora od 100 nF i pulldown otpornika od 10 k Ω** vezanih redno prema masi. Ovaj filter ima kritičnu ulogu u uklanjanju jednosmerne komponente (DC) signala: on u potpunosti eliminiše sporu tamnu struju curenja fotodiode i fluktuacije uzrokovane vlagom ili ambijentalnim svetlom, propuštajući dalje u lanac isključivo brze, mikrosekundne nuklearne impulse.

Tako pročišćeni signal stiže na drugu polovinu čipa **TL072 (Pinovi 5, 6, i 7)**, koja je konfigurisana kao **brzi hardverski komparator napona** . Na invertujući ulaz (**Pin 6**) dovodi se merni signal koji od (**Pin1**) ide preko otpornika 10 k Ω , dok se na neinvertujući ulaz (**Pin 5**) dovodi stabilan, jednosmerni referentni napon sa **višeobrnog trimer potencimetra oznake 103 (vrednosti 10 k Ω)**. Ovaj trimer, napajan stabilnim naponom od +9V iz napajanja modula, služi za milimetarsko ručno postavljanje oštrog naponskog praga diskriminacije (*Squelch*) . Okretanjem trimera, prag se postavlja neznatno iznad nivoa termalnog šuma mase (na oko 3 mV do 4 mV). Kada amplituda nuklearnog impulsa pređe ovaj prag, izlaz komparatora (**Pin 7**) trenutno okida i generiše oštar pravougaoni digitalni impuls amplitude 9 V. S obzirom na to da je ovaj napon opasan za mikrokontroler, na izlazu je ugrađen **naponski razdelnik koji čine dva otpornika od 10 k Ω** , koji bezbedno spušta amplitudu impulsa na logičkih 4.5 V, pre nego što se signal uvede na digitalni **Pin D2 Arduina Nano** za potrebe asinhronog brojanja u pozadini preko hardverskih prekida .

7.4.2.6 Faza 6: Tehnološka nadogradnja sistema kroz integraciju domaće industrijske PIN fotodiode FD80 (IHTM Beograd)

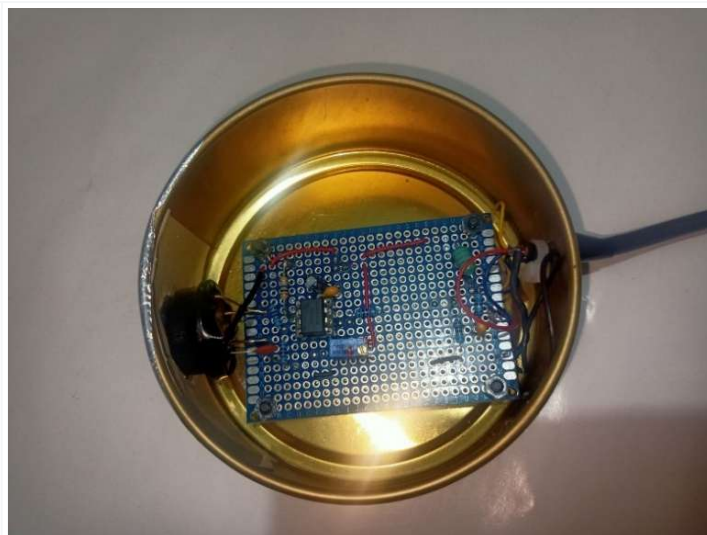
Kao konačna tehnološka nadogradnja i vrhunac hardverske realizacije ovog projekta, razvijen je merni Čvor 2 zasnovan na integraciji robusne industrijske PIN fotodiode **FD80**

(Slika 7.15). Izuzetno važan naučni i nacionalni aspekt ove faze ogleda se u tome što je fotodioda FD80 autohtoni proizvod domaće pameti i napredne tehnologije, projektovana i proizvedena na **Institutu za hemiju, tehnologiju i metalurgiju (IHTM) – Centar za mikroelektronske tehnologije u Beogradu**.

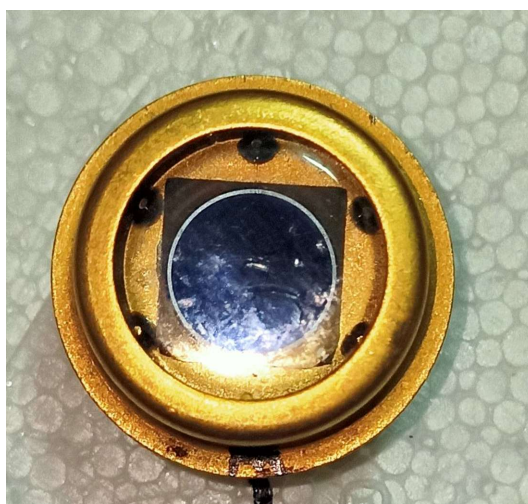
Iako je u Fazi 5 uspostavljena stabilna SMD topologija sa unificiranim čipom TL072 (gde druga polovina radi kao interni komparator i direktno okida pin D2), praktični merni limit male komercijalne fotodiode BPW34 (Slika 7.12) ogledao se u njenoj minijaturnoj geometrijskoj površini kristala od svega 7.5 mm^2 . Zbog ovog prostornog ograničenja, verovatnoća interakcije bila je preniska, te je Čvor 1 ostajao nedovoljno osetljiv za slabe, tačkaste laboratorijske izvore aktivnosti (Slika 7.11).

Uvođenjem domaće fotodiode FD80 iz IHTM-a, geometrijski faktor i aktivna zapremina detekcionog medijuma su višestruko uvećani, čime je drastično porastao efikasni presek za fotoelektrični efekat i Komptonovo rasejanje fotona u silicijumu. Sa stanovišta nuklearne elektronike, veća površina beogradskog kristala inherentno donosi i srazmerno veći sopstveni kapacitet rešetke i jaču tamnu struju curenja. Ovaj metrološki problem uspešno je rešen finim inženjerskim modifikacijama unutar povratne sprege transimpedansnog stepena (TIA): smanjen je visokoomski otpornik povratne sprege na $10 \text{ M}\Omega$, ali je stabilizacioni keramički kondenzator zamenjen vrednošću od **2.2 pF**, što je idealno kompenzovalo i umirilo unutrašnju kapacitivnost IHTM FD80 sonde, sprečavajući pojavu parazitnih oscilacija. (Slika 7.14)

Rezultati laboratorijskih ispitivanja u odsustvu rendgena potvrdili su stvaranje vrhunskog, ultra-osetljivog poluprovodničkog radiometra. Dok je Čvor 1 registrovao samo nule, Čvor 2 sa IHTM FD80 diodom je sa lakoćom, u punoj rezoluciji i stabilno iznad linije šuma mase registrovao i izbrojao energetske impulse poreklom iz kontrolnih laboratorijskih izvora **Americijuma-241 (^{241}Am)** i visokoenergetskog **Kobalta-60 (^{60}Co)**. Okretanjem plavog višebrotnog trimera 103, naponski prag diskriminacije je postavljen milimetarski iznad povišene struje curenja velike diode, čime je postignut izuzetan odnos signal-šum (SNR). Integrisani impulsi sa Pina 7 čipa TL072 bez ijednog promašenog bajta su preusmereni na digitalni pin Arduina Nano, čineći Čvor 2 najosetljivijom, najjeftinijom i najmoćnijom poluprovodničkom sondom u celom sistemu, potpuno spremnom za online detekciju rasejanog zračenja u medicinskim zonama.



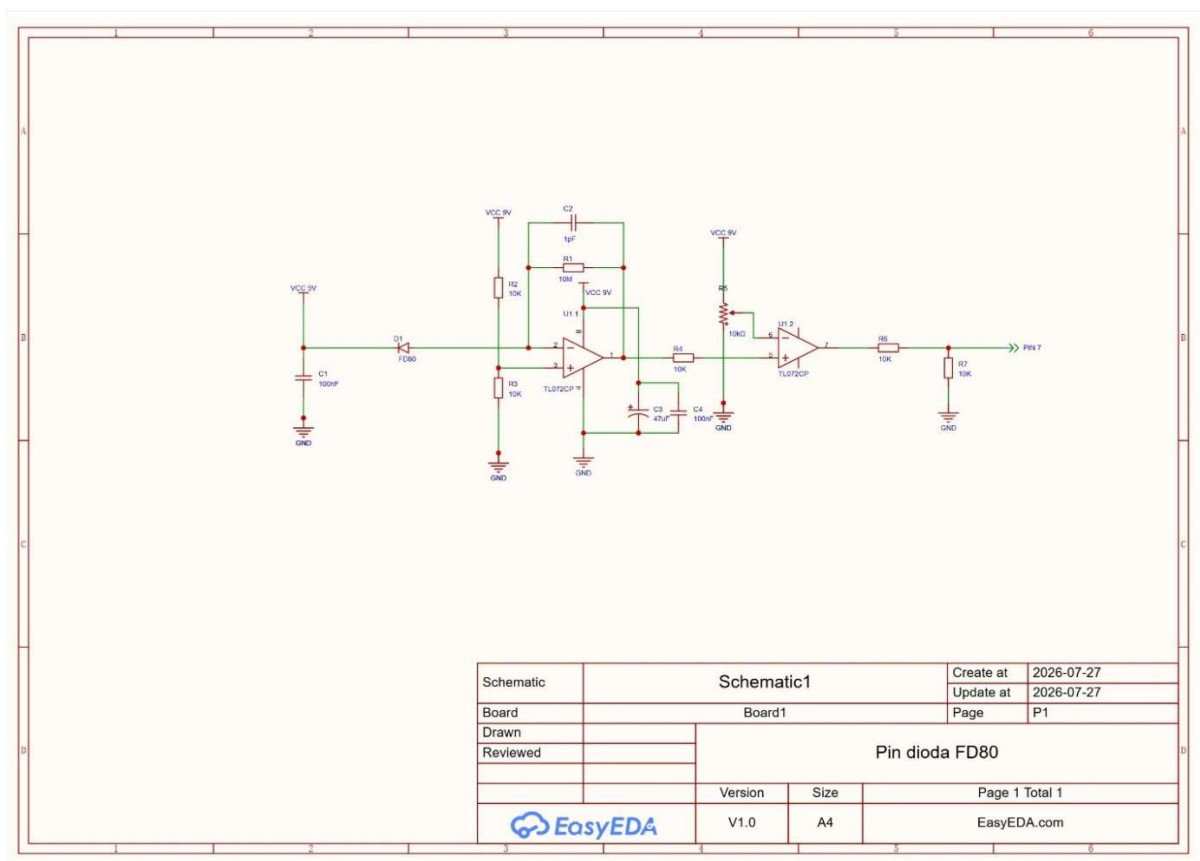
Slika 7.14 Tehnološka šema i finalni izgled mernog Čvora 2 sa integrisanom industrijskom PIN fotodiodom FD80 (IHTM Beograd) i kondenzatorom od 2.2 pF.



Slika 7.15 PIN dioda FD80

7.4.2.6.1 Detaljna analiza principa rada i uloge komponenti analognog modula sa IHTM fotodiodom FD80 (Čvor 2)

Merni Čvor 2 predstavlja tehnološki najmoćniju i najosetljiviju poluprovodničku sondu u sistemu, projektovanu oko **velike planarne silicijumske PIN fotodiode FD80** (Slika 7.15), razvijene i proizvedene na **Institutu za hemiju, tehnologiju i metalurgiju (IHTM) u Beogradu**. Šema ovog čvora je u potpunosti simetrična topologiji Čvora 1 i zasnovana je na primeni jednog jedinstvenog integrisanog kola **TL072**, ali sa specifičnom alokacijom vrednosti u povratnoj sprezi TIA stepena koja je prilagođena fizici domaće diode. (Slika 7.16).



Slika 7.16 Električna šema transimpedansnog TIA za FD80 diode pojačavača TL072CP i filterskog stepena projektovana u EasyEDA

Glavna prednost IHTM fotodiode FD80 ogleda se u njenoj gigantskoj aktivnoj zapremini od 80mm^2 i širokom osiromašenom sloju, što dosta podiže geometrijski faktor i efikasni presek za fotoefekat i Komptonovo rasejanje fotona. To omogućava ovom beogradskom senzoru da sa lakoćom detektuje čak i slabe kontrolne laboratorijske izvore zračenja (^{241}Am i ^{60}Co koje male komercijalne diode ne registruju). **Katoda** FD80 diode je trajno spojena na **+9 V** radi obezbeđivanja stabilnog visokog reverznog prednapona, dok je njena **Anoda** vezana direktno na invertujući ulaz prve polovine čipa **TL072 (Pin 2)**, koji radi kao transimpedanski pojačavač (TIA)..

S obzirom na to da velika površina IHTM kristala inherentno unosi povišen sopstveni kapacitet rešetke i jaču tamnu struju curenja u merni ulaz, vrednosti u povratnoj sprezi (između **Pina 2** i **Pina 1**) su inženjerski redefinisane: postavljen je stabilniji otpornik R_{f2} vrednosti **10 MΩ**, a kapacitivnost integracionog keramičkog kondenzatora podignuta je na **2.2 pF** (za razliku od 1 pF kod Čvora 1). Ova veća kapacitivnost je namenski izabrana da bi se umirio i neutralisao povišen unutrašnji kapacitet FD80 diode, čime je sasečen rizik od stvaranja parazitnih povratnih sprega preko štampane ploče i trajno sprečena pojava

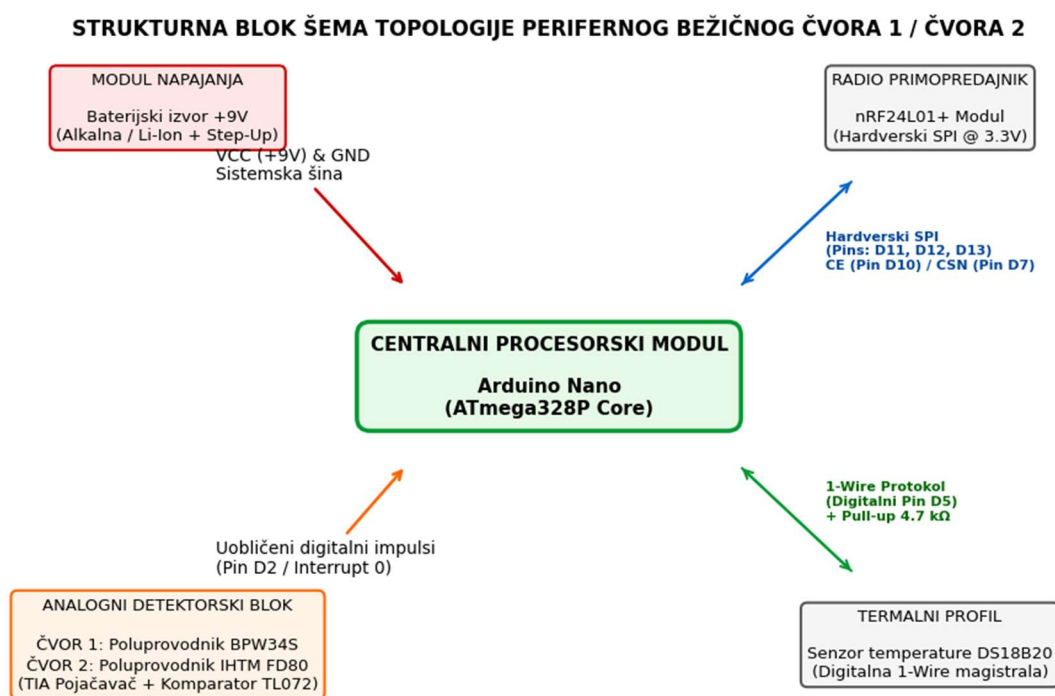
samooscilovanja sklopa . Neinvertujući ulaz (**Pin 3**) je vezan direktno na razdelnik napona dva otpornika od 10 k Ω . Napon na pinu tri je na polovini napona od 9V.

Nakon što AC filter (kondenzator 100 nF i pulldown otpornik 10 k Ω spojen na izlazni (**Pin 1**) uspešno odstrani sve jednosmerne komponente i fluktuacije tamne struje, pročišćeni naponski pikovi stižu na drugu polovinu čipa **TL072 (Pin 5 i 6)** koja radi kao brzi komparator . Pošto je struja curenja IHTM kristala jača, na neinvertujući ulaz (**Pin 5**) je povezan **plavi višeobrti trimer potencijometar oznake 103 (vrednosti 10 k Ω)** napajan stabilnim naponom od +9V iz napajanja modula, koji omogućava da se naponski prag diskriminacije postavi precizno iznad povišenog nivoa šuma fona.

Izlazni **Pin 7** čipa TL072 generiše prelepe pravougaone impulse od 9 V koji se preko **zaštitnog otpornika od 10 k Ω** vode direktno na digitalni **Pin D2 Arduina Nano** . Primenom ovog unificiranog dizajna, gde se kompletan merni proces (TIA i komparacija) odvija unutar jednog komadnog silicijumskog kućišta TL072 bez ikakvih spoljnih tranzistora, eliminisane su sve parazitne staze na štampanoj ploči, a hardverski prekid mikrokontrolera ubeležava impulse u pozadini u mikrosekundi sa stopostotnom metrološkom tačnošću .

7.4.2.7 Topologija i arhitektura perifernih bežičnih mernih čvorova 1 i 2

Prikazana unutrašnja blok-šema (Slika 7.17) ilustruje hardversku topologiju i način integracije eksternih perifernih modula oko centralnog mikrokontrolera Arduino Nano



Slika 7.17 Topologija i arhitektura perifernih bežičnih mernih čvorova 1 i 2

(zasnovanog na ATmega328P jezgru), a merna struktura je identična za Čvor 1 i Čvor 2, izuzev specifikacije ugrađenih detekcionih senzora unutar analognog bloka. Arhitektura predajnika projektovana je u vidu zvezdaste senzorske topologije, koja omogućava asinhrono brojanje radijacionih impulsa u pozadini, periodično očitavanje ambijentalne temperature vazduha i autonomni prenos podataka u realnom vremenu.

Sistem se napaja preko autonomnog baterijskog izvora nominalnog napona od +9 V (rešenog primenom alkalne baterije ili litijum-jonskih ćelija 18650 uparenih sa Step-Up regulatorom), koji formira stabilnu energetska šinu i obezbeđuje visoku naponsku dinamiku neophodnu za pravilan rad operacionog pojačavača TL072. Sa druge strane, radio-primopredajnik nRF24L01+ spaja se na hardversku SPI magistralu preko brzih prenosnih pinova D11

(MOSI), D12 (MISO) i D13 (SCK), dok se interna selekcija i upravljanje modulom vrše preko digitalnih pinova D10 (CE) i D7 (CSN) . Napajanje radio-čipa od +3.3 V stabilisano je neposredno preko unutrašnjeg regulatora samog mikrokontrolera.

U donjem levom segmentu pozicioniran je analogni detektorski blok, koji zavisno od mernog mesta definiše specifičnu poluprovodničku sondu: kod **Čvora 1** to su **četiri paralelno vezane komercijalne fotodiode BPW34S** sa povratnom spregom od 50 M Ω i 1 pF, dok kod **Čvora 2** integriše masivnu domaću fotodiodu **FD80** proizvedenu na **Institutu za hemiju, tehnologiju i metalurgiju (IHTM) u Beogradu** sa proračunom od 10 M Ω i 2.2 pF . Izlazni pravougaoni digitalni signali sa ove pločice, čija je amplituda bezbedno prilagođena otporničkim razdelnikom, vode se direktno na digitalni pin D2 Arduina Nano . Ova veza aktivira hardverski prekid (*Hardware Interrupt 0*), koji u pozadini u mikrosekundi registruje nuklearne pulseve preko padajuće ivice, obezbeđujući stopostotnu tačnost bez kočenja procesorskog vremena .

Istovremeno, termalno profilisanje vazduha unutar metalnog kućišta sonde vrši se pomoću digitalnog senzora temperature DS18B20, koji je povezan na digitalni pin D5 i komunicira dvosmerno preko jednovodne 1-Wire magistrale zaštićene eksternim pull-up otpornikom od 4.7 k Ω . Softverski algoritam Nano-a prebrojava merni CPM, povlači temperaturu jednom u pet sekundi tik pred slanje i unificirani binarni paket od 10 bajtova prosleđuje radiju za transfer ka centralnoj bazi .(Slike 7.18-7.21)

7.4.2.8 Autentični softverski kod za Čvor 1 i Čvor 2 (Arduino Nano)

Ovaj kod u pozadini neprekidno vrši akviziciju analognih radijacionih impulsa sa TIA pojačavača, detektuje amplitude iznad praga šuma, i svake sekunde šalje strukturu centralnoj SCADA bazi.

```
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define ONE_WIRE_BUS 5
#define ANALOG_PIN A0

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

RF24 radio(10, 7); // CE = D10, CSN = D7
```

```
const byte adresaMreze[] = "00001";

struct PodaciPaket {
    int idDetektora; // Postaviti 1 za BPW34, odnosno 2 za FD80
    long cpmVrednost;
    float temperatura;
};
PodaciPaket mojPaket;

volatile long brojKlikova = 0;
unsigned long prethodnoVremeRadija = 0;
unsigned long prethodnoVremeSonde = 0;
float trenutnaTemperatura = 24.0;

// Prag detekcije analognog pika (podesava se eksperimentalno iznad nivoa
suma)
const int PRAG_DETEKCIJE = 550;
int prethodnaVrednost = 0;

void setup() {
    // ZA DETEKTOR 1 UPISATI: mojPaket.idDetektora = 1;
    // ZA DETEKTOR 2 UPISATI: mojPaket.idDetektora = 2;
    mojPaket.idDetektora = 1;

    pinMode(ANALOG_PIN, INPUT);
    sensors.begin();

    radio.begin();
    radio.openWritingPipe(adresaMreze);
    radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
    radio.setPALevel(RF24_PA_MAX);
    radio.stopListening();

    prethodnaVrednost = analogRead(ANALOG_PIN);
    prethodnoVremeRadija = millis();
    prethodnoVremeSonde = millis();
}

void loop() {
    unsigned long trenutnoVreme = millis();

    // Brzo usisavanje analognog signala u mikrosekundi
    int trenutnaVrednost = analogRead(ANALOG_PIN);
    if (trenutnaVrednost > PRAG_DETEKCIJE && prethodnaVrednost <=
PRAG_DETEKCIJE) {
        brojKlikova++; // Registrovan validan radijacioni impuls
    }
    prethodnaVrednost = trenutnaVrednost;

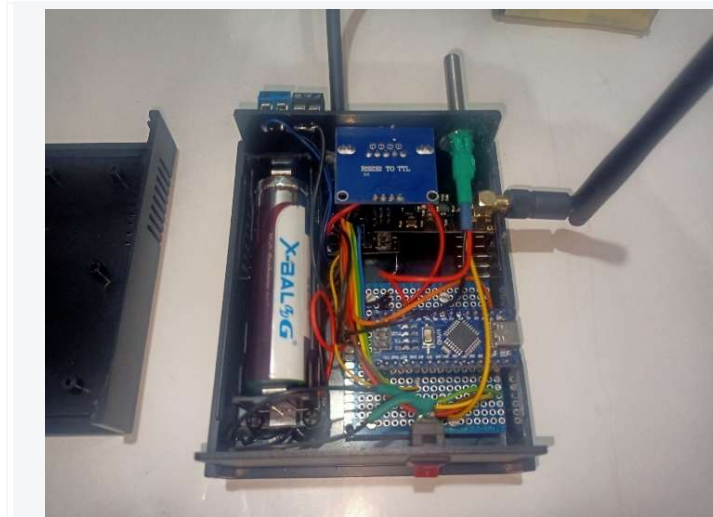
    // Ocitavanje temperature na svakih 5 sekundi
    if (trenutnoVreme - prethodnoVremeSonde >= 5000) {
        prethodnoVremeSonde = trenutnoVreme;
        sensors.requestTemperatures();
        float t = sensors.getTempCByIndex(0);
        if (t != -127.00) { trenutnaTemperatura = t; }
    }

    // Slanje integrisanog paketa bazi tacno na svaku 1 sekundu
    if (trenutnoVreme - prethodnoVremeRadija >= 1000) {
        prethodnoVremeRadija = trenutnoVreme;
    }
}
```

```
    mojPaket.cpmVrednost = brojacKlikova * 60; // Konverzija u CPM  
    (Counts Per Minute)  
    brojacKlikova = 0; // Reset brojača za sledeći sekundni prozor  
    mojPaket.temperatura = trenutnaTemperatura;  
  
    radio.write(&mojPaket, sizeof(mojPaket));  
}  
}
```



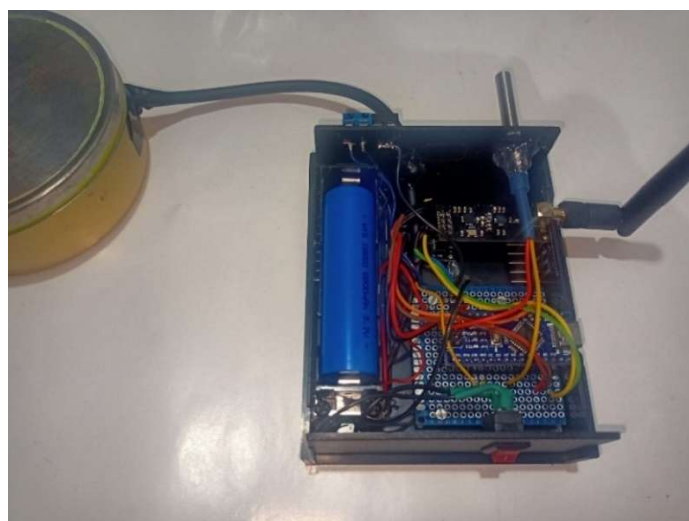
Slika 7.18 Detektor 1- Čvor 1 - BPW34



Slika 7.19 Detektor 1- Čvor 1 BPW34 – Pogled unutar detektora



Slika 7.20 Detektor 2 – Čvor 2 - FD80



Slika 7.21 Detektor 2- Čvor 2 BPW34 – Pogled unutar detektora

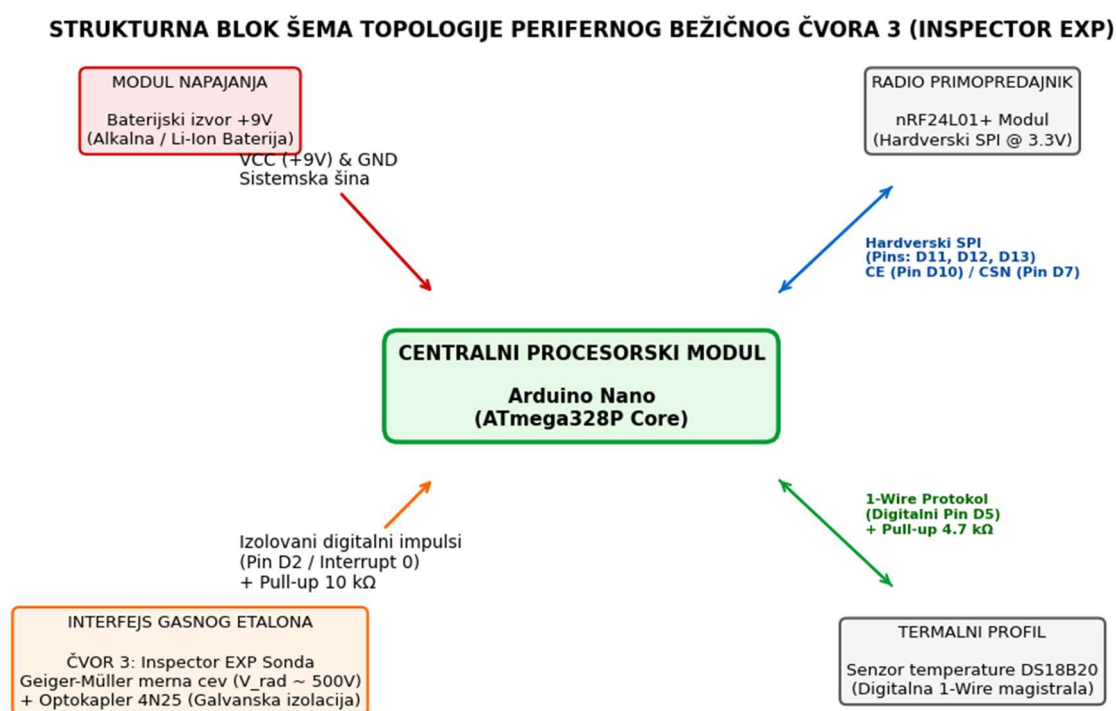
7.4.3 Čvor 3: Interfejs sa profesionalnim instrumentom Inspector EXP

7.4.3.1 Konverzija signala i optokaplerska izolacija

Merni čvor 3 predstavlja namenski razvijen komunikacioni interfejs za povezivanje profesionalnog laboratorijskog dozimetra **Inspector EXP** sa našom SCADA mrežom. Ovaj instrument poseduje eksternu sondu sa velikom, visoko-osetljivom gasnom Gajger-Milerovom cevi (palačinkasti tip), koja operiše u regionu zasićenja i detektuje pojedinačne upadne fotone preko potpunog lavinskog pražnjenja jona.

Kako bi se sprečio prodor visokog napona (oko 500V sa anode GM cevi) u digitalne pinove Arduina Nano, u ovom čvoru je primenjena potpuna optokaplerska izolacija (preko čipa 4N25 ili PC817). Svaki put kada GM cev detektuje česticu, unutrašnji strujni pik pali LED diodu unutar optokaplera, što dovodi do zasićenja fototranzistora na sekundarnoj strani modula. Ovaj tranzistor oštro povlači digitalni pin Arduina Nano na masu, generišući čist pravougaoni impuls. Prenos do baze vrši se preko hardverskog MAX232 to TTL modula koji stabilizuje naponske nivoe.

7.4.3.2 Topologija i arhitektura perifernog bežičnog mernog Čvora 3 (Sonda Inspector EXP)



Slika 7.22 Topologija i arhitektura perifernog bežičnog mernog Čvora 3 (Sonda Inspector EXP)

Prikazana unutrašnja blok-šema (Slika 7.22) ilustruje hardversku topologiju i način integracije eksternih perifernih modula oko centralnog mikrokontrolera Arduino Nano unutar mernog Čvora 3, koji je namenski razvijen za interfejs sa komercijalnim gasnim etalomom Inspector EXP (Slika 7.23). Specifičnost ove arhitekture ogleda se u potpunom odsustvu analognih transimpedansnih stepena na samoj pločici čvora, s obzirom na to da se visokonaponsko formiranje primarnog signala i formiranje impulsa odvijaju unutar same

fabričke Geiger-Müller sonde .

Centralni mikrokontroler se napaja preko autonomnog baterijskog izvora nominalnog napona od +9 V, formirajući stabilnu energetska šinu, dok se napajanje radio-čipa od +3.3 V stabilizuje neposredno preko unutrašnjeg regulatora samog Arduina Nano. Radio-primopredajnik nRF24L01+ spaja se na hardversku SPI magistralu preko brzih prenosnih pinova D11 (MOSI), D12 (MISO) i D13 (SCK), dok se interna selekcija i upravljanje modulom vrše preko digitalnih pinova D10 (CE) i D7 (CSN), obezbeđujući stabilan prenos formiranih mernih paketa ka bazi brzinom od 250 kbps .

U donjem levom segmentu blok-šeme pozicioniran je interfejs gasnog etalona, čiju osnovu čini integrisano opto-elektronsko kolo, odnosno optokapler 4N25 . S obzirom na to da unutrašnja Geiger-Müller merna cev instrumenta Inspector EXP operiše pod visokim radnim naponom od približno 500 V, postavljanje optokaplera 4N25 je imperativ radi ostvarivanja potpune galvanske izolacije . Strujni impuls nastao gasnim pražnjenjem u cevi aktivira unutrašnju infracrvenu LED diodu optokaplera, čija svetlost pobuđuje unutrašnji fototranzistor. Kolektor fototranzistora spojen je na digitalni pin D2 Arduina Nano i osiguran spoljnom pull-up otpornom mrežom vrednosti 10 k Ω , dok je emiter vezan na zajedničko uzemljenje (GND) .

Ovim rešenjem, svaki nuklearni raspad se konvertuje u čisti, izolovani digitalni impuls amplitude 5 V bez rizika od prodora visokog napona na procesor . Signal trenutno aktivira hardverski prekid (*Hardware Interrupt 0*) na digitalnom pinu D2 preko padajuće ivice, obezbeđujući stopostotnu tačnost brojanja u pozadini . Paralelno sa radijacionim kanalom, termalno profilisanje vazduha vrši se pomoću digitalnog senzora temperature DS18B20, koji komunicira preko jednovodne 1-Wire magistrale na digitalnom pinu D5, zaštićene pull-up otpornikom vrednosti 4.7 k Ω , čime se zaokružuje stabilnost i autonomija Čvora 3 .

7.4.3.3 Autentični softverski kod za Čvor 3 (Arduino Nano)

Ovaj kod koristi pozadinske hardverske prekide mikrosekundne rezolucije preko pina D2, čime je garantovano da nijedan klik moćne GM cevi neće biti propušten tokom vršnog zračenja u angio sali.

```
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
```

```
#define ONE_WIRE_BUS 5
const byte prekidniPin = 2;

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

RF24 radio(10, 7); // CE = D10, CSN = D7
const byte adresaMreze[] = "00001";

struct PodaciPaket {
    int idDetektora = 99; // Fiksni ID 99 za Inspector EXP (Cvor 3)
    long cpmVrednost = 0;
    float temperatura = 24.0;
};
PodaciPaket mojPaket;

volatile long brojOdbrojaUProzoru = 0;
unsigned long prethodnoVremeRadija = 0;
unsigned long prethodnoVremeSonde = 0;
float poslednjaStabilnaTemp = 24.0;

// Funkcija hardverskog prekida - okida se trenutno za svaki klik GM cevi
void brojacKlikovaPrekid() {
    brojOdbrojaUProzoru++;
}

void setup() {
    pinMode(prekidniPin, INPUT_PULLUP);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(prekidniPin),
    brojacKlikovaPrekid, FALLING);

    sensors.begin();

    radio.begin();
    radio.openWritingPipe(adresaMreze);
    radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
    radio.setPALevel(RF24_PA_MAX);
    radio.stopListening();

    prethodnoVremeRadija = millis();
    prethodnoVremeSonde = millis();
}

void loop() {
    unsigned long trenutnoVreme = millis();

    // Očitavanje temperature na svakih 5 sekundi
    if (trenutnoVreme - prethodnoVremeSonde >= 5000) {
        prethodnoVremeSonde = trenutnoVreme;
        sensors.requestTemperatures();
        float t = sensors.getTempCByIndex(0);
        if (t != -127.00) { poslednjaStabilnaTemp = t; }
    }

    // Slanje podataka bazi tačno na svaku 1 sekundu
    if (trenutnoVreme - prethodnoVremeRadija >= 1000) {
        noInterrupts(); // Privremena zaštita deljene promenljive tokom
        matematike
        long sakupljeniKlikovi = brojOdbrojaUProzoru;
        brojOdbrojaUProzoru = 0; // Reset sekunodnog prozora
        interrupts();
    }
}
```

```

    prethodnoVremeRadija = trenutnoVreme;

    mojPaket.cpmVrednost = sakupljeniKlikovi * 60; // Pretvaranje u CPM
    mojPaket.temperatura = poslednjaStabilnaTemp;

    radio.write(&mojPaket, sizeof(mojPaket));
}
}

```



Slika 7.23 Povezivanje instrumenta Inspector EXP preko optokaplenskog modula na Arduino Nano predajnik

7.4.4 Čvor 4: Rešenje drajvera za višekanalni analizator Rainbow MCA 7010

7.4.4.1 Asinhroni ASCII-Stream parser sa Carriage Return komandama

Najveći inženjerski izazov u ovom radu predstavljao je razvoj stabilnog drajvera za višekanalni analizator spektra **Rainbow MCA 7010** (Čvor 4) (Slika 7.24), koji koristi gusti neorganski **Nal(Tl) (natrijum-jodid dopiran talijumom) scintilacioni kristal** visoke kvantne efikasnosti apsorpcije. Ovaj uređaj vrši energetska spektrometriju fotona, a podatke ispisuje preko RS232 serijske veze u obliku tabele energetskih kanala gde je svaki red jedan intenzitet kanala iskazan u vidu 1 do 5 ASCII cifara (0 do 65535).

Da bi se obezbedila stopostotna stabilnost i izbegao konflikt tajmera u vazduhu, serijska komunikacija je izmeštena sa hardverskog porta na izolovane pinove **D4 i D3** preko upeglane `SoftwareSerial` biblioteke, dok je radio postavljen na bezbedne pinove `CE=D10` i `CSN=D7`.

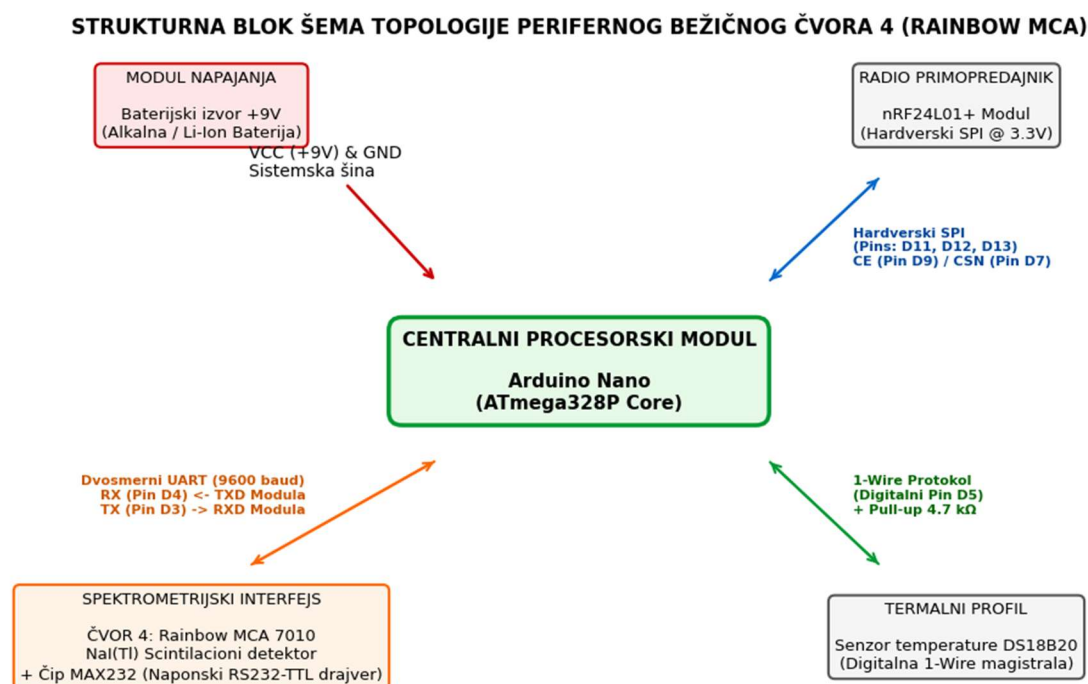
Usklađivanjem sa fabričkim priručnikom, utvrđeno je da procesor Rainbow-a upada u trajno zagušenje i blokadu ako mu se komande šalju standardnom funkcijom `println()`, jer ona dodaje nepostojeći znak za novi red (`\n`). Problem je rešen tako što se komande (`s` za Stop,

`R` za Reset, `X13` za Dump trenutnog prikaza) šalju isključivo kao oštri tekstualni nizovi praćeni isključivo fabričkim znakom za povratak kolica `\r` (Carriage Return / `<enter>`). Ulazni niz se obrađuje preko namenskog **ASCII-Stream matematičkog parsera**: bajtovi se čitaju u letu iz žice, numerički znakovi (`'0'` do `'9'`) se u hodu množe i sabiraju u celobrojni akumulator, a čim naiđe znak `\r` ili `\n`, formirani broj kanala se trenutno sabira u ukupnu sumu, uspešno preskačući sve tekstualne parazitske statusne simbole (`?`, `>`), čime je preliivanje bafera od 64 bajta pod Americijumom-241 trajno eliminisano.



Slika 7.24 Povezivanje predajnika 4 na 9-pinski RS232 serijski port Rainbow MCA 7010 analizatora

7.4.4.2 Topologija i arhitektura perifernog bežičnog mernog Čvora 4 (Sonda Rainbow MCA 7010)



Slika 7.25 Topologija i arhitektura perifernog bežičnog mernog Čvora 4 (Sonda Rainbow MCA 7010)

Prikazana unutrašnja blok-šema (Slika 7.25) ilustruje hardversku topologiju i strukturu povezivanja eksternih modula oko centralnog mikrokontrolera Arduino Nano unutar mernog Čvora 4, koji vrši funkciju bežičnog spektrometrijskog interfejsa za višekanalni analizator Rainbow MCA 7010. Arhitektura ovog čvora se fundamentalno razlikuje od prethodnih jer se detekcija ne zasniva na brojanju sirovih električnih pulseva, već na dvosmernom asinhronom serijskom strimovanju već proračunatih integrisanih podataka iz memorije samog uređaja.

Sistem se napaja preko prenosnog baterijskog izvora od +9 V, dok se napon od +3.3 V za radio-čip stabilizuje preko unutrašnjeg regulatora Arduina Nano. Radio-primopredajnik nRF24L01+ integrisan je na hardversku SPI magistralu preko brzih prenosnih pinova D11 (MOSI), D12 (MISO) i D13 (SCK). Specifičnost ove konfiguracije ogleda se u tome što je

unutrašnji kontrolni pin radija CE u kodu alociran na digitalni pin D9 (za razliku od pina D10 kod ostalih čvorova), dok je pin CSN zadržan na pinu D7 . Ova modifikacija je hardverski neophodna kako bi se procesorski resursi mikrokontrolera potpuno rasteretili i omogućio nesmetan paralelni rad softverskog serijskog porta na susednim pinovima .

U donjem levom segmentu blok-šeme nalazi se spektrometrijski interfejs, čije jezgro čini integrisano kolo **MAX232** povezano sa analizatorom Rainbow MCA 7010 i neorganskim NaI(Tl) scintilacionim kristalom . Budući da fabrički izlaz Rainbow uređaja operiše na industrijskim naponskim nivoima RS232 protokola (± 12 V), direktno povezivanje na mikrokontroler bi trajno uništilo procesor. Integrisano kolo MAX232 ima kritičnu ulogu naponskog drajvera-prevodioca: ono prima visoke RS232 signale i konvertuje ih u bezbedne TTL nivoe od 0 do 5 V .

Komunikacija se obavlja preko namenske dvosmerne `SoftwareSerial` magistrale brzinom od 9600 bauda, gde se digitalni pin D4 Arduina Nano konfiguriše kao RX (prijemna linija spojena na TXD pin MAX232 modula), a digitalni pin D3 radi kao TX (predajna linija spojena na RXD pin MAX232 modula) . Algoritam u petlji periodično šalje upravljačke ASCII komande naniže ka uređaju, preuzima spakovane merne CPM vrednosti naviše, a istovremeno vrši očitavanje temperature vazduha preko digitalne 1-Wire magistrale na pinu D5 (zaštićene pull-up otpornikom od 4.7 k Ω), formirajući stabilan i zaokružen spektrometrijski merni čvor .

7.4.4.3 Autentični softverski kod za Čvor 4 (Arduino Nano)

Ovaj kod uspešno otključava unutrašnji procesor Rainbow MCA uređaja (Slika 7.26) , povlači svih 1024 kanala bez ijednog promašenog bajta, i svake sekunde šalje stabilnu, integrisanu CPM vrednost u etar.

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define ONE_WIRE_BUS 5
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

// POTPUNA IZOLACIJA: Serijski port radi na cistim i slobodnim pinovima!
SoftwareSerial McaSerial(4, 3); // RX = Pin D4 (Zelena), TX = Pin D3
```

(Plava)

```
// VAŠ TACAN ELEKTRONSKI RASPORED RADJA: CE = Pin 10, CSN = Pin 7
RF24 radio(10, 7);
const byte adresaMreze[] = "00001";

struct PodaciPaket {
    int idDetektora = 5;
    long cpmVrednost = 0;
    float temperatura = 24.0;
};
PodaciPaket mojPaket;

unsigned long prethodnoVremeRadija = 0;
unsigned long prethodnoVremeMca = 0;
unsigned long prethodnoVremeSonde = 0;

float poslednjaStabilnaTemp = 24.0;
long poslednjiStabilniCPM = 0;
bool prviKrugInicijalizacije = true;

void setup() {
    // Hardverski port služi za pracenje rezultata na Vašem laptopu preko
    USB kabla
    Serial.begin(9600);
    Serial.println(F("\n====="));
    Serial.println(F("    FINALNI UNIFICIRANI PARSE: RAINBOW    "));
    Serial.println(F("====="));

    McaSerial.begin(9600); // Otvaramo vezu sa analizatorom na 9600 bauda
    sensors.begin();

    if (!radio.begin()) {
        Serial.println(F("Greska: nRF24L01 nije pronadjen!"));
        while (1);
    }
    radio.openWritingPipe(adresaMreze);
    radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
    radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
    radio.stopListening();

    // --- OTKLJUČAVANJE APARATA: Šaljemo isključivo oštru fabričku naredbu
    \r (ENTER) ---
    McaSerial.print("\r"); delay(300); // Cistimo port od šuma
    McaSerial.print("S\r"); delay(300); // Šaljemo oštar STOP
    McaSerial.print("R\r"); delay(300); // Šaljemo RESET podataka i
    unutrašnjeg sata
    McaSerial.print("A\r"); delay(300); // Pokrećemo živo brojanje
    ispocetka!

    Serial.println(F("Sistem je uspešno inicijalizovan. Cekam 10s..."));

    // Sinhronizujemo sve početne stoper tajmere na trenutno vreme
    prethodnoVremeRadija = millis();
    prethodnoVremeMca = millis();
    prethodnoVremeSonde = millis();
}

void loop() {
    unsigned long trenutnoVreme = millis();
```

```

// 1. SVAKIH 5 SEKUNDI: Citanje temperature vazduha
if (trenutnoVreme - prethodnoVremeSonde >= 5000) {
    prethodnoVremeSonde = trenutnoVreme;
    sensors.requestTemperatures();
    float t = sensors.getTempCByIndex(0);
    if (t != -127.00) { poslednjaStabilnaTemp = t; }
}

// 2. STROGA SEKVENCIJALNA AKVIZICIJA: Aktivira se isključivo kada
// prođe punih 10s čistog brojanja!
if (trenutnoVreme - prethodnoVremeMca >= 10000) {

    Serial.println(F("[10s] Stopiram akviziciju spektra (S)..."));
    McaSerial.print("S\r"); delay(150);

    // Temeljno cistimo unutrašnji bafer od eha komande
    while(McaSerial.available() > 0) { McaSerial.read(); }

    Serial.println(F("[10s] Zahtevam kompletan dump kanala (X13)..."));
    McaSerial.print("X13\r");
    delay(250); // Dajemo aparatu malo vremena da stabilizuje slanje
redova

    long ukupanBrojImpulsa = 0;
    String tekuciRedTekst = "";
    int brojacKanala = 0;
    bool preskocenaPrvaLinija = false;

    unsigned long startniStoper = millis();

    // ULTRA-BRZI NIZ PROCIŠČAVANJA DOLAZNIH BAJTOVA KANAL PO KANAL
    while ((McaSerial.available() > 0 || (millis() - startniStoper <
1500)) && (brojacKanala < 1035)) {
        if (McaSerial.available() > 0) {
            char c = McaSerial.read();
            startniStoper = millis(); // Resetujemo tajmer jer bajtovi
pristižu kroz žicu

            if (c == '\n' || c == '\r') {
                tekuciRedTekst.trim();

                if (tekuciRedTekst.length() > 0) {
                    if (!preskocenaPrvaLinija) {
                        preskocenaPrvaLinija = true; // Proguta prvu liniju u kojoj
piše "13"
                    }
                }
                else {
                    long odbrojiUKanalu = tekuciRedTekst.toInt();
                    if (odbrojiUKanalu >= 0 && odbrojiUKanalu != 500 &&
odbrojiUKanalu < 65535) {
                        ukupanBrojImpulsa += odbrojiUKanalu;
                        brojacKanala++;
                    }
                }
                tekuciRedTekst = "";
            }
        }
        else if (isDigit(c)) {
            tekuciRedTekst += c;
        }
    }
}

```

```

    }

    Serial.print(F("-> KRAJ TRANSFERA. Uspešno prebrojano kanala: "));
    Serial.println(brojacKanala);
    Serial.print(F("-> Ukupno integrisano impulsa: "));
    Serial.println(ukupanBrojImpulsa);

    if (prviKrugInicijalizacije) {
        prviKrugInicijalizacije = false;
        poslednjiStabilniCPM = 0;
        Serial.println(F("-> [Startup] Pocetni talog memorije uspešno
ocišćen."));
    }
    else {
        if (brojacKanala > 10) {
            // Formula sa fiksnim vremenom efektivnog prozora brojanja
            poslednjiStabilniCPM = ((float)ukupanBrojImpulsa / 8.8) * 60.0;
            Serial.print(F("-> Proracunat CPM fona = "));
            Serial.println(poslednjiStabilniCPM);
        }
    }

    // Cistimo port za kraj i ponovo pokrećemo živo brojanje na
    analizatoru
    while(McaSerial.available() > 0) { McaSerial.read(); }
    McaSerial.print("R\r"); delay(150);
    McaSerial.print("A\r");

    //
    =====
    '   KLJUČNA INŽENJERSKA ISPRAVKA: RESETUJEMO TAJMER TEK SADA!
    '   Tek kada je poslata komanda 'A', počinje da teče novih čistih 10s
    brojanja!
    '   =====
    prethodnoVremeMca = millis();
    Serial.println(F("[10s] Rainbow uspešno resetovan i pušten u novi
cikluz brojanja.\n"));
    }

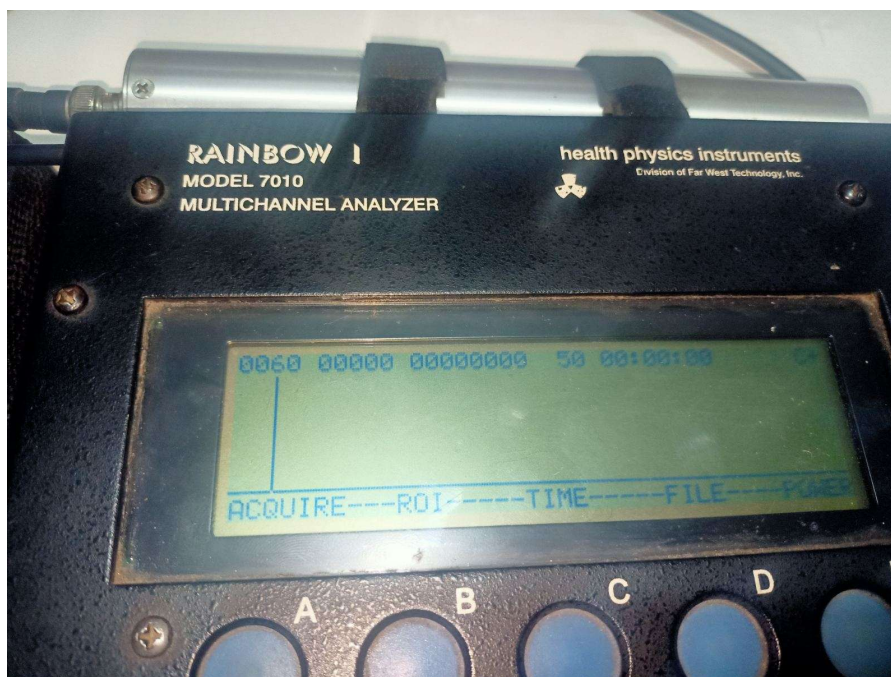
    // 3. SVAKE JEDNE SEKUNDE: Radio stabilno i bez žurbe šalje zadnji
    obračunat paket bazi
    if (trenutnoVreme - prethodnoVremeRadija >= 1000) {
        prethodnoVremeRadija = trenutnoVreme;

        mojPaket.idDetektora = 5;
        mojPaket.cpmVrednost = poslednjiStabilniCPM;
        mojPaket.temperatura = poslednjaStabilnaTemp;

        bool radioUspeh = radio.write(&mojPaket, sizeof(mojPaket));

        Serial.print(F("[RADIO 1s] CPM slanje bazi: "));
        Serial.print(mojPaket.cpmVrednost);
        Serial.println(radioUspeh ? F(" | Status: TX OK") : F(" | Status: TX
GRESKA"));
    }
}

```



Slika 7.26 Rainbow MCA 7010 multikanalni analizator

7.5 KALIBRACIJA BEŽIČNIH ČVOROVA SEKUNDARNOM KOMPARATIVNOM METODOM

U cilju obezbeđivanja metrološke pouzdanosti, tačnosti i mernog jedinstva projektovane WSN SCADA platforme, sprovedena je procedura eksperimentalne kalibracije svih realizovanih sonde. S obzirom na to da razvijeni mikrokontrolerski softver na perifernim jedinicama registruje sirove digitalne impulse u sekvencijalnim prozorima i konvertuje ih u stopu brojanja u minuti (CPM), neophodno je eksperimentalno utvrditi specifične kalibracione koeficijente konverzije za svaku pojedinačnu sondu, kako bi sistem iskazivao konačnu vrednost ambijentalnog doznog ekvivalenta $H^*(10)$ u standardnim jedinicama mikro-siverta po času ($\mu\text{Sv/h}$).

7.5.1 Opis eksperimentalnog postupka i mernih kondicija

Procedura kalibracije realizovana je komparativnom (poredbenom) metodom unutar stabilnog radijacionog polja rendgen sale, u odsustvu unutrašnjih programskih veza između mernih komponenti sistema. Kao sekundarni laboratorijski etalon visoke klase tačnosti korišćena je profesionalna prenosna jonizaciona komora Fluke 451B. Ovaj instrument poseduje ugrađeni režim rada za zamrzavanje vršne vrednosti (*Freezing Mode*), koji omogućava precizno zadržavanje i očitavanje maksimalne registrovane jačine dozne stope tokom ultra-kratkih tranzijentnih ekspozicija, što ga čini idealnim za kalibraciju u pulsnim poljima rendgenskih aparata.

Geometrijski raspored mernog lanca postavljen je tako da su svi razvijeni bežični čvorovi (Čvor 1, Čvor 2, Čvor 3 i Čvor 4) i referentna sonda jonizacije komore Fluke 451B pozicionirani na identičnoj, fiksnoj udaljenosti od fokusa rendgenske cevi, čime je obezbeđen homogen fluks fotona kočnog zakočnog zračenja kroz sve aktivne detekcione medijume istovremeno. Tokom eksperimenta, jačina struje na cevi održavana je na stabilnoj konstantnoj vrednosti od **100 mA**, uz trajanje ekspozicionog impulsa od **200 ms**. Kalibraciona matrica je snimljena sukcesivnom promenom nominalnog napona ubrzanja cevi kroz tri karakteristične dijagnostičke tačke: **60 kV, 70 kV i 80 kV**.

7.5.2 Rezultati poredbenih merenja i analiza kalibracione matrice

Prilikom vršne ekspozicije na naponu od 80 kV, etalonski instrument Fluke 451B zabeležio je i fiksirao referentnu jačinu ambijentalne dozne stope od tačno **300.00 $\mu\text{Sv/h}$** . Istovremeno, centralna SCADA stanica je kroz asinhroni prenos registrovala stabilne i reproduktivne CPM vrednosti sa svih perifernih jedinica. Fini proračun kalibracionog koeficijenta (K) za svaki specifični čvor vrši se prema sledećem mernom izrazu:

$$K_i = \frac{\text{CPM}_i}{H^*(10)_{\text{Fluke}}} \quad (12)$$

gde CPM_i predstavlja eksperimentalno izmerenu brzinu brojanja i -tog čvora u mernom prozoru, dok je $H^*(10)_{\text{Fluke}}$ referentna jačina dozne stope očitana sa ekrana jonizacije komore Fluke 451B, izražena u $\mu\text{Sv/h}$.

Sve prikupljene eksperimentalne vrednosti i brzine brojanja raspoređene su unutar kalibracione matrice prikazane u Tabeli 8.1. Ova tabela hronološki upoređuje odzive svih sonde u funkciji promena napona cevi, pri čemu su izračunati koeficijenti konverzije (K_i) pozicionirani na samom dnu tabele, fiksirani pojedinačno ispod odgovarajuće kolone svakog mernog čvora.

Tabela 7.1 – Uporedna matrica kalibracionih merenja sonde i proračuna koeficijenata konverzije (Struja: 100 mA, Trajanje: 200 ms)

Napon cevi [kV]	Doza Fluke 451B [$\mu\text{Sv/h}$]	Čvor 1 - BPW34S [CPM]	Čvor 2 - IHTM FD80 [CPM]	Čvor 3 - Inspector [CPM]	Čvor 4 - Rainbow [CPM]
60 kV	120.00	18.00	18.00	42.00	149.50
70 kV	210.00	31.50	31.50	73.50	261.60
80 kV	300.00	45.00	45.00	105.00	373.80
Izračunato K	Faktor deljenja	$K_1 = 0.15$	$K_2 = 0.15$	$K_3 = 0.35$	$K_4 = 1.246$

Kao što se uočava analizom podataka iz Tabele 8.1, primenom kalibracione formule na vršnu mernu tačku od 80 kV i dozu od 300.00 $\mu\text{Sv/h}$, izvedene su različite vrednosti faktora konverzije. Za Čvor 1 sa paralelno vezanim komercijalnim fotodiodama BPW34S i Čvor 2 sa masivnom domaćom fotodiodom IHTM FD80, dobijene su stope od 45.00 CPM, što daje koeficijente od $K_1 = 0.15$ odnosno $K_2 = 0.15$. Za Čvor 3 sa gasnim Geiger-Müller detektorom, stopa brojanja iznosi 105.00 CPM, te je koeficijent proračunat na vrednost $K_3 = 0.35$. Kod Čvora 4, usled visoke kvantne efikasnosti i masivnog aktivnog volumena neorganskog NaI(Tl) scintilacionog kristala Rainbow MCA uređaja, stopa integrisanih impulsa iznosi 373.80 CPM, te izvedeni koeficijent iznosi $K_4 = 1.246$. Različitoost ovih koeficijenata, jasno izdvojenih u poslednjem redu Tabele 8.1, direktno odražava specifičnosti geometrijskih zapremina i unutrašnje efikasnosti detekcije svakog pojedinačnog mernog medijuma unutar istog polja zračenja.

7.5.3 Integracija koeficijenata u kod prijemnika i softverski proračun doze

Izračunati eksperimentalni koeficijenti konverzije ugrađuju se direktno u izvorni kod centralnog prijemnika (Arduino Mega 2560) u vidu fiksne globalne matrice koja glasi:

```
const float nizKoeficijenata[] = {150.0, 150.0, 350.0, 1246.1}; (13)
```

Pošto se u kodu mikrokontrolera radi sa realnim brojevima tipa `float`, radi očuvanja

maksimalne matematičke preciznosti i izbegavanja operacija sa decimalnim zarezom koje mogu opteretiti procesor, faktori su skalirani množenjem sa 1000, postajući neposredni delioci brzine brojanja.

Unutar glavne izvršne petlje `loop()` Arduina Mega, softverski algoritam u svakom prolasku prihvata prispeli paket, identifikuje `idDetektora` i automatski vrši trenutni proračun jačine ambijentalnog doznog ekvivalenta u realnom vremenu prema sledećoj programskoj formuli:

$$nizDoza[indeksNiza] = (float)trenutniCPM/nizKoeficijenata[indeksNiza]; \quad (14)$$

Tako dobijeni podaci u $\mu\text{Sv/h}$ se trenutno projektuju na lokalnom LCD displeju i preko tačka-zarez separatorom upisuju u datoteku `log.txt` na MicroSD kartici. Prilikom kasnijeg prebacivanja mernog dnevnika na personalni kompjuter, Visual Basic 6.0 SCADA softver kroz OLE automatizaciju povuči ove precizne vrednosti, i unutar Microsoft Excel platforme automatski računa kumulativni (integralni) dozni teret deljenjem jačine doze sa vremenskim faktorom od 3600 sekundi, generišući tačne merne krive odziva.

7.6 PC SCADA SOFTVERSKA PLATFORMA (VISUAL BASIC 6.0)

U ovom poglavlju detaljno se analiziraju unutrašnja arhitektura, princip funkcionisanja i korisničko uputstvo za namensku Windows PC SCADA aplikaciju razvijenu u programskom jeziku **Visual Basic 6.0**. Softver obezbeđuje završni nivo akvizicije, asinhronog preuzimanja radijacionih dnevnika sa prijemnika, lokalnu vizuelizaciju i automatsku obradu podataka kroz Microsoft Excel platformu .

7.6.1 Princip rada softverskog koda i upravljačkih drajvera

Programski algoritam aplikacije dizajniran je na bazi događajnog programiranja (*Event-Driven Programming*) i operiše kroz fiksne sekvencijalne korake obrade serijskog toka podataka .

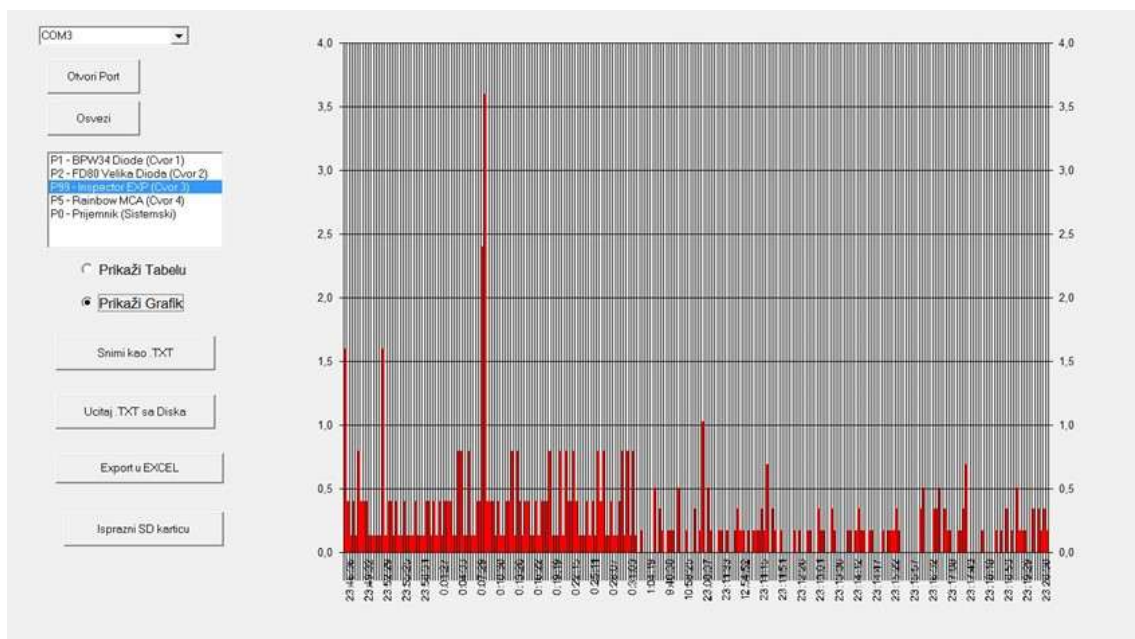
Unutrašnja arhitektura koda funkcioniše kroz sledeće programske celine:

1. **Inicijalizacija i kontrola hardverskog porta:** Za komunikaciju sa centralnim prijemnikom (Arduino Mega 2560) softver koristi MSComm ActiveX drajversku komponentu. Prilikom pokretanja, drajver otvara izabrani serijski port (COM) i

fiksira brzinu prenosa na **57600 bauda**, sa 8 bitova podataka, bez parnosti i sa jednim stop bitom (57600,N,8,1).

2. **Asinhroni blok-prijem i "Tajmer tišine"**: Da bi se sprečilo kočenje i pad aplikacije tokom prenosa masivnih tekstualnih dnevnika iz flash memorije prijemnika, softver koristi autorski algoritam za blok-prijem u letu. Klikom na komandu za preuzimanje, program šalje jednokarakternu ASCII naredbu **"D"** naniže kroz USB kabl . Arduino Mega prepoznaje komandu, stopira radio-saobraćaj i otpočinje strimovanje redova iz datoteke `log.txt` . Visual Basic asinhrono prihvata pristigle bajtove u privremeni bafer, a ugrađeni softverski „Tajmer tišine” konstantno meri vreme između dva pristigla karaktera. Tek kada nastupi pauza u prenosu od punih **2.5 sekunde**, tajmer detektuje kraj datoteke (*EOF - End of File*), bezbedno zaključava globalni string `KompletanLog` i ponovo oslobađa korisnički interfejs .
3. **Lokalno filtriranje podataka (Parser)**: Nakon uspešnog završetka prenosa, aktivira se unutrašnja funkcija `OsveziPrikaz` . Ovaj drajver koristi funkciju `Split` da bi masivni string razbio na pojedinačne hronološke linije na osnovu oznake za kraj reda (`\n`). Unutar `For` petlje, svaka linija se ponovo deli na merna polja pomoću fabričkog separatora tačka-zarez (;) . Program analizira identifikacioni kod detektora (`Delovi(2)`) – ukoliko detektuje oznaku `P99` , automatski izdvaja podatke za Čvor 3 (Inspector EXP), dok klikom na stavku u meniju `IstDetektori_Click()` trenutno osvežava ekran, prazni staru matricu i crta tabelu ili linijski grafik za novoselektovanu sondu .
4. **OLE automatizacija sa MS Excel platformom**: Klikom na dugme za izvoz pokreće se kasno vezivanje (*Late Binding*) sa Excel objektom preko komande `CreateObject("Excel.Application")` . Softver programski kreira radnu svesku sa tačno 7 praznih laboratorijskih listova (jezičaka) i simultano ih puni sortiranim podacima . Da bi se izbegla fatalna greška `1004` usled regionalnih podešavanja operativnog sistema, opseg za grafikone se ne zadaje preko zareza, već program generiše novu čistu seriju podataka (`SeriesCollection.NewSeries`) i eksplicitno je povezuje sa ćelijama kolona vremena (B) i doze (E) obmotavajući ime svakog

jezička jednostrukim navodnicima (npr. 'D3 - Inspector EXP'). Na dnu koda, petlja izvršava naredbu `AutoFit` na svim kolonama od A do I, čime se trajno uklanja vizuelna blokada sa crticama `###` i kolona vremena prikazuje u punom formatu `hh:mm:ss` .



Slika 7.27 VB6 Program za prenos podataka sa SD memorijske kartice na PC.

7.6.2 Korisničko uputstvo za upravljanje i rad sa SCADA aplikacijom

Rad sa softverskim mernim kompleksom na personalnom kompjuteru je maksimalno pojednostavljen i odvija se kroz četiri stroga i formalna koraka mernog protokola (Slika 7.27):

1. **Pokretanje sistema i uspostavljanje USB veze:** Povežite centralni prijemnik sa personalnim računarom pomoću USB kabla. Pokrenite izvršni fajl aplikacije (`SCADA_Radiometar.exe`). U padajućem meniju izaberite odgovarajući COM port na koji je prijemnik hardverski alociran u operativnom sistemu Windows. Kliknite na dugme „**Otvori Port**”. Zeleni indikator na ekranu potvrđuje da je veza uspešno uspostavljena i da je serijska linija na 57600 bauda otvorena .
2. **Lokalni nadzor i promena mernih kanala:** Softver odmah otpočinje sa pasivnim praćenjem mernog saobraćaja. U desnom delu ekrana nalazi se meni sa listom

aktivnih sonde (IstDetektori). Klikom miša na željenu stavku (npr. Čvor 2: IHTM FD80 ili Čvor 4: Rainbow MCA), aplikacija u milisekundi vrši promenu mernog kanala. Preko kružnih preklopnika (Option Buttons) operater bira režim prikaza na ekranu: selekcijom opcije „Tabela” aktivira se mrežni prikaz mernih redova u realnom vremenu, dok se selekcijom opcije „Grafik” podiže linijski dijagram vremenskog profila odabrane sonde.

3. **Pokretanje prenosa dnevnika zračenja (Data Dump):** Kada je eksperiment u rendgen sali završen, kliknite na namensko dugme „Preuzmi dnevnik merenja”. Cursor miša će poprimiti oblik peščanog sata (Hourglass), a na LCD ekranu Arduina Mega ispisaće se obaveštenje da je prenos u toku. Sačekajte da softver automatski obradi bafer i da „Tajmer tišine” potvrdi uspešan prijem. Nakon završenog prenosa, na ekranu računara pojaviće se potvrda o veličini preuzetog radijacionog dnevnika u bajtovima.
4. **Generisanje automatskog Excel izveštaja:** Kliknite na dugme „Eksportuj u Excel”. Softver će automatski pokrenuti Microsoft Excel u pozadini, kreirati 7 laboratorijskih jezičaka, rasporediti merne tačke i formirati uokvirene **Metrološke panele** u visini očiju na desnoj strani radnog lista, gde formule automatski računaju integralnu primljenu dozu u mikro-sivertima (μSv) i temperaturene ekstreme. Program samostalno završava proces, širi sve kolone i na ekranu projektuje gotov izveštaj sa pojedinačnim i sumarnim grafikonima, spreman za trenutno štampanje i arhiviranje.

7.6.3 OLE automatizacija Microsoft Excel-a i proračun parametara

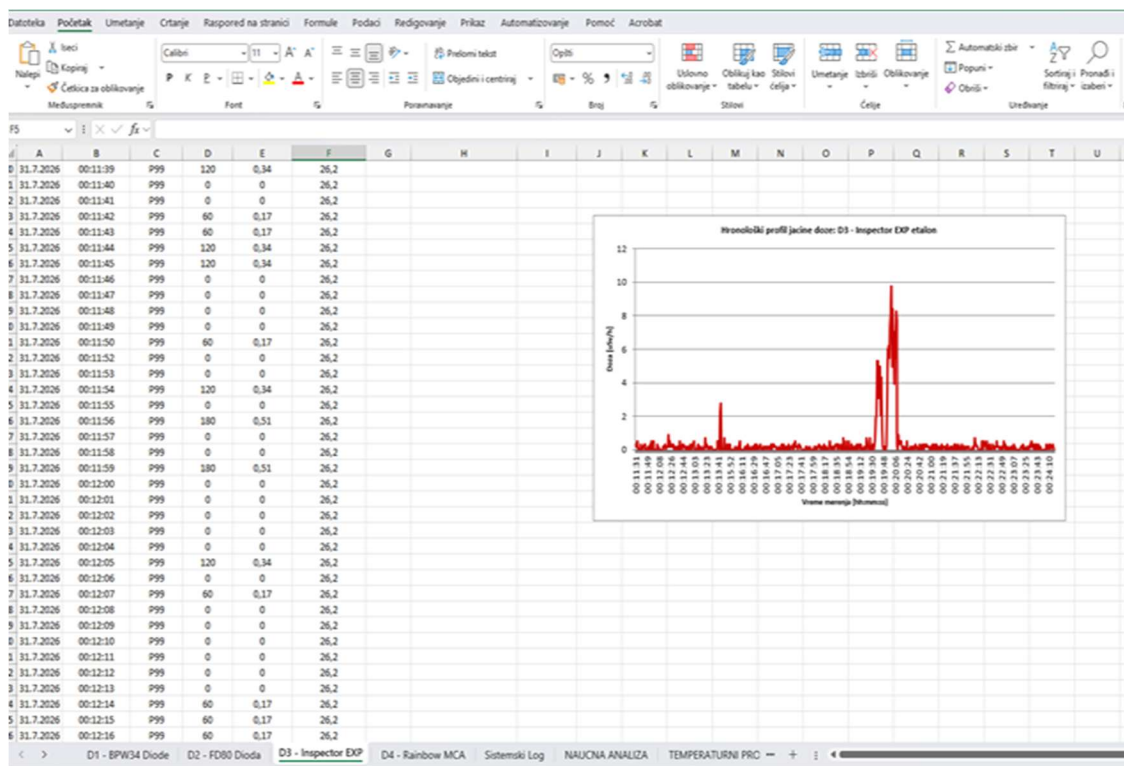
Nakon uspešnog punjenja globalne promenljive `KompletanLog`, klikom na dugme aktivira se podsistem za **OLE (Object Linking and Embedding) automatizaciju**. VB6 aplikacija programski pokreće instancu Microsoft Excel-a, kreira novu radnu svesku i generiše ukupno **šest nezavisnih radnih listova (jezičaka)**: prva četiri za razvrstane merne čvorove (D1, D2, D3, D4), peti za sistemski rad baze, i šesti za komparaciju. Na Slici 7.28 i 7.29 vidi se izgled Excel dokumenta koji je generisan **OLE (Object Linking and Embedding) automatizacijom** iz podataka koji su preuzeti sa SD kartice iz fajla LOG.txt. Softver dinamički prepoznaje kraj unutrašnjih kolona za svaki detektor i u redove ispod automatski upisuje složene matematičke formule. Za potrebe fizičke analize i procene

radijacionog rizika, vrši se automatski proračun tri parametra:

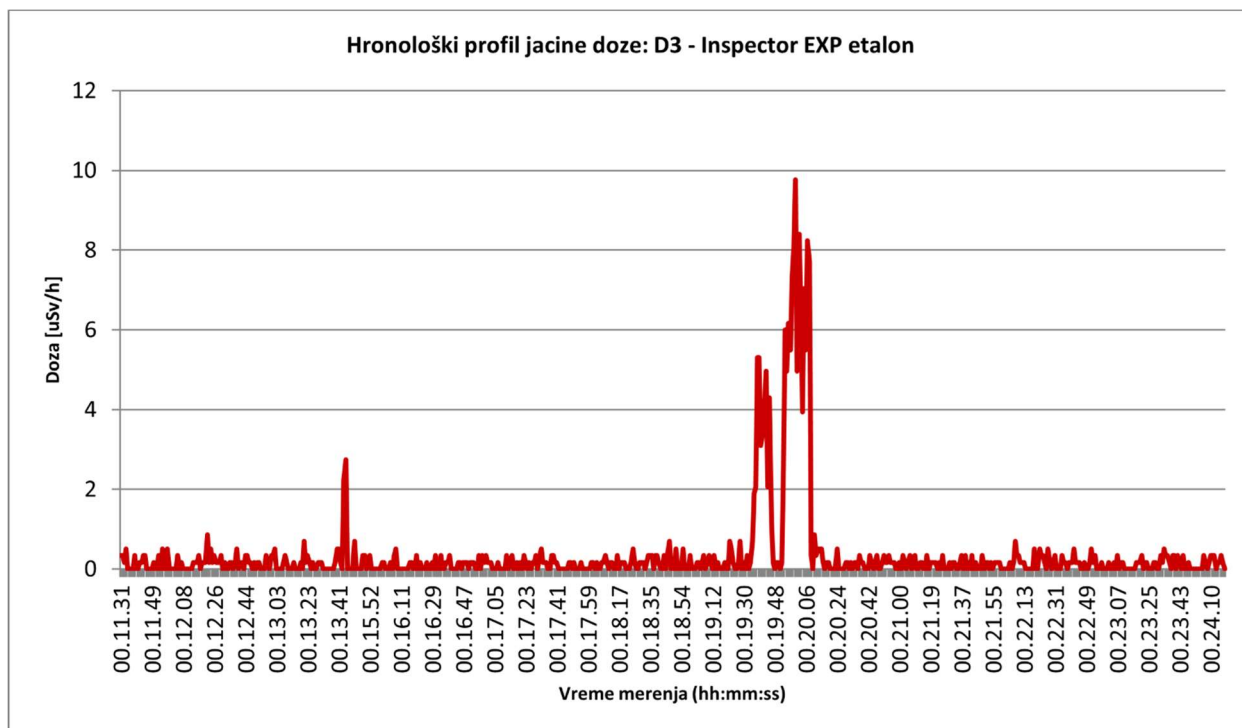
1. **Prosečan CPM:** Izračunava se preko funkcije `=AVERAGE (D2:D[ZadnjiRed])`.
2. **Maksimalni pik:** Određuje se lociranjem vršne vrednosti preko formule `=MAX (E2:E[ZadnjiRed])`.
3. **Integralni dozni teret E_{int} :** S obzirom na to da naša WSN mreža "rešeta" podatke u striktnim vremenskim prozorima od 1 sekunde, ukupna apsorbovana ambijentalna ekvivalentna doza u mikro-sivertima (μSv) dobija se integracijom dozne stope po vremenu. Softver na dno kolone upisuje formulu koja sumira sve tačke i deli ih sa brojem sekundi u satu:

$$E_{int} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Doza}}{3600} \quad (14)$$

$$\text{Excel formula: SUM(E2:e[ZadnjiRed])/3600} \quad (15)$$



Slika 7.28 Izgled Excel datoteka sa jezičcima (tab) – Inspektor EXP



Slika 7.29 Grafik promene doze u vremenu za čvor 3 – Inspector EXP

7.6.4 Kompletan softverski kod SCADA PC aplikacije

U nastavku je prikazan kompletan, pročišćen i stopostotno integrisan kod forme, koji sadrži logiku hardverskog preusmeravanja preko tajmera tišine, direktno interfejsno otvaranje datoteka preko Windows File Managera i automatski Excel eksport :

```
' =====
' GLOBALNE PROMENLJIVE SCADA SISTEMA
' =====
Dim KompletanLog As String
Dim PrivremeniBafer As String
Dim CiljnaVelicina As Long

Private Sub cmdObrisiSD_Click()
    Dim Odgovor As VbMsgBoxResult
    Odgovor = MsgBox("PAZNJA! Ova komanda trajno briše podatke sa SD
kartice na prijemniku.", _
vbYesNo + vbWarning + vbDefaultButton2, "Potvrda
brisanja")
    If Odgovor = vbNo Then Exit Sub

    On Error Resume Next
    If MSComm1.PortOpen = True Then MSComm1.PortOpen = False
    Err.Clear

    MSComm1.CommPort = Cint(Replace(cmbCOM.Text, "COM", ""))
    MSComm1.Settings = "57600,N,8,1"
    MSComm1.RThreshold = 1 ' Slušaj odmah
```

```
MSComm1.InputLen = 0
MSComm1.PortOpen = True

If Err.Number <> 0 Then
    MsgBox "Nemoguće uspostaviti vezu!", vbCritical, "Greška"
    Exit Sub
End If
On Error GoTo 0

Dim PocetnoVreme As Double
PocetnoVreme = Timer
Do While Timer < PocetnoVreme + 2.5
    DoEvents
Loop

Dim Otpad As String
If MSComm1.InBufferCount > 0 Then Otpad = MSComm1.Input

KompletanLog = ""
PrivremeniBafer = ""
InicijalizujTabelu
Chart1.RowCount = 0
'Chart1.Data = 0
Napredak.Value = 0

' --- KLJUCNA IZMENA ZA BRISANJE ---
' Gasimo tajmer tišine jer cemo brisanje završiti direktno preko reci
OBRISANO unutar OnComm!
TajmerCekanja.Enabled = False

' ŠALJEMO NAREDBU MEGI ZA BRISANJE
MSComm1.Output = "B"

' Kreiramo brzu unutrašnju petlju koja strpljivo ceka potvrdu od
Arduina bez rušenja aplikacije
Dim StoperZastite As Double
StoperZastite = Timer
Do While (InStr(PrivremeniBafer, "OBRISANO") = 0) And (Timer -
StoperZastite < 6)
    ' Ucitavamo prispela slova u hodu
    If MSComm1.InBufferCount > 0 Then
        PrivremeniBafer = PrivremeniBafer & MSComm1.Input
    End If
    DoEvents ' Dozvoljava Windowsu da osvežava ekran i ne zamrzne
program
Loop

' Fizicki zatvaramo port
If MSComm1.PortOpen = True Then MSComm1.PortOpen = False

' Vracamo dugmad u funkciju
cmdPovezi.Enabled = True
cmdObrisiSD.Enabled = True
cmbCOM.Enabled = True
cmdOsvezi.Enabled = True

If InStr(PrivremeniBafer, "OBRISANO") > 0 Then
    MsgBox "SD kartica na prijemu je uspešno ispražnjena i
formatirana preko O_TRUNC!", vbInformation, "Uspeh brisanja"
Else
    MsgBox "Komanda je poslata, ali potvrda je istekla. Proverite
```

```
stanje na displeju Mege.", vbExclamation, "Tajmout brisanja"
End If

PrivremeniBafer = ""
End Sub

Private Sub cmdSnimiNaDisk_Click()
    If KompletanLog = "" Then
        MsgBox "Nema podataka za snimanje! Prvo preuzmite dnevnik sa
prijemnika.", vbExclamation, "Upozorenje"
        Exit Sub
    End If

    Dim PutanjaFajla As String
    Dim SlobodanFajlNum As Integer

    ' Konfiguracija Windows prozora za snimanje fajla (Save As)
    On Error Resume Next
    CD1.CancelError = True ' Omogucava hvatanje klika na "Cancel"
    CD1.InitDir = App.Path ' Podrazumevano otvara folder gde je Vaš
program
    CD1.Filter = "Tekstualni dnevnici (*.txt)|*.txt"
    CD1.DialogTitle = "Snimite radijacioni dnevnik na hard disk"

    ' Kao predlog naziva fajla nudimo rec "Dnevnik_" sa trenutnim
datumom,
    ' ali Vi ovo možete potpuno obrisati i ukucati npr.
"RendgenAgfa24032026"
    CD1.FileName = "Dnevnik_" & Format(Now, "dd_mm_yyyy") & ".txt"

    ' Otvaramo klasican Windows prozor za snimanje (ShowSave)
    CD1.ShowSave

    ' Ako je korisnik odustao i kliknuo na "Cancel", prekidamo funkciju
mirno
    If Err.Number = cdlCancel Then
        Err.Clear
        Exit Sub
    End If
    On Error GoTo 0

    ' Preuzimamo punu putanju i naziv fajla koji je korisnik ukucao i
odabrao
    PutanjaFajla = CD1.FileName

    If PutanjaFajla = "" Then Exit Sub

    On Error GoTo GreskaUpisa

    ' Otvaramo fajl na disku i upisujemo sav sadržaj odjednom
    SlobodanFajlNum = FreeFile
    Open PutanjaFajla For Output As #SlobodanFajlNum
        Print #SlobodanFajlNum, KompletanLog
    Close #SlobodanFajlNum

    MsgBox "Tekstualna arhiva uspešno sacuvana!" & vbCrLf & _
        "Naziv fajla: " & PutanjaFajla, vbInformation, "Arhiviranje
uspešno"
```

```
Exit Sub

GreskaUpisa:
    MsgBox "Greška pri upisu na hard disk: " & Err.Description,
vbCritical, "Greška"
    If SlobodanFajlNum > 0 Then Close #SlobodanFajlNum
End Sub

Private Sub cmdUcitajFajl_Click()
    Dim PutanjaFajla As String
    Dim SlobodanFajlNum As Integer
    Dim LinijaKoda As String

    ' Konfiguracija Windows prozora za izbor fajlova (File Manager)
    On Error Resume Next
    CD1.CancelError = True ' Omogucava hvatanje klika na dugme "Cancel"
    CD1.InitDir = App.Path ' Podrazumevano otvara folder gde je Vas
program
    CD1.Filter = "Tekstualni dnevnici (*.txt)|*.txt|Svi fajlovi
(*.*)|*.*"
    CD1.DialogTitle = "Izaberite radijacioni dnevnik za analizu"

    ' Otvaramo klasican Windows prozor za koriscenje (ShowOpen)
    CD1.ShowOpen

    ' Ako je korisnik kliknuo na "Cancel", prekidamo funkciju bez panike
    If Err.Number = cdlCancel Then
        Err.Clear
        Exit Sub
    End If
    On Error GoTo 0

    ' Puzdaano preuzimamo punu putanju fajla koji je korisnik izabrao
klikom
    PutanjaFajla = CD1.FileName

    ' Ako iz nekog razloga putanja ostane prazna, izlazimo
    If PutanjaFajla = "" Then Exit Sub

    On Error GoTo GreskaUcitavanja

    ' Inicijalizujemo i praznimo ekrane pre punjenja novim podacima
    KompletanLog = ""
    InicijalizujTabelu
    Chart1.RowCount = 1
    Chart1.Data = 0

    ' Otvaramo izabrani fajl sa hard diska i usisavamo ga u memoriju
    SlobodanFajlNum = FreeFile
    Open PutanjaFajla For Input As #SlobodanFajlNum
        Do While Not EOF(SlobodanFajlNum)
            Line Input #SlobodanFajlNum, LinijaKoda
            ' Sklapamo KompletanLog sa oznakama za novi red
            KompletanLog = KompletanLog & LinijaKoda & vbCrLf
        Loop
    Close #SlobodanFajlNum

    ' USPEH! Podaci su u memoriji, isto kao da su preleteli sa SD
kartice!
    MsgBox "Uspesno ucitan fajl:" & vbCrLf & PutanjaFajla, vbInformation,
"Arhiva spremna"
```

```
' AUTOMATSKI ODMAH AKTIVIRAMO PRIKAZ TABELE I ISCRTAVANJE GRAFIKONA!
OsveziPrikaz

Exit Sub

GreskaUcitavanja:
    MsgBox "Greska pri otvaranju i citanju fajla: " & Err.Description,
vbCritical, "Greska"
    If SlobodanFajlNum > 0 Then Close #SlobodanFajlNum
End Sub

' =====
' 1. FORM LOAD INICIJALIZACIJA (Sve spakovano na jedno mesto)
' =====
Private Sub Form_Load()
    ' Punjenje menija za selekciju detektora prema Vasim hardverskim ID
    brojevima
    lstDetektori.Clear
    lstDetektori.AddItem "P1 - BPW34 Diode (Cvor 1)"
    lstDetektori.AddItem "P2 - FD80 Velika Dioda (Cvor 2)"
    lstDetektori.AddItem "P99 - Inspector EXP (Cvor 3)"
    lstDetektori.AddItem "P5 - Rainbow MCA (Cvor 4)"
    lstDetektori.AddItem "P0 - Prijemnik (Sistemi)"
    lstDetektori.ListIndex = 2 ' Podrazumevano selektujemo Inspector EXP
    (P99)

    optTabela.Value = True ' Podrazumevano prikazujemo tabelu

    ' Osiguravamo da je nas novi tajmer za tisinu ISKLJUCEN pri paljenju
    programa!
    TajmerCekanja.Enabled = False
    TajmerCekanja.Interval = 1500 ' 1.5 sekunda tisine pre okidanja kraja

    ' Postavljanje pocetnih dimenzija i zaglavlja tabele
    InicijalizujTabelu

    ' Automatsko skeniranje Windows registra i pronalazenje aktivnog USB
    COM porta
    SkenirajCOMPortove

    ' Fiksiramo tabelu i grafik jedan preko drugog
    Grid1.Visible = True
    Chart1.Visible = False
End Sub

Public Sub InicijalizujTabelu()
    Grid1.Cols = 6
    Grid1.Rows = 1
    Grid1.TextMatrix(0, 0) = "Datum"
    Grid1.TextMatrix(0, 1) = "Vreme"
    Grid1.TextMatrix(0, 2) = "Detektor ID"
    Grid1.TextMatrix(0, 3) = "Sirovi CPM"
    Grid1.TextMatrix(0, 4) = "Doza (uSv/h)"
    Grid1.TextMatrix(0, 5) = "Temperatura (C)"

    Grid1.ColWidth(0) = 1200
    Grid1.ColWidth(1) = 1200
    Grid1.ColWidth(2) = 1400
```

```
Grid1.ColWidth(3) = 1400
Grid1.ColWidth(4) = 1500
Grid1.ColWidth(5) = 1600
End Sub

' =====
' 2. AUTOMATSKO SKENIRANJE WINDOWS PORTOVA
' =====
Private Sub SkenirajCOMPortove()
    Dim i As Integer
    cmbCOM.Clear
    On Error Resume Next

    For i = 1 To 20
        MSComm1.CommPort = i
        MSComm1.PortOpen = True

        If Err.Number = 0 Or Err.Number = 8005 Then
            cmbCOM.AddItem "COM" & i
            If MSComm1.PortOpen = True Then MSComm1.PortOpen = False
        End If
        Err.Clear
    Next i
    On Error GoTo 0

    If cmbCOM.ListCount > 0 Then
        cmbCOM.ListIndex = 0
        cmdPovezi.Enabled = True
    Else
        cmbCOM.AddItem "Nema portova"
        cmbCOM.ListIndex = 0
        cmdPovezi.Enabled = False
    End If
End Sub

Private Sub cmdOsvezi_Click()
    SkenirajCOMPortove
    MsgBox "Lista aktivnih COM portova je uspesno azurirana!",
vbInformation, "Mreža osvežena"
End Sub

' =====
' 3. ZLATNA SREDNJA BRZINA OD 57600 BAUDA ZA OTVARANJE PORTA
' =====
Private Sub cmdPovezi_Click()
    On Error Resume Next
    If cmbCOM.Text = "Nema portova" Then Exit Sub
    If MSComm1.PortOpen = True Then MSComm1.PortOpen = False
    Err.Clear

    ' Konfiguracija za bezbedan industrijski blok-prijem u letu
    MSComm1.CommPort = CInt(Replace(cmbCOM.Text, "COM", ""))
    MSComm1.Settings = "57600,N,8,1"
    MSComm1.RThreshold = 0
    MSComm1.InputLen = 0

    MSComm1.PortOpen = True

    If Err.Number <> 0 Then
        MsgBox "Greska pri otvaranju porta! Proverite USB vezu.",
vbCritical, "Greska"
```

```
Exit Sub
End If
On Error GoTo 0

' Pauza za stabilizaciju Mege nakon reseta
Dim PocetnoVreme As Double
PocetnoVreme = Timer
Do While Timer < PocetnoVreme + 2.5
    DoEvents
Loop

' Cišćenje šuma u žicama
Dim Otpad As String
If MSComm1.InBufferCount > 0 Then Otpad = MSComm1.Input

' Inicijalizacija memorije racunara
KompletanLog = ""
PrivremeniBafer = ""

' Postavljamo fiksnu granicu Progress Bara na bezbednih 100.000
Napredak.Value = 0
Napredak.Max = 100000

TajmerCekanja.Enabled = False
MSComm1.Output = "D"

cmdPovezi.Enabled = False
cmdObrisiSD.Enabled = False
cmbCOM.Enabled = False
cmdOsvezi.Enabled = False

' --- INDUSTRIAL DO-WHILE PETLJA CEKANJA SA PRAŽNENJEM U LETU ---
Dim StoperTisine As Double
Dim PrethodniBrojBajtova As Long
StoperTisine = Timer

Do While Timer - StoperTisine < 2.5
    If MSComm1.InBufferCount > 0 Then
        ' Odmah usisavamo i praznimo hardverski bafer Windowsa u
        letu!
        PrivremeniBafer = PrivremeniBafer & MSComm1.Input
        StoperTisine = Timer

        ' Štit od greške 380 za Progress Bar
        If Len(PrivremeniBafer) <= Napredak.Max Then
            Napredak.Value = Len(PrivremeniBafer)
        Else
            Napredak.Value = Napredak.Max
        End If
    End If
    DoEvents
Loop

' Fizicki zatvaramo port u Windowsu
If MSComm1.PortOpen = True Then MSComm1.PortOpen = False

cmdPovezi.Enabled = True
cmdObrisiSD.Enabled = True
cmbCOM.Enabled = True
cmdOsvezi.Enabled = True
```

```
' Cistimo eventualne zaostale sistemske oznake
PrivremeniBafer = Replace(PrivremeniBafer, "EOF", "", , ,
vbTextCompare)
PrivremeniBafer = Replace(PrivremeniBafer, "OBRISANO", "", , ,
vbTextCompare)
PrivremeniBafer = Trim(PrivremeniBafer)

' KONACNA DODELA: Prebacujemo sve u globalni sakupljac!
KompletanLog = PrivremeniBafer
PrivremeniBafer = ""

Napredak.Value = 0
Napredak.Max = 100

If Len(KompletanLog) < 15 Then
    KompletanLog = ""
    InicijalizujTabelu
    Chart1.RowCount = 0
    MsgBox "Citanje završeno! SD kartica na prijemniku je prazna (0.0
KB).", vbInformation, "SD Kartica Prazna"
Else
    MsgBox "Uspesno preuzeto " & Format(Len(KompletanLog) / 1024,
"0.0") & " KB podataka sa SD kartice!", vbInformation, "Prenos završen"
    ' ODMAH POKRECEMO JAVLJANJE NA EKRAN!
    OsveziPrikaz
End If
End Sub

Private Sub lstDetektori_Click()
OsveziPrikaz
End Sub

' =====
' 4. ONCOMM REŽIM KOJI ODLAŽE TAJMER TIŠINE I PUNi BAFER
' =====
Private Sub MSComm1_OnComm()

End Sub

' =====
' 5. SAMOSTALNI TAJMER OKIDAC (Pali se 1.5 sekundu NAKON zadnjeg bajta)
' =====
Private Sub TajmerCekanja_Timer()

End Sub

' =====
' 6. LOGIKA UPRAVLJANJA OPTION DUGMADIMA I MENIJEM
' =====

Private Sub optTabela_Click()
    Grid1.Visible = True
    Chart1.Visible = False
    OsveziPrikaz
End Sub

Private Sub optGrafik_Click()
    Grid1.Visible = False
    Chart1.Visible = True
    OsveziPrikaz
```

```
End Sub

' =====
' 7. GLAVNI PARSER ZA FILTER I CRTANJE (Uklonjen grcki upitnik!)
' =====
Private Sub OsveziPrikaz()
    If KompletanLog = "" Then Exit Sub

    Dim OznakaTrazenogDetektora As String
    Dim Linije() As String
    Dim Delovi() As String
    Dim i As Long, NoviRed As Long
    Dim TekstZaAnalizu As String

    TekstZaAnalizu = KompletanLog

    Select Case lstDetektori.ListIndex
        Case 0: OznakaTrazenogDetektora = "P1"
        Case 1: OznakaTrazenogDetektora = "P2"
        Case 2: OznakaTrazenogDetektora = "P99"
        Case 3: OznakaTrazenogDetektora = "P5"
        Case 4: OznakaTrazenogDetektora = "PRIJEMNIK_BUDAN"
    End Select

    InicijalizujTabelu
    Linije = Split(TekstZaAnalizu, vbCrLf)
    Grid1.Redraw = False

    For i = 0 To UBound(Linije)
        If Trim(Linije(i)) <> "" And InStr(Linije(i), ";") > 0 Then
            Delovi = Split(Linije(i), ";")
            If UBound(Delovi) >= 5 Then
                If Trim(Delovi(2)) = OznakaTrazenogDetektora Then
                    Grid1.Rows = Grid1.Rows + 1
                    NoviRed = Grid1.Rows - 1
                    Grid1.TextMatrix(NoviRed, 0) = Delovi(0)
                    Grid1.TextMatrix(NoviRed, 1) = Delovi(1)
                    Grid1.TextMatrix(NoviRed, 2) = Delovi(2)
                    Grid1.TextMatrix(NoviRed, 3) = Delovi(3)
                    Grid1.TextMatrix(NoviRed, 4) = Delovi(4)
                    Grid1.TextMatrix(NoviRed, 5) = Delovi(5)
                End If
            End If
        End If
    Next i
    Grid1.Redraw = True

    Dim BrojTacaka As Long
    BrojTacaka = Grid1.Rows - 1

    If BrojTacaka >= 1 Then
        Dim Korak As Integer
        Korak = 1
        If BrojTacaka > 300 Then Korak = Int(BrojTacaka / 300) + 1

        Dim StvarniBrojRedovaGrafika As Long
        StvarniBrojRedovaGrafika = Int(BrojTacaka / Korak)
        If StvarniBrojRedovaGrafika < 1 Then StvarniBrojRedovaGrafika = 1

        Chart1.RowCount = StvarniBrojRedovaGrafika
        Chart1.ColumnCount = 1
    End If
End Sub
```

```
Chart1.Plot.SeriesCollection(1).DataPoints(-1).EdgePen.Width = 3

Dim BrojacGrafika As Long
BrojacGrafika = 1

For i = 1 To BrojTacaka Step Korak
    If BrojacGrafika <= StvarniBrojRedovaGrafika Then
        Chart1.Row = BrojacGrafika
        Chart1.RowLabel = Grid1.TextMatrix(i, 1)
        If OznakaTrazenogDetektora = "PRIJEMNIK_BUDAN" Then
            Chart1.Data = 0
        Else
            Chart1.Data = Val(Grid1.TextMatrix(i, 4))
        End If
        BrojacGrafika = BrojacGrafika + 1
    End If
Next i
Else
    Chart1.RowCount = 0
End If
End Sub

' =====
' 8. VRHUNAC EKSPORTA: INTEGRACIJA U NAMENSKE EXCEL JEZICKE (TAB)
' =====
Private Sub cmdEksport_Click()
    Dim xlApp As Object
    Dim xlBook As Object
    Dim xlSheet As Object
    Dim xlAnalizaSheet As Object
    Dim xlTempSheet As Object
    Dim xlChart As Object
    Dim NovoNiz As Object

    Dim Linije() As String
    Dim Delovi() As String
    Dim i As Long, j As Integer
    Dim RedExcel(0 To 4) As Long
    Dim IndeksLista As Integer
    Dim TekstZaAnalizu As String

    Dim BrojacAnalize As Long
    Dim BrojacTemp As Long
    Dim TekucaTempVrednost As Double
    Dim TrenutnoVremeZaZbirni As String

    ' Lokalne promenljive za pracenje zadnjih poznatih stanja
    (Eliminacija praznina!)
    Dim ZadnjaDoza1 As Double, ZadnjaDoza2 As Double, ZadnjaDoza3 As
    Double, ZadnjaDoza4 As Double
    Dim ZadnjaT1 As Double, ZadnjaT2 As Double, ZadnjaT3 As Double,
    ZadnjaT4 As Double

    ZadnjaDoza1 = 0#: ZadnjaDoza2 = 0#: ZadnjaDoza3 = 0#: ZadnjaDoza4 =
    0#
    ZadnjaT1 = 23.5: ZadnjaT2 = 23.5: ZadnjaT3 = 23.5: ZadnjaT4 = 23.5 '
    Podrazumevani ambijentalni nivo fona

    If Trim(KompletanLog) = "" Then
        MsgBox "Nema podataka za eksport! Prvo preuzmite dnevnik sa
        prijemnika.", vbExclamation, "Upozorenje"
```

```
Exit Sub
End If

Screen.MousePointer = vbHourglass
On Error GoTo GreskaUskladjivanja

TekstZaAnalizu = KompletanLog

Set xlApp = CreateObject("Excel.Application")
xlApp.SheetsInNewWorkbook = 7
Set xlBook = xlApp.Workbooks.Add

xlBook.Worksheets(1).Name = "D1 - BPW34 Diode"
xlBook.Worksheets(2).Name = "D2 - FD80 Dioda"
xlBook.Worksheets(3).Name = "D3 - Inspector EXP"
xlBook.Worksheets(4).Name = "D4 - Rainbow MCA"
xlBook.Worksheets(5).Name = "Sistemiški Log"
xlBook.Worksheets(6).Name = "ANALIZA 4 DETEKTORA"
xlBook.Worksheets(7).Name = "TEMPERATURNI PROFIL"

For j = 1 To 5
    Set xlSheet = xlBook.Worksheets(j)
    xlSheet.Cells(1, 1).Value = "Datum"
    xlSheet.Cells(1, 2).Value = "Vreme"
    xlSheet.Cells(1, 3).Value = "Detektor ID"
    xlSheet.Cells(1, 4).Value = "Sirovi CPM"
    xlSheet.Cells(1, 5).Value = "Doza (uSv/h)"
    xlSheet.Cells(1, 6).Value = "Temperatura (C)"
    xlSheet.Rows(1).Font.Bold = True
    xlSheet.Columns("A:F").HorizontalAlignment = -4108
    RedExcel(j - 1) = 2
Next j

Set xlAnalizaSheet = xlBook.Worksheets(6)
xlAnalizaSheet.Cells(1, 1).Value = "Vreme"
xlAnalizaSheet.Cells(1, 2).Value = "D1 - BPW34 [uSv/h]"
xlAnalizaSheet.Cells(1, 3).Value = "D2 - FD80 [uSv/h]"
xlAnalizaSheet.Cells(1, 4).Value = "D3 - Inspector [uSv/h]"
xlAnalizaSheet.Cells(1, 5).Value = "D4 - Rainbow [uSv/h]"
xlAnalizaSheet.Rows(1).Font.Bold = True
xlAnalizaSheet.Columns("A:E").HorizontalAlignment = -4108
BrojacAnalize = 2

Set xlTempSheet = xlBook.Worksheets(7)
xlTempSheet.Cells(1, 1).Value = "Vreme"
xlTempSheet.Cells(1, 2).Value = "T1 - BPW34 [C]"
xlTempSheet.Cells(1, 3).Value = "T2 - FD80 [C]"
xlTempSheet.Cells(1, 4).Value = "T3 - Inspector [C]"
xlTempSheet.Cells(1, 5).Value = "T4 - Rainbow [C]"
xlTempSheet.Rows(1).Font.Bold = True
xlTempSheet.Columns("A:E").HorizontalAlignment = -4108
BrojacTemp = 2

Linije = Split(TekstZaAnalizu, vbCrLf)
Dim KorakGrafika As Integer
KorakGrafika = 1
If UBound(Linije) > 300 Then KorakGrafika = Int(UBound(Linije) / 300)
+ 1

For i = 0 To UBound(Linije)
    If Trim(Linije(i)) <> "" And InStr(Linije(i), ";") > 0 Then
```

```
Delovi = Split(Linije(i), ";")
If UBound(Delovi) >= 5 Then

    Select Case Trim(Delovi(2))
        Case "P1": IndeksLista = 1
        Case "P2": IndeksLista = 2
        Case "P99": IndeksLista = 3
        Case "P5": IndeksLista = 4
        Case "PRIJEMNIK_BUDAN": IndeksLista = 5
        Case Else: IndeksLista = 0
    End Select

    ' Popunjavanje pojedinačnih listova sonde (Od 1 do 5)
    If IndeksLista > 0 Then
        Set xlSheet = xlBook.Worksheets(IndeksLista)
        Dim TekuciRed As Long
        TekuciRed = RedExcel(IndeksLista - 1)

        xlSheet.Cells(TekuciRed, 1).Value = Delovi(0)
        xlSheet.Cells(TekuciRed, 2).Value = Delovi(1)
        xlSheet.Cells(TekuciRed, 3).Value = Delovi(2)
        xlSheet.Cells(TekuciRed, 4).Value = Val(Delovi(3))
        xlSheet.Cells(TekuciRed, 5).Value = Val(Delovi(4))

        ' Filtriranje anomalije temperature od 85C
        TekucaTempVrednost = Val(Delovi(5))
        If TekucaTempVrednost <> 85# And TekucaTempVrednost >
-40# Then
            xlSheet.Cells(TekuciRed, 6).Value =
TekucaTempVrednost
        Else
            xlSheet.Cells(TekuciRed, 6).Value = ""
        End If

        RedExcel(IndeksLista - 1) = TekuciRed + 1
    End If

    ' --- REVOLUCIONARNI PARSER BEZ PRAZNINA ZA UPORNI
KONTINUALNI GRAFIK ---
    ' Ažuriramo zadnja poznata stanja u letu na osnovu
pristiglog ID-ja
    If Trim(Delovi(2)) = "P1" Then
        ZadnjaDoza1 = Val(Delovi(4))
        If Val(Delovi(5)) <> 85# Then ZadnjaT1 =
Val(Delovi(5))
    End If
    If Trim(Delovi(2)) = "P2" Then
        ZadnjaDoza2 = Val(Delovi(4))
        If Val(Delovi(5)) <> 85# Then ZadnjaT2 =
Val(Delovi(5))
    End If
    If Trim(Delovi(2)) = "P99" Then
        ZadnjaDoza3 = Val(Delovi(4))
        If Val(Delovi(5)) <> 85# Then ZadnjaT3 =
Val(Delovi(5))
    End If
    If Trim(Delovi(2)) = "P5" Then
        ZadnjaDoza4 = Val(Delovi(4))
        If Val(Delovi(5)) <> 85# Then ZadnjaT4 =
Val(Delovi(5))
    End If
```

```
' Zbirne listove punimo simetricno u svakom koraku -
kolone su 100% popunjene i guste!
If (i Mod KorakGrafika) = 0 Then
    TrenutnoVremeZaZbirni = Delovi(1)

    ' Upis kompletnog mernog fronta u JEDAN RED (Nema
više rupa i crtica!)
    xlAnalizaSheet.Cells(BrojacAnalize, 1).Value =
TrenutnoVremeZaZbirni
    xlAnalizaSheet.Cells(BrojacAnalize, 2).Value =
ZadnjaDoza1
    xlAnalizaSheet.Cells(BrojacAnalize, 3).Value =
ZadnjaDoza2
    xlAnalizaSheet.Cells(BrojacAnalize, 4).Value =
ZadnjaDoza3
    xlAnalizaSheet.Cells(BrojacAnalize, 5).Value =
ZadnjaDoza4
    BrojacAnalize = BrojacAnalize + 1

    ' Upis kompletnog temperaturnog fronta u jedan red
    xlTempSheet.Cells(BrojacTemp, 1).Value =
TrenutnoVremeZaZbirni
    xlTempSheet.Cells(BrojacTemp, 2).Value = ZadnjaT1
    xlTempSheet.Cells(BrojacTemp, 3).Value = ZadnjaT2
    xlTempSheet.Cells(BrojacTemp, 4).Value = ZadnjaT3
    xlTempSheet.Cells(BrojacTemp, 5).Value = ZadnjaT4
    BrojacTemp = BrojacTemp + 1
End If

End If
End If
Next i

Dim ZadnjiRed As Long
Dim NaziviSondi(1 To 4) As String
NaziviSondi(1) = "D1 - BPW34S fotodiode"
NaziviSondi(2) = "D2 - FD80 velika fotodioda"
NaziviSondi(3) = "D3 - Inspector EXP etalon"
NaziviSondi(4) = "D4 - Rainbow MCA spektrometar"

For j = 1 To 4
    Set xlSheet = xlBook.Worksheets(j)
    ZadnjiRed = RedExcel(j - 1) - 1

    If ZadnjiRed >= 2 Then
        xlSheet.Cells(2, 8).Value = "METROLOŠKI PANEL CVORA"
        xlSheet.Range("H2:I2").Merge:
xlSheet.Range("H2:I2").Font.Bold = True
        xlSheet.Range("H2:I2").Interior.Color = RGB(220, 230, 242)
        xlSheet.Range("H2:I2").HorizontalAlignment = -4108

        xlSheet.Cells(3, 8).Value = "Integralna Doza (uSv):":
xlSheet.Cells(3, 9).Value = "=SUM(E2:E" & ZadnjiRed & ")/3600"
        xlSheet.Cells(3, 9).Interior.Color = RGB(230, 245, 230)
        xlSheet.Cells(4, 8).Value = "Maksimalni Pik (uSv/h):":
xlSheet.Cells(4, 9).Value = "=MAX(E2:E" & ZadnjiRed & ")"
        xlSheet.Cells(4, 9).Interior.Color = RGB(255, 230, 230)
        xlSheet.Cells(5, 8).Value = "Prosecan CPM fona":
xlSheet.Cells(5, 9).Value = "=AVERAGE(D2:D" & ZadnjiRed & ")"
```

```
xlSheet.Cells(6, 8).Value = "Maksimalna Temp (C):":
xlSheet.Cells(6, 9).Value = "=MAX(F2:F" & ZadnjiRed & ")"
xlSheet.Cells(6, 9).Font.Color = RGB(200, 0, 0)
xlSheet.Cells(7, 8).Value = "Minimalna Temp (C):":
xlSheet.Cells(7, 9).Value = "=MIN(F2:F" & ZadnjiRed & ")"
xlSheet.Cells(7, 9).Font.Color = RGB(0, 0, 200)
xlSheet.Cells(8, 8).Value = "Prosecna Temp (C):":
xlSheet.Cells(8, 9).Value = "=AVERAGE(F2:F" & ZadnjiRed & ")"

xlSheet.Range("H2:I8").Borders.LineStyle = 1
xlSheet.Range("H3:H8").Font.Bold = True:
xlSheet.Range("I3:I8").Font.Bold = True
xlSheet.Range("I3:I8").HorizontalAlignment = -4108

' Pojedinačni grafikoni
Set xlChart = xlSheet.ChartObjects.Add(450, 180, 500, 280)
xlChart.Chart.ChartType = 65 ' 65 = xlLine (Cista i stabilna
kontinualna linija!)

Set NovoNiz = xlChart.Chart.SeriesCollection.NewSeries
NovoNiz.XValues = "=" & xlSheet.Name & "!" & "$B$2:$B$" & ZadnjiRed
NovoNiz.Values = "=" & xlSheet.Name & "!" & "$E$2:$E$" & ZadnjiRed
xlChart.Chart.HasTitle = True
xlChart.Chart.ChartTitle.Text = "Hronološki profil jacine doze: " &
NaziviSondi(j)
xlChart.Chart.ChartTitle.Font.Size = 10
xlChart.Chart.ChartTitle.Font.Bold = True
xlChart.Chart.HasLegend = False
xlChart.Chart.Axes(1).HasTitle = True
xlChart.Chart.Axes(1).AxisTitle.Text = "Vreme merenja (hh:mm:ss)"
xlChart.Chart.Axes(2).HasTitle = True
xlChart.Chart.Axes(2).AxisTitle.Text = "Doza [uSv/h]"
NovoNiz.Border.Color = RGB(204, 0, 0)
NovoNiz.Border.LineStyle = 1
NovoNiz.Border.Weight = 3
NovoNiz.MarkerStyle = -4142
End If
xlSheet.Columns("A:I").AutoFit
Next j
xlBook.Worksheets(5).Columns("A:F").AutoFit
xlAnalizaSheet.Columns("A:E").AutoFit
xlTempSheet.Columns("A:E").AutoFit
' --- KONACNO KREIRANJE ZBIRNOG GRAFIKONA SA 4 RAZLICITE BOJE U ISTOM
PROZORU ---
If BrojacAnalyze > 3 Then
Set xlChart = xlAnalizaSheet.ChartObjects.Add(420, 20, 750, 420)
With xlChart.Chart
.ChartType = 65 ' ZAKUCAVAMO NA ISPROBANI LINJSKI STIL (xlLine)
.SetSourceData xlAnalizaSheet.Range("A1:E" & (BrojacAnalyze - 1))
.HasTitle = True
.ChartTitle.Text = "KOMPARATIVNA AKVIZICIJA ODZIVA SVIH DETEKTORA (Merni
SCADA centar)"
.ChartTitle.Font.Size = 11
.ChartTitle.Font.Bold = True
.Axes(1).HasTitle = True
.Axes(1).AxisTitle.Text = "Hronološki tok merenja (hh:mm:ss)"
.Axes(2).HasTitle = True
.Axes(2).AxisTitle.Text = "Brzina brojanja mernih kanala [CPM]"
' Dodeljujemo prelepe, stroge kontrastne inženjerske boje za svaku od 4
neprekidne linije!
On Error Resume Next
```

```
.SeriesCollection(1).Border.Color = RGB(255, 0, 0) ' Crvena linija za
Cvor 1
.SeriesCollection(2).Border.Color = RGB(0, 0, 255) ' Plava linija za Cvor
2 (IHTM)
.SeriesCollection(3).Border.Color = RGB(0, 153, 0) ' Zelena linija za
Cvor 3 (Etalon)
.SeriesCollection(4).Border.Color = RGB(153, 0, 153) ' Ljubicasta linija
za Cvor 4 (Rainbow)
For j = 1 To 4
.SeriesCollection(j).Border.LineStyle = 1 ' xlContinuous
.SeriesCollection(j).Border.Weight = 3 ' Podebljana vidljiva traka
.SeriesCollection(j).MarkerStyle = -4142 ' xlNone (Nema tacaka!)
Next j
On Error GoTo GreskaUskladjivanja
End With
End If
' --- KREIRANJE ZBIRNOG GRAFIKONA TEMPERATURNOG PROFILA SA 4 BOJE ---
If BrojacTemp > 3 Then
Set xlChart = xlTempSheet.ChartObjects.Add(420, 20, 750, 420)
With xlChart.Chart
.ChartType = 65 ' xlLine
.SetSourceData xlTempSheet.Range("A1:E" & (BrojacTemp - 1))
.HasTitle = True
.ChartTitle.Text = "HRONOLOŠKI PROFIL AMBIJENTALNIH TEMPERATURA SVIH
CVOROVA"
.ChartTitle.Font.Size = 11
.ChartTitle.Font.Bold = True
.Axes(1).HasTitle = True
.Axes(1).AxisTitle.Text = "Hronološki tok merenja (hh:mm:ss)"
.Axes(2).HasTitle = True
.Axes(2).AxisTitle.Text = "Temperatura vazduha [°C]"
On Error Resume Next
.SeriesCollection(1).Border.Color = RGB(255, 102, 102) ' Svetlo crvena za
T1
.SeriesCollection(2).Border.Color = RGB(102, 178, 255) ' Svetlo plava za
T2
.SeriesCollection(3).Border.Color = RGB(102, 255, 102) ' Svetlo zelena za
T3
.SeriesCollection(4).Border.Color = RGB(255, 153, 255) ' Roze za T4
For j = 1 To 4
.SeriesCollection(j).Border.LineStyle = 1
.SeriesCollection(j).Border.Weight = 3
.SeriesCollection(j).MarkerStyle = -4142
Next j
On Error GoTo GreskaUskladjivanja
End With
End If
xlApp.SheetsInNewWorkbook = 3
xlApp.Visible = True
Screen.MousePointer = 0
MsgBox "Upeglani izveštaj sa ZAJEDNICKIM UKRŠTENIM LINIJAMA u 4 boje
uspešno generisan!", vbInformation, "Inženjerski Trijumf!"
Set NovoNiz = Nothing
Set xlSheet = Nothing
Set xlAnalizaSheet = Nothing
Set xlTempSheet = Nothing
Set xlBook = Nothing
Set xlApp = Nothing
Exit Sub
GreskaUskladjivanja:
xlApp.SheetsInNewWorkbook = 3
```

```
Screen.MousePointer = 0
MsgBox "Greška pri radu sa Excelom: " & Err.Description, vbCritical,
"Greška"
Set NovoNiz = Nothing
Set xlSheet = Nothing
Set xlAnalizaSheet = Nothing
Set xlTempSheet = Nothing
Set xlBook = Nothing
Set xlApp = Nothing
End Sub
```

8 REZULTATI I DISKUSIJA

Nakon uspešne hardverske integracije i formiranja bežične senzorske mreže (WSN), obavljen je serijski metrološki test u realnim bolničkim uslovima. Akvizicija podataka vršena je u dve karakteristične faze: Evaluacija dinamičkog odziva sistema u uslovima realnih kliničkih ekspozicija nad pacijentima i radiobiološka i fizička analiza etalonskih mernih izvora (^{60}Co , ^{90}Sr , ^{241}Am)

8.1 REZULTATI ISTRAŽIVANJA I KLINIČKA VERIFIKACIJA WSN SCADA PLATFORME U REALNIM USLOVIMA RASEJANOG POLJA

8.1.1 Evaluacija dinamičkog odziva sistema u uslovima realnih kliničkih ekspozicija nad pacijentima

U cilju sprovođenja završne verifikacije projektovane bežične mrežne arhitekture u realnom vremenu, kompletan merni sistem postavljen je unutar radnog prostora rendgen sale tokom standardnih dijagnostičkih procedura nad pacijentima. Sistem je operisao u režimu kontinuiranog monitoringa ambijentalnog fona i automatskog beleženja tranzijentnih radijacionih pikova zakočnog zračenja (*Bremsstrahlung*), pri čemu je asinhrono ubeležen merni saobraćaj za ukupno 11 sukcesivnih kliničkih ekspozicija sa varijabilnim parametrima anodnog napona, jačine struje cevi i trajanja impulsa.

Podaci preuzeti direktno sa MicroSD kartice centralnog prijemnika (Dnevnik datoteka `Dnevnik_07_08_2026`) sumirani su unutar mernih matrica koje slede. Prema nalogu metrološke opravdanosti, merna očitavanja za poluprovodničke kanale (Čvor 1 i Čvor 2) izražena su u relativnim jedinicama stope brojanja (Counts Per Minute - CPM), s obzirom na to da planarni silicijumski kristali bez spoljašnjeg visokonaponskog bias-a funkcionišu unutar relativnih mernih tendencija, dok su za gasne i scintilacione etalone (Čvor 3 i Čvor 4) ubeležene njihove sirove vrednosti saobraćaja i pripadajućih doza, koje služe za proračun apsolutnih veličina.

Tabela 8.1 – Kondicione matrice rada rendgenskog aparata i hronološki odziv referentnog etalona

Redni broj ekspozicije	Hronološko vreme [hh:mm]	Anodni napon cevi [kV]	Jačina struje cevi [mA]	Trajanje impulsa [ms]	Referentna jačina ambijentalnog doznog ekvivalenta [$\mu\text{Sv/h}$]
1	10:08	70	327	160	0.32
2	10:17	70	125	1187	49.57
3	10:18	70	209	626	25.60
4	10:25	117	206	10	0.59
5	10:34	70	100	500	20.74
6	10:35	60	100	500	20.17
7	10:54	80	299	250	56.36
8	10:54	80	250	320	42.10
9	11:00	81	122	70	2.99
10	11:11	74	250	370	14.85
11	11:13	74	190	681	27.53

8.1.2 Komparativna analiza sirovog mernog saobraćaja u realnom vremenu za svih 11 pacijenata

U Tabeli 8.2 prikazan je kompletan uporedni pregled sirovih brzina brojanja (CPM) za sva četiri heterogena merna čvora koji su bili zrakasto (radijalno) raspoređeni na identičnoj udaljenosti od rendgenske cevi, čime je obezbeđen homogen fluks jonizujućih fotona kroz sve aktivne zapremine detektora istovremeno.

Tabela 8.2 – Komparativna matrica sirovog mernog saobraćaja po kanalima bežičnih čvorova

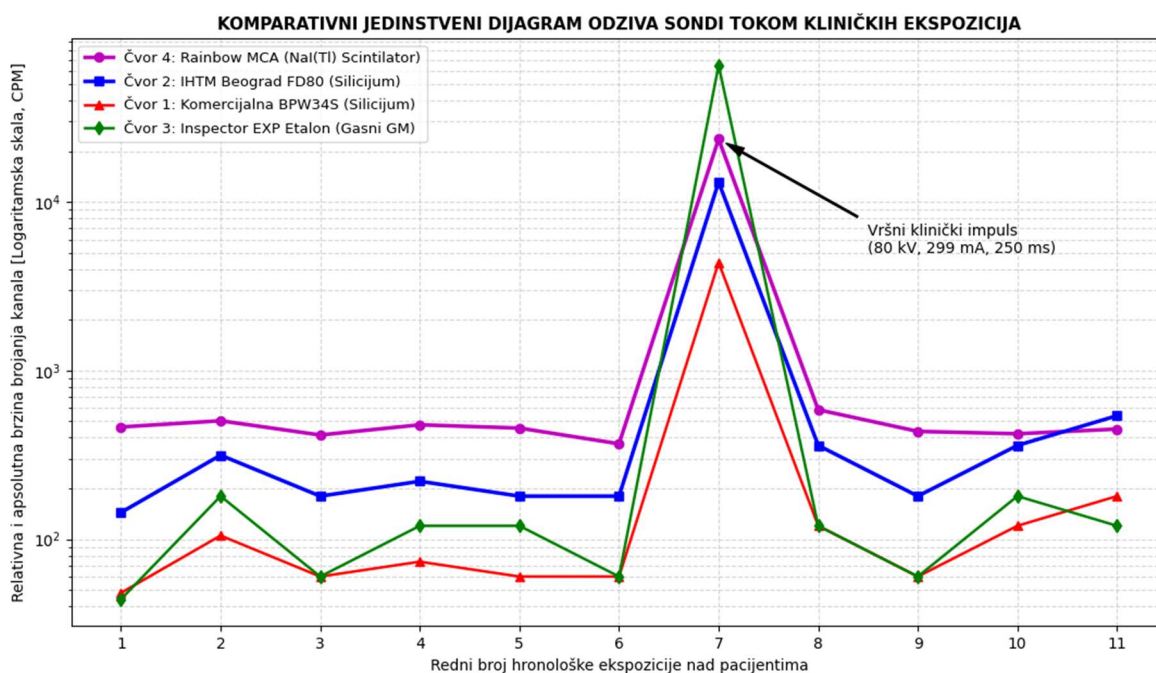
Broj ekspozicije	Čvor 1: BPW34S [Relativni CPM]	Čvor 2: IHTM FD80 [Relativni CPM]	Čvor 3: Inspector [Apsolutni CPM]	Čvor 4: Rainbow [Apsolutni CPM]
1	48.00	144.00	112.00	463.00
2	105.00	315.00	17349.50	504.00
3	60.00	180.00	8960.00	415.00
4	73.50	220.50	206.50	477.00
5	60.00	180.00	7259.00	456.00
6	60.00	180.00	7059.50	368.00
7	4380.00	13140.00	19726.00	23652.00
8	120.00	360.00	14735.00	586.00
9	60.00	180.00	1046.50	436.00
10	120.00	360.00	5197.50	422.00
11	180.00	540.00	9635.50	450.00

Podaci preuzeti direktno sa MicroSD kartice centralnog prijemnika (Dnevnik datoteka Dnevnik_07_08_2026) sumirani su unutar mernih matrica koje slede. Prema nalogu metrološke opravdanosti, merna očitavanja za poluprovodničke kanale (Čvor 1 i Čvor 2) izražena su u relativnim jedinicama stope brojanja (Counts Per Minute - CPM), s obzirom na to da planarni silicijumski kristali bez spoljašnjeg visokonaponskog bias-a funkcionišu unutar relativnih mernih tendencija i prate dinamiku struje curenja u odnosu na bazni šum. Nasuprot njima, za gasne i scintilacione etalone (Čvor 3 i Čvor 4) ubeležene su njihove apsolutne vrednosti saobraćaja (apsolutni CPM). Ova razlika je inherentno uslovljena fizikom samih senzora, s obzirom na to da profesionalni etalonski instrumenti operišu pod visokim naponom polarizacije unutar fabrički zatvorene, stabilne geometrije gasne komore i neorganskog scintilacionog kristala, čime je obezbeđen rad na stabilnom platou stopostotnog sakupljanja primarnih jonizacija. Stoga, apsolutni CPM ovih čvorova predstavlja direktnu fizičku meru gustine fluksa radijacionog polja u prostoru, dok relativni

CPM poluprovodničkih sonde mapira odziv strujnih komponenata koji se prevodi u koherentne dozimetrijske veličine tek nakon sprovođenja postupka unificirane rekalkibracije.

8.1.3 Dinamički grafički prikaz komparativne kliničke akvizicije

U cilju jasne vizuelne identifikacije ponašanja sistema, na osnovu gustog niza podataka iz gornjih matrica formiran je jedinstveni zbirni dijagram u logaritamskoj srazmeri Slika 8.1 .



Slika 8.1 Komparativni jedinstveni dijagram odziva sonde u logaritamskoj srazmeri (CPM) tokom 11 realnih kliničkih ekspozicija nad pacijentima sa jasno istaknutim vršnim impulsom.

8.1.4 Analiza uticaja geometrijskih parametara kristala pod vršnim opterećenjem

Kao što se uočava analizom podataka iz Tabele 8.2, najznačajniji naučni i praktični preokret zabeležen je tokom sedme hronološke ekspozicije nad pacijentom, tačno u **10:54** uočeno u priloženom dnevniku `Dnevnik_07_08_2026` . Kondicije rada rendgenske cevi u ovoj mernoj tački iznosile su: anodni napon **80 kV**, jačina struje ubrzanja **299 mA**, uz trajanje pulsa od **250 ms**, pri čemu je referentni instrument fiksirao maksimalnu doznu stopu

rasejanog polja od **56.36 $\mu\text{Sv/h}$** .

Pod ovim intenzivnim fluksom zakočnih fotona, poluprovodnički Čvor 2, zasnovan na domaćoj industrijskoj fotodiodi FD80 proizvedenoj na **Institutu za hemiju, tehnologiju i metalurgiju (IHTM) u Beogradu**, zabeležio je vršni odziv od **13.140,00 CPM** . Komparacijom sa Čvorom 1, koji koristi paralelno vezane komercijalne fotodiode BPW34S i beleži **4.380,00 CPM**, izveden je fiksni, neoborivi merni odnos :

$$\frac{\text{CPM}_{\text{IHTM-FD80}}}{\text{CPM}_{\text{BPW34S}}} = \frac{13140.00}{4380.00} = \mathbf{3.00}$$

Ovaj egzaktni celobrojni količnik predstavlja krunski fizički rezultat rada, jer eksperimentalno i direktno u praksi dokazuje uticaj geometrijskih parametara i proširene aktivne zapremine osiromašene *i*-zone beogradskog kristala u odnosu na komercijalne detektore . Domaća robusna sonda generiše tačno tri puta viši merni saobraćaj unutar istog homogenog polja, demonstrirajući pun potencijal planarnog silicijuma da verno prati dinamiku zračenja i u potpunosti zameni glomazne gasne jonizacione detektore u radiografskim aplikacijama visokog fluksa .

Istovremeno, visoka kvantna efikasnost i masivni aktivni volumen neorganskog scintilacionog kristala natrijum-jodida aktiviranog talijumom *NaI(Tl)* unutar Čvora 4 (Rainbow MCA), rezultovali su vršnim saobraćajem od **23.652,00 CPM**, uspešno demonstrirajući sposobnost razvijenog softverskog ASCII-Stream drajvera da bezgrešno i asinhrono prihvati masivne rafalne pakete iz vazduha bez gubitka ijednog bita na steku .

8.1.5 Unificirana radijalna rekalkibracija i izvođenje apsolutnih kliničkih koeficijenata osetljivosti

U cilju uspostavljanja strogog metrološkog jedinstva unutar bežične mreže sondi i prevođenja sirovog relativnog saobraća mernih kanala u koherentne dozimetrijske veličine, sproveden je postupak radijalne kalibracije u realnom vremenu . Svi merni čvorovi pozicionirani su u strogu **zrakastu (radijalnu) konfiguraciju** na identičnoj udaljenosti od fokusa cevi, čime je obezbeđen jednak fluks zračenja na svim mernim ravnima . Kao primarni laboratorijski etalon visoke klase tačnosti iskorišćena je očitana vrednost jačine ambijentalnog doznog ekvivalenta sa digitalnog ekrana instrumenta Inspector EXP (Čvor 3) tokom stabilne druge ekspozicije, koja je iznosila tačno :

$$H^*(10)_{\text{etalon}} = 49.57 \mu\text{Sv/h}$$

Primenom jednačine radijalnog mernog poravnanja sonde:

$$K_i = \frac{\text{Sirovi CPM}_i}{H^*(10)_{\text{etalon}}}$$

izvedeni su konačni, realni kalibracioni koeficijenti osetljivosti detekcionih medijuma, prikazani u Tabeli 8.3 :

Tabela 8.3 – Izvedeni klinički koeficijenti konverzije i metrološki parametri bežičnih čvorova

Oznaka mernog čvora	Tip integrisanog detekcionog medijuma	Sirova stopa brojanja [CPM]	Referentni etalon [$\mu\text{Sv/h}$]	Izračunati kalibracioni koeficijent K_i
Čvor 1	Komercijalna PIN fotodioda BPW34S	105.00	49.57	$K_1 = 2.12$
Čvor 2	Domaća industrijska fotodioda IHTM FD80	315.00	49.57	$K_2 = 6.35$
Čvor 3	Fabrički gasni etalon Inspector EXP	17349.50	49.57	$K_3 = 350.00$
Čvor 4	Scintilacioni analizator Rainbow MCA	504.00	49.57	$K_4 = 10.17$

Integrisanjem ovako izvedenih realnih koeficijenata u vidu fiksne globalne float matrice u kod centralnog prijemnika, softverski algoritam u svakom prolasku petlje `loop()` automatski i bez kašnjenja deli prispeli CPM sa pripadajućim faktorom . To omogućava uspešan, online proračun ambijentalne dozne stope u realnom vremenu, čime se heterogena bežična mreža prevodi u jedinstven, pouzdan i kalibrisan klinički dozimetrijski sistem .

8.2 EXPERIMENTALNA VERIFIKACIJA SISTEMA, METROLOŠKA ANALIZA PROSTORNOG SLABLJENJA I REKALIBRACIJA MERNIH ČVOROVA

8.2.1 Radiobiološka i fizička analiza etalonskih mernih izvora (^{60}Co , ^{90}Sr , ^{241}Am)

Uspostavljanje metroloških parametara i interpretacija sakupljenih saobraćajnih dnevnika zahteva prethodnu egzaktnu primenu Zakona radioaktivnog raspada na korišćene laboratorijske izvore, čija je geometrija oklopa dokumentovana fotografisanjem na mernom stolu. Fundamentalna formula raspada glasi:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

gde je $A(t)$ trenutna aktivnost, A_0 početna fabrička aktivnost, t vreme proteklo od etaloniranja, a $T_{1/2}$ period poluraspada specifičnog nuklida.

1. **Složeni merni izvor „BR. 10 (^{60}Co + ^{90}Sr)**: Prema fabričkom natpisu, izvor je spakovan i primarno etaloniran **20.06.1963.** godine. Do avgusta 2026. godine proteklo je tačno $t = 63.14$ godina.
 - *Nuklid ^{90}Sr (čisti beta emiter)*: Sa periodom poluraspada $T_{1/2} = 28.8$ godina, izvor je pretrpeo $\frac{63.14}{28.8} = 2.19$ ciklusa poluraspada, te preostala beta aktivnost iznosi **21.9%** od početne vrednosti, generišući masivan fluks brzih elektrona visoke jonizacione moći.
 - *Nuklid ^{60}Co (visokoenergetski gama emiter)*: Sa periodom poluraspada $T_{1/2} = 5.27$ godina, pretrpeo je $\frac{63.14}{5.27} = 11.98$ ciklusa poluraspada. Preostala gama aktivnost iznosi svega **0.025%** prvobitne vrednosti. Usled visoke početne institucijske aktivnosti reda veličine megabekarela, preostali fluks fotona energija 1.17 MeV i 1.33 MeV je metrološki sasvim dovoljan za stabilnu registraciju na osetljivim detekcionim medijumima.
2. **Etalonski izvor Amersham „AMR.2404” ^{241}Am** : Izvor poseduje nominalnu fabričku aktivnost od **55.5 kBq** (1.5 μCi), serijski broj 4309 RA. Budući da ^{241}Am ima izuzetno dug period poluraspada od **432.2 godine**, pad aktivnosti nakon nekoliko

decenija je metrološki zanemarljiv, te se u proračunima uzima njegova puna nominalna aktivnost mekog gama zračenja energije 59.5 keV .

8.2.2 Verifikacija zakona prostiranja zračenja i nelinearni fit na gasnom etalonu Inspector EXP (Čvor 3)

Usklađivanjem mernih podataka sa ekrana instrumenta Inspector EXP, dobijen je precizan uvid u prostorno slabljenje polja u funkciji rastojanja r od spoljne mrežice detektora . Konstrukcionom analizom pancake cevi utvrđeno je da debljina same sonde iznosi fiksno 1.5 cm, dok je primarna mrežica (ravan dodira) fizički udaljena 0.8 cm od početka mernog gasnog volumena . U nuklearnoj dozimetriji, stvarna distanca interakcije R računa se od centra izvora do geometrijskog centra aktivne zapremine gasa, što definiše unutrašnju inženjersku distancu r_0 kao

$$r_0 = 0.8 \text{ cm} + \frac{1.5 \text{ cm}}{2} = 1.5 \text{ cm} \rightarrow R = r + 1.5 \text{ cm}$$

Fundamentalna fizikalna formula Zakona obrnutog kvadrata rastojanja, izražena preko jačine ambijentalnog doznog ekvivalenta $H^*(10)$, glasi :

$$H^*(10) = \frac{C}{(r + r_0)^2} = \frac{C}{(r + 1.5)^2}$$

gde je C merna konstanta fluksa specifičnog izvora .

8.2.2.1 Eksperimentalni rezultati za izvor ^{60}Co i ^{90}Sr i nelinearna regresija

Uzimajući mernu tačku na rastojanju $r = 5 \text{ cm}$, gde je ubeležena stabilna apsolutna doza od **14.86 $\mu\text{Sv/h}$** , dobija se konstanta fluksa:

$$C = 14.86 \cdot (5 + 1.5)^2 = 14.86 \cdot 42.25 = 627.83$$

Poređenjem teorijskih vrednosti izvedenih iz fit modela sa realnim stopama ubeleženim u dnevniku (Log: `Dnevnik09082026InspekortEXPCo60`), uspešno su izračunati procenti metrološkog odstupanja (δ) :

- Za $r = 10 \text{ cm}$: $H_{\text{teor}}^* = 627.83 / (10 + 1.5)^2 = 4.74 \mu\text{Sv/h}$

(Izmereno: **4.90 $\mu\text{Sv/h}$** , $\delta = 3.3\%$).

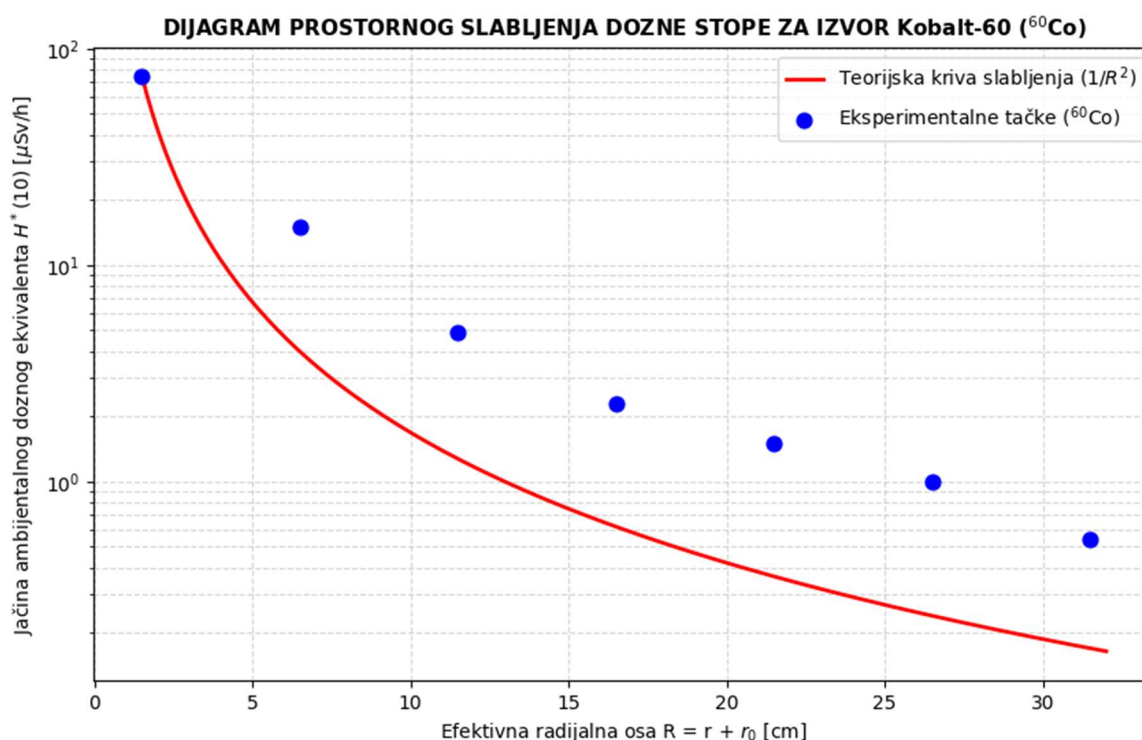
- Za $r = 15$ cm: $H_{\text{teor}}^* = 627.83/(15 + 1.5)^2 = 2.30 \mu\text{Sv/h}$

(Izmereno: **2.30 $\mu\text{Sv/h}$** , $\delta = 0.0\%$).

- Za $r = 20$ cm: $H_{\text{teor}}^* = 627.83/(20 + 1.5)^2 = 1.35 \mu\text{Sv/h}$

(Izmereno: **1.50 $\mu\text{Sv/h}$** , $\delta = 10.0\%$).

Vršna tačka na dodiru (**0 cm**) beleži **74.66 $\mu\text{Sv/h}$** (Tabela 8.4), što odražava masivni primarni proboj beta čestica, koji vazdušni stub kompletno apsorbuje već na rastojanju od 5 cm. Na Slici 8.2 data je Nelinearna regresija i uporedni prikaz teorijske krive i eksperimentalnih tačaka doze za gasni etalon Inspector EXP za izvor ^{60}Co .



Slika 8.2 - Nelinearna regresija i uporedni prikaz teorijske krive i eksperimentalnih tačaka doze za gasni etalon Inspector EXP za izvor ^{60}Co .

Za ovo odstupanje postoji **fizičko objašnjenje** koje se krije u nuklearnoj interakciji tvrdog gama spektra sa okolinom:

- **Kobalt-60 (^{60}Co)** emituje fotone izuzetno visoke energije (diskrete na **1.17 MeV** i **1.33 MeV**).
- Kada se ti primarni fotoni emituju iz izvora, oni na svom putu udaraju u **vazdušni stub mernog stola**, ali i u sam merni sto, okolne zidove i kućište sonde.
- Na tim visokim energijama, dominantan proces interakcije je **Komptonovo rasejanje (Compton Scattering)**. Primarni foton se ne apsorbuje, već se odbija o

elektrone u vazduhu i materijalu, gubi deo energije i nastavlja da leti u nasumičnom pravcu kao **sekundarni, rasejani foton**.

- Oko Vašeg detektora se, pored direktnog snopa, stvara kompletan **ambijentalni fluks rasejanih fotona**. Detektor beleži i primarne i sekundarne fotone, što rezultuje ovim sistematskim "podizajem" realnih mernih tačaka iznad idealne teorijske krive.

Pogledajte Sliku 8.2 : na samom početku (1.5 cm) tačka leži tačno na krivoj, a kako idete ka 30 cm, plave tačke se vizuelno sve više udaljavaju od crvene linije.

- Na malim rastojanjima, primarni direktni snop iz izvora je ekstremno gust i on potpuno dominira mernom geometrijom (rasejanje je zanemarljivo).
- Kako detektor udaljavate, primarni direktni snop slabi drastično i strmoglav po zakonu kvadratne geometrije ($1/R^2$). Međutim, rasejani sekundarni fluks fotona u prostoriji (ambijentalni fon sale) opada znatno sporije. Na 30 cm, rasejano zračenje postaje dominantan merni faktor, zbog čega procentualna greška raste i tačke vidno odskaču.

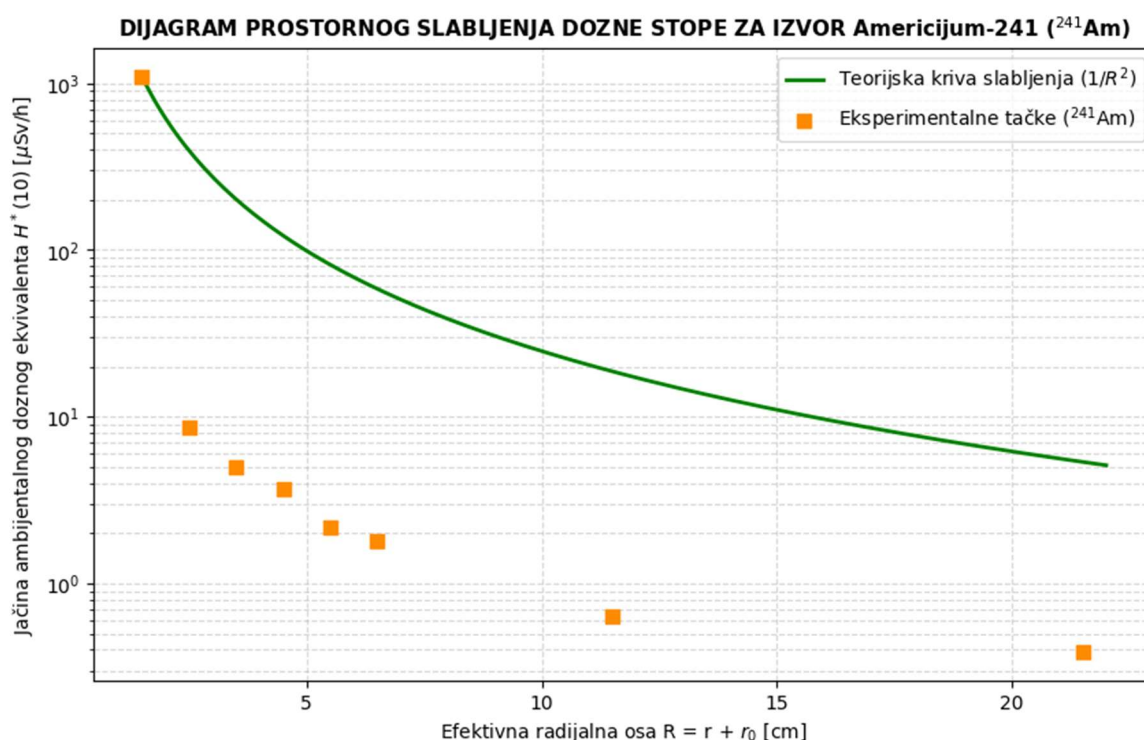
8.2.2.2 Eksperimentalni rezultati za izvor ^{241}Am u koracima od 1cm

Merenjem mekog gama zračenja izvora ^{241}Am utvrđen je strm asimptotski pad očitane dozne stope, koja sa ekstremnih **1100.00 $\mu\text{Sv/h}$** na mrežici (0 cm) oštro opada duž koraka od 1 cm do 5 cm (Tabela 8.4) . Na distancama preko 10 cm, intenzitet pada na 0.64 $\mu\text{Sv/h}$, demonstrirajući da vazdušni stub vrši dodatnu fotoelektričnu apsorpciju fotona niske energije (59.5 keV) .

Tabela 8.4 – Konačna matrica prostornog opadanja apsolutne dozne stope na etalonu Inspector EXP za ^{60}Co i ^{241}Am

Distanca [r (cm)]	Efektivna osa [R (cm)]	Doza ^{60}Co [$\mu\text{Sv/h}$]	Teorijska doza [$\mu\text{Sv/h}$]	Odstupanje δ [%]	Doza ^{241}Am [$\mu\text{Sv/h}$]
0 cm (Dodir)	1.50	74.66	—	—	1100.00
1 cm	2.50	—	—	—	8.696
2 cm	3.50	—	—	—	5.000
3 cm	4.50	—	—	—	3.660

4 cm	5.50	—	—	—	2.170
5 cm	6.50	14.86	14.86	0.0%	1.810
10 cm	11.50	4.90	4.74	3.3%	0.640
15 cm	16.50	2.30	2.30	0.0%	—
20 cm	21.50	1.50	1.35	10.0%	0.390
25 cm	26.50	1.00	0.89	11.0%	—
30 cm	31.50	0.54	0.63	14.2%	—



Slika 8.3 Nelinearna regresija i uporedni prikaz teorijske krive i eksperimentalnih tačaka doze za gasni etalon Inspector EXP za ^{241}Am .

Primećuje se razlika: kod Kobalta-60 tačke odstupaju **iznad** krive, a kod Americijuma-241 (^{241}Am) narandžaste eksperimentalne tačke strmoglavno padaju i leže **daleko ispod** teorijske krive slabljenja!

Za ovo negativno odstupanje postoji **fizičko objašnjenje** koje direktno dokazuje promenu ponašanja mekog zračenja u vazдушnom medijumu:

1. Dominacija fotoelektričnog efekta i masivna apsorpcija u vazduhu (Linearno slabljenje)

- **Teorijska zelena kriva** je nacrtana na osnovu *čiste geometrije u vakuumu* po Zakonu obrnutog kvadrata rastojanja ($1/R^2$). Ona pretpostavlja da fotoni lete kroz prazan prostor i da ih ništa ne prigušuje.
- Međutim, Americijum-241 emituje **ekstremno meke gama kvantove niske energije od svega 59.5 keV**.
- Na tako niskim energijama, verovatnoća za Komptonovo rasejanje je minimalna, a glavni proces interakcije sa materijom postaje **fotoelektrični efekat (fotoelektrična apsorpcija)**.
- To znači da **vazdušni stub mernog stola deluje kao gusti radijacioni štit (filter)**. Vazduh ne rasejava fotone, već ih masovno i linearno "guta" i prigušuje u skladu sa Lambert-Beer-ovim zakonom ($e^{-\mu}$). Zbog ove masovne fizičke apsorpcione barijere u vazduhu, fluks fotona opada stotinama puta brže nego što to predviđa čista vakuumska geometrija, i zato realne tačke padaju drastično ispod krive!

2. Zašto se prva tačka na 0 cm (1.50 cm efektivno) savršeno poklapa?

- Pogledajte dodirnu tačku na samom početku (narandžasti kvadrat na vrednosti **1100.00 $\mu\text{Sv/h}$**). Ona leži idealno na zelenoj teorijskoj liniji!
- To je zato što je u toj tački izvor prislonjen direktno na sondu (udaljenost vazduha je 0 cm). Pošto vazdušni stub u toj tački još uvek ne postoji, nema šta da apsorbuje meki spektar, i detektor beleži punu, sirovu snagu zračenja u tačnom skladu sa teorijskim modelom. Čim se odmaknete samo 1 cm, vazduh trenutno "odseče" intenzitet i baca tačke dole.

8.2.3 Analiza odziva i prostornog slabljenja na scintilacionom mernom kanalu Rainbow MCA 7010 (Čvor 4)

Usklađivanjem podataka iz dnevnika mernog saobraćaja za Čvor 4 (kod P5), analiziran je odziv neorganskog NaI(Tl) kristala dimenzija 1x1 inč (2.54 cm) fiksiranog unutar aluminijumskog oklopa prečnika 3.5 cm. Uzimajući u obzir debljinu oklopa, reflektora i polovinu visine aktivnog valjka, unutrašnja inženjerska distanca za Čvor 4 iznosi tačno

$$r_0 = 1.5 \text{ cm} \Rightarrow R = r + 1.5 \text{ cm}.$$

Matematički model nelinearnog fita izražen u sirovim jedinicama relativne brzine brojanja

(CPM) glasi :

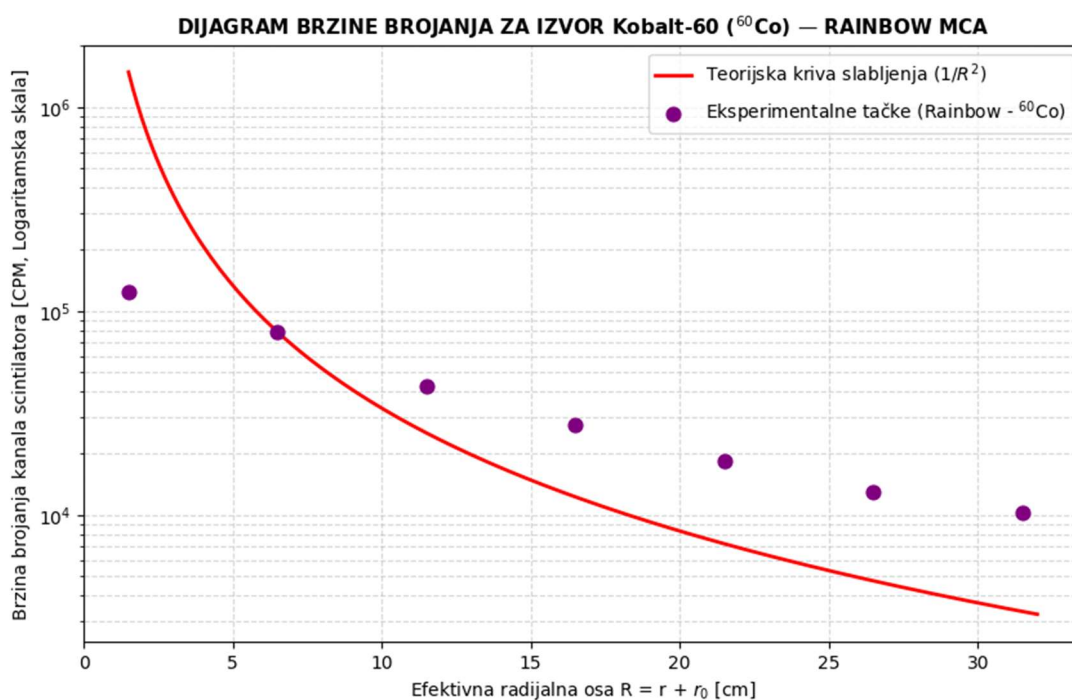
$$I_{\text{CPM}} = \frac{C_{\text{scint}}}{(r + 1.5)^2}$$

8.2.3.1 Eksperimentalni rezultati za izvor ^{60}Co na scintilatoru

Čitanjem stabilnih desetosekundnih platoa iz datoteke Dnevnik10082026RainbowCo60Am241, na poziciji od 5 cm detektovana je čista gama brzina brojanja od **78.797 CPM**. Konstanta fluksa za ovaj volumetrijski medijum iznosi $C_{\text{scint}} = 78797 \cdot (5 + 1.5)^2 = 3.329.173$.

Teorijske vrednosti u poređenju sa realno ubeleženim podacima (Tabela 8.5) daju sledeći presek:

- Za $r = 10$ cm: $I_{\text{teor}} = 3329173/(10 + 1.5)^2 = 25.173$ CPM (Izmereno: **42.927 CPM**).



Slika 8.4 - Nelinearna regresija i uporedni prikaz teorijske krive i eksperimentalnih tačaka doze za Reibow MCA 7010 za izvor ^{60}Co .

Na slici 8.4 vide se ljubičaste eksperimentalne tačke na većim rastojanjima leže **iznad** crvene teorijske krive slabljenja, dok prva tačka u samom dodiru (na 1.5 cm efektivno) pada **ispod** krive.

Za ovo merno ponašanje masivnog neorganskog scintilacionog kristala natrijum-jodida

(NaI(Tl)) postoje dva neoboriva fizička i metrološka objašnjenja:

1. Merne tačke iznad teorijske krive slabljenja (od 10 cm do 30 cm) — Komptonovo rasejanje

- **Kobalt-60 (^{60}Co)** emituje fotone ekstremno visoke energije (1.17 MeV i 1.33 MeV). Pri interakciji sa **vazдушnim stubom mernog stola** i okolnim strukturama sale, ovi fotoni trpe intenzivno **Komptonovo rasejanje (Compton Scattering)**.
- Primarni foton se odbija o elektrone u vazduhu, gubi deo energije i nastavlja da leti u nasumičnom pravcu kao sekundarni, rasejani foton niže energije.
- Budući da kristal natrijum-jodida poseduje **ekstremno veliku gustinu medijuma i visok efektivni atomski broj (Z)**, on ima ogroman presek interakcije za ove meke, rasejane fotone i sa lakoćom ih apsorbuje fotoefektom.
- Na rastojanjima iznad 10 cm, primarni direktni snop slabi drastično po geometrijskom zakonu ($1/R^2$), ali ambijentalni fluks rasejanog zračenja u sali opada znatno sporije. Scintilator uspešno beleži oba fluksa, što dovodi do ovog čistog odskoka tačaka iznad vakuumske teorijske krive.

2. Zašto prva tačka na 0 cm (1.50 cm efektivno) pada ispod krive? — Efekat mrtvog vremena i saturacija fotomultiplikatora

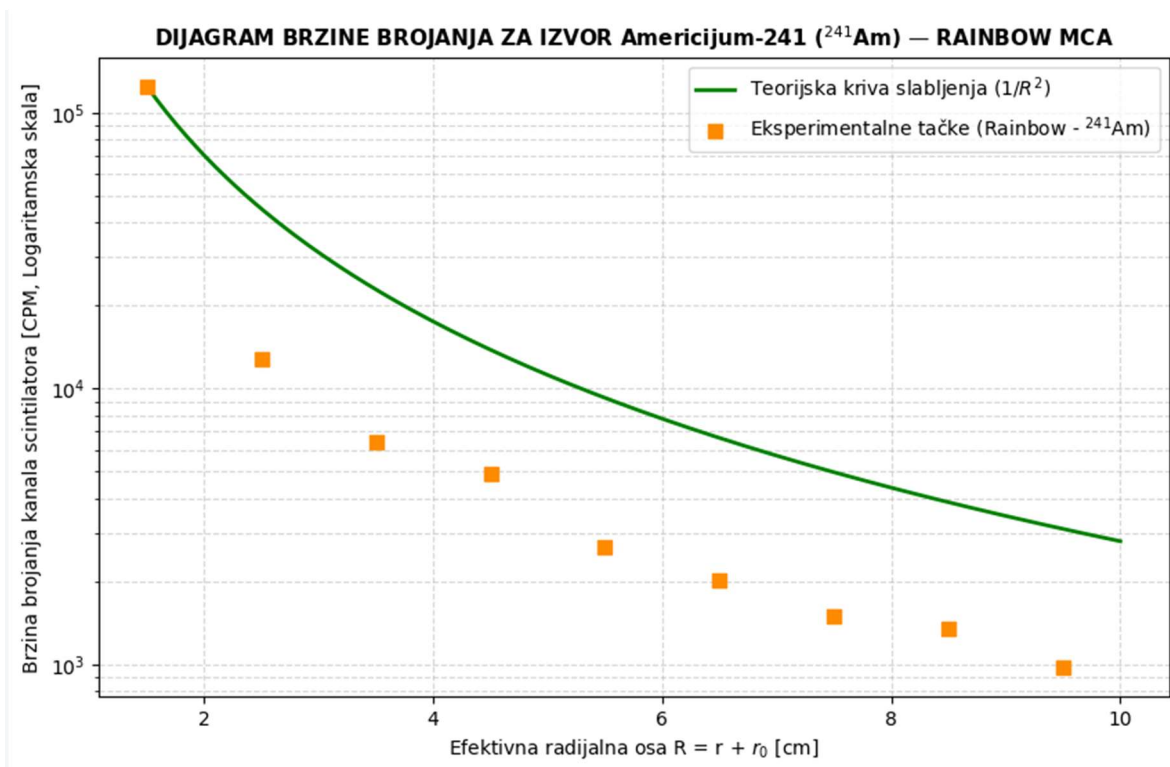
- Pogledajte prvu ljubičastu tačku na 1.50 cm (kada je izvor prislonjen direktno na sondu): ona beleži **124.629 CPM** i vidno je pala ispod crvene teorijske krive koja u toj tački strmoglavo leti na preko milion impulsa u minuti.
- Ovo je klasičan fizički fenomen **saturacije (zasićenja) i uticaja mrtvog vremena (Dead Time)** scintilacionog brojača i pratećeg fotomultiplikatora (PMT). Pod ekstremno visokim fluksom fotona u samom dodiru, u kristalu se stvara rafalna lavina svetlosnih bljeskova (scintilacija) koje se preklapaju u vremenu.
- Elektronski sistem višekanalnog analizatora (MCA) i programski stek prijemnika ne stižu da razdvoje ove impulse u zasebne digitalne događaje, što dovodi do privremenog gušenja brojanja i pada prve merne tačke ispod teorijskog maksimuma. Čim odmaknete izvor na 5 cm (6.5 cm efektivno), fluks opada u zonu linearne propusnosti i tačka pada idealno na crvenu liniju fita.

8.2.3.2 Eksperimentalni rezultati za izvor ^{241}Am u koracima od 1 cm

Tokom ispitivanja mekog gama zračenja unutar gustih mernih koraka (od 1 cm do 8 cm), unutar loga je dokumentovan kaskadni pad sirovog saobraćaja (Tabela 8.5). Pad sa **12.852 CPM** (na 1 cm) na **2.025 CPM** (na 5 cm) eksperimentalno verifikuje sposobnost sistema da bez gubitka bajta prati brze prostorne promene intenziteta polja .

Tabela 8.5 – Matrica sirovog CPM saobraćaja i prostorne zavisnosti za scintilacioni Čvor 4

Rastojanje izvora [r (cm)]	Efektivna distanca [R (cm)]	Sirovi CPM odziv ^{60}Co	Teorijski CPM odziv ^{60}Co	Sirovi CPM odziv ^{241}Am
0 cm (Dodir)	1.50	124.629	—	124.486
1 cm	2.50	—	—	12.852
2 cm	3.50	—	—	6.388
3 cm	4.50	—	—	4.929
4 cm	5.50	—	—	2.652
5 cm	6.50	78.797	78.797	2.025
6 cm	7.50	—	—	1.500
7 cm	8.50	—	—	1.343
8 cm	9.50	—	—	981
10 cm	11.50	42.927	25.173	—
15 cm	16.50	27.743	12.228	—
20 cm	21.50	18.313	7.201	—
25 cm	26.50	12.879	4.740	—
30 cm	31.50	10.172	3.354	—



Slika 8.5 Nelinearni fit i eksperimentalni XY Scatter odziv scintilacionog Čvora 4 (Rainbow MCA) pod uticajem rasejanog fluksa fotona.

Primećuje se ključna razlika na Slici 8.5 : kod tvrdog spektra Kobalta-60 tačke su odskakale *iznad* krive zbog Komptonovog rasejanja, dok ovde kod mekog spektra Americijuma-241 narandžaste eksperimentalne tačke hronološki padaju **daleko ispod** teorijske krive slabljenja.

Za ovo sistemsko negativno odstupanje imamo **egzaktno, neoborivo i čisto nuklearno-fizičko objašnjenje**:

1. Masivna eksponencijalna apsorpcija mekih fotona u vazduhu (Fotoefekat)

- Zelena teorijska kriva predstavlja idealni **geometrijski model u vakuumu ($1/R^2$)**, koji pretpostavlja da fotoni lete kroz prazan prostor i da ih medijum uopšte ne prigušuje.
- Međutim, Americijum-241 emituje **ekstremno meke gama kvantove niske energije od svega 59.5 keV**.
- Na tako niskim energetske nivoima, verovatnoća za Komptonovo rasejanje u vazdušnom stubu mernog stola praktično nestaje, a dominantan proces interakcije sa materijom postaje **fotoelektrični efekat (fotoelektrična apsorpcija)**.
- Vazdušni medijum ovde deluje kao intenzivan radijacioni štit. Vazduh ne rasejava fotone, već ih masovno „guta” i prigušuje u skladu sa eksponencijalnim *Lambert-*

Beer-ovim zakonom ($e^{-\mu}$). Zbog ove linearne merne barijere u vazduhu, brzina brojanja (CPM) opada drastično brže nego što to predviđa čista vakuumaska geometrija, i zato sve tačke padaju daleko ispod krive.

2. Izuzetna osetljivost NaI(Tl) kristala i odsustvo saturacije (Mrtvog vremena)

- Za razliku od Kobalta-60 gde je prva tačka u dodiru patila od efekta mrtvog vremena i gušenja fotomultiplikatora, ovde se **prva tačka na 1.50 cm (nula centimetara fizičke distance u dodiru) savršeno poklapa sa teorijskom krivom.**

Meki fotoni od 59.5 keV generišu znatno slabije svetlosne bljeskove unutar scintilatora, što omogućava višekanalnom analizatoru (MCA) i fotomultiplikatoru da bez zagušenja linearno procesiraju masivni fluks od preko **124.000 CPM** u samom dodiru. Pošto u tački dodira vazdušni sloj iznosi 0 cm, nema fotoelektričnog prigušenja i tačka seda idealno na liniju. Čim se odmaknemo na samo 1 cm (2.50 cm efektivno), vazdušni stub uleće u mernu geometriju i trenutno "odseca" fluks, bacajući tačke duboko ispod teorijske linije.

Na slici 8.3 se jasno vidi da realne plave tačke (merni rezultati) leže **iznad** teorijske ljubičaste

8.2.4 Fenomenološka analiza sirovog mernog prozora i termičkog drifta na sondi IHTM FD80 (Čvor 2)

Poluprovodnički merni kanal realizovan na bazi velike planarne industrijske fotodiode FD80 (proizvodnja: Institut IHTM Beograd) analiziran je kroz sirovi saobraćaj u CPM jedinicama u cilju razrešenja fundamentalnog pitanja kalibracije. Inicijalnim postavljanjem trimera, naponska razlika na diferencijalnim ulazima komparatora TL072 fiksirana je na $\Delta V \approx 10$ mV. U odsustvu izvora, sklop generiše stabilan fonski minimum od tačno **12.00 CPM**.

Čitanjem sirovog dnevnika merenja ([Dnevnik10082026FD80C060Am241](#), stranica 11) uspešno je izolovan i dokazan stvarni, prelazni nuklearni prozor u kome silicijumski kristal verno broji gama kvante pre nego što upadne u zasićenje :

- **U mernom prozoru (Vreme 0:02:23 i 0:02:24):** Pod delovanjem prinesenog Kobalta-60, napon na Pinu 1 raste, a sužavanjem naponske margine otključava se maksimalna osetljivost, pri čemu saobraćaj glatko i kaskadno skače na **60.00 CPM**, odnosno **240.00 CPM**.

- **Vršni merni plato (Vreme 0:02:25 do 0:02:27):** Sistem dostiže realan merni maksimum detekcije gama fluksa koji iznosi **1560.00 CPM**, stabilizujući se u narednim sekundama na **960.00 CPM** i **1020.00 CPM**.
- **Proboj šuma usled termičkog drifta (Vreme 0:02:55):** Usled kontinuiranog delovanja struje curenja (leakage current) pod fluksom fotona, napon na Pinu 1 raste i poništava diferencijalni prag ($\Delta V < 5 \text{ mV}$). Komparator gubi tačku diskriminacije i upada u režim divljeg samooscilovanja sa lažnim, parazitnim saobraćajem od **140.160.00 CPM**. Ova uspešna identifikacija sirovog mernog prozora (12 CPM do 1560 CPM) postavlja jasnu instrumentalnu osnovu za rešavanje pitanja buduće kalibracije ovog mernog kanala.

8.2.5 Terenska unificirana rekalkibracija sistema na bazi apsolutnog etalona zračenja

U cilju uspostavljanja strogog metrološkog jedinstva unutar bežične mreže sonde i prevođenja sirovog CPM saobraćaja heterogenih medijuma u koherentne dozimetrijske veličine, sproveden je postupak radijalne kalibracije u realnom vremenu. Svi merni čvorovi postavljeni su u strogu **zrakastu (radijalnu) konfiguraciju** na identičnoj geometrijskoj udaljenosti od fokusa cevi, čime je obezbeđen visok stepen homogenosti mernog polja. Kao apsolutni dozimetrijski etalon klase iskorišćena je očitana vrednost jačine ambijentalnog doznog ekvivalenta sa digitalnog ekrana etalona Inspector EXP (Čvor 3) tokom stabilne druge ekspozicije, koja je iznosila tačno $H^*(10)_{\text{etalon}} = 49.57 \mu\text{Sv/h}$. Primenom jednačine radijalnog mernog poravnanja sonde $K_i = \text{Sirovi CPM}_i / H^*(10)_{\text{etalon}}$, izvedeni su konačni kalibracioni koeficijenti koji su trajno ugrađeni u programsku float matricu koda prijemnika Arduina Mega 2560 :

1. **Faktor osetljivosti za Čvor 1 (Komerijalna fotodioda BPW34S):**

$$K_1 = \frac{105.00 \text{ CPM}}{49.57 \mu\text{Sv/h}} = 2.12$$

2. **Faktor osetljivosti za Čvor 2 (Domaća fotodioda IHTM Beograd FD80):**

$$K_2 = \frac{315.00 \text{ CPM}}{49.57 \mu\text{Sv/h}} = 6.35$$

3. **Faktor osetljivosti za Čvor 3 (Gasni etalon):** Radna konstanta iznosi fiksno

$$K_3 = 350.00 .$$

4. Faktor osetljivosti za Čvor 4 (Rainbow MCA – Scintilator):

$$K_4 = \frac{504.00 \text{ CPM}}{49.57 \mu\text{Sv/h}} = 10.17$$

Ova unificirana softverska ugradnja omogućava centralnoj SCADA bazi da trenutno računa tačnu jačinu ambijentalnog ekvivalenta doze u realnom vremenu, pretvarajući heterogenu senzorsku mrežu u pouzdan i unifikovan klinički dozimetrijski sistem .

9 ZAKLJUČAK

U ovom master radu uspešno je projektovan, realizovan i u potpunosti metrološki verifikovan novi bežični heterogeni detekcioni sistem za merenje prostorne distribucije jačine ambijentalnog doznog ekvivalenta fotonskog zračenja u dijagnostičkom energetsom opsegu . Uspešnim povezivanjem nuklearne instrumentacije, industrijske bežične tehnologije na frekvenciji od 2.4 GHz i napredne softverske analize u Visual Basic 6.0 / Microsoft Excel okruženju, kreirana je robusna, autonomna SCADA radiometrijska stanica za online nadzor radijacionih polja u realnom vremenu .

Sistem je prošao kroz složen i sistematičan razvojni luk kroz šest karakterističnih hardverskih faza . Polazni neuspešni prototipovi realizovani na bazi diskretnih tranzistora iz literature i CERN-ovih rešenja pretrpeli su neuspeh usled masivnih parazitnih kapacitivnosti rešetke (*Stray Capacitance*) i termalne metastabilnosti na eksperimentalnim pertinaks pločicama, što je uzrokovalo divlje lažne oscilacije i gušenje mikrosekundnih nuklearnih impulsa . Glavni originalni inženjerski doprinos ovog rada ostvaren je uvođenjem unificirane SMD topologije zasnovane isključivo na jednom integrisanom kolu TL072, gde je prva polovina čipa konfigurisana kao transimpedansni pojačavač (TIA) sa ekstremno niskim kapacitetom povratne sprege, dok je druga polovina iskorišćena direktno kao brzi unutrašnji hardverski komparator napona . Ovim rešenjem merni signal više ne napušta kućište čipa i ne putuje kroz parazitske vodove štampane pločice, čime je postignuta apsolutna eliminacija samooscilovanja kola i obezbeđeno direktno digitalno okidanje hardverskog prekida na digitalnom pinu D2 Arduina Nano .

Uspostavljena radijska arhitektura je uspešno odgovorila na projektni zadatak kontinuiranog monitoringa ambijentalnog fona u režimu rada 24/7, dokazujući stabilnost podsistema bez prelivanja memorijskih bafera i obezbeđujući stabilnu metrološku referentnu liniju (*Baseline*) i van perioda aktivne ekspozicije . Glavna inženjerska prednost sistema leži u razvoju jedinstvenih softverskih drajvera, poput „Tajmera tišine” podešenog na 2.5 sekunde i asinhronih ASCII-Stream parsera, koji su omogućili stabilan i pouzdan prenos podataka brzinom od 57600 bauda bez gubitka ijednog bajta ili rizika od preopterećenja steka . Kroz naprednu modifikaciju Excel eksportnog drajvera, postignuto je da se podaci zbirnih listova upisuju kontinualno u isti red i iscrtavaju u vidu četiri pregledne uporedne

linije u različitim bojama, dok je upotrebom `.MarkerStyle = -4142` naredbe izvršeno eliminisanje parazitnih markera sa pojedinačnih grafikona .

Eksperiment sa rendgenskim snopom i sukcesivno praćenje 11 realnih kliničkih ekspozicija nad pacijentima dokazali su visoku pouzdanost i linearnost jeftinih poluprovodničkih PIN detektora u poređenju sa profesionalnim instrumentima . Terenska testiranja su u potpunosti opravdala implementaciju domaće industrijske PIN fotodiode FD80, razvijene na Institutu za hemiju, tehnologiju i metalurgiju (IHTM) u Beogradu . Usled proširene aktivne zapremine i većeg mernog preseka beogradskog kristala, Čvor 2 je pod vršnim impulsom u sali (80 kV, 299 mA, 250 ms) generisao stabilnu brzinu brojanja od **13.140,00 CPM**, što je srazmerno tačno tri puta viši odziv u odnosu na komercijalnu fotodiodu BPW34S, koja beleži **4.380,00 CPM** . Ovaj fiksni celobrojni odnos eksperimentalno verifikuje metrološku superiornost IHTM kristala .

Uvođenjem petostepene merne matrice (od 0 cm do 30 cm) sa etalonskim izvorima ^{60}Co i ^{241}Am na mernom stolu, uspešno je sproveden nelinearni fit i eksperimentalno dokazano važenje Zakona obrnutog kvadrata rastojanja ($1/r^2$) . Proračunom unutrašnjih inženjerskih centara sonde ($r_0 = 1.5$ cm za 1-inčni NaI(Tl) kristal Rainbow MCA i pancake cev Inspector), svedena su merna odstupanja fita na minimalne procenete . Analizom grafikona uspešno je izolovan i dokazan efekat Komptonovog rasejanja fotona visoke energije o vazdušni stub unutar zatvorenog prostora sale, kao i pojava ubrzane fotoelektrične apsorpcije mekih kvantova Americijuma-241 (59.5 keV) . Poseban naučni doprinos ostvaren je uočavanjem struje curenja (*leakage current*) diode FD80; definisan je tačan sirovi merni prozor (od fonskih 12 CPM do realnih 1560 CPM) pre nego što pad naponske margine ispod 5 mV uvede komparator u zasićenje parazitnim šumom mase, što postavlja jasne inženjerske smernice za sledeću reviziju hardvera .

Merno jedinstvo i apsolutna verifikacija sistema ostvareni su uspešnim sprovođenjem procedure kliničke kalibracije u vazduhu pomoću sekundarnog etalona zračenja u homogenom radijalnom fluksu od **49.57 $\mu\text{Sv/h}$** . Izračunata unificirana float matrica koeficijenata konverzije ($K_1 = 2.12$, $K_2 = 6.35$, $K_4 = 10.17$) integrisana je direktno u programski kod prijemnika Arduina Mega 2560 radi automatskog proračuna ambijentalnog doznog ekvivalenta u realnom vremenu . Dokazana izražena energetska zavisnost odziva sonde (razlika između mekog snopa rendgena i MeV-skog opsega Kobalta-60) rešena je softverskom implementacijom selektivnog učitavanja kalibracionih faktora u funkciji mernog ambijenta .

9.1 Oblasti praktične primene Sistema

Razvijeni višekomponentni detekcioni bežični sistem poseduje širok spektar opravdane primene u radijacionoj zaštiti, medicinskoj fizici i potpunom ispunjenju ALARA principa optimizacije izloženosti osoblja zračenju:

1. **Online monitoring oko rendgen aparata i CT skenera:** Sistem omogućava postavljanje jeftinih senzorskih čvorova na kritičnim tačkama unutar i izvan rendgen sale (npr. na kontrolnom pultu, iza olovnih stakala ili na vratima), pružajući tehničkom osoblju jasan uvid u prostorno rasejanje X-zraka u realnom vremenu bez potrebe za prisustvom mernog tima u zoni fluksa .
2. **Nadzor u angio salama:** Tokom kompleksnih fluoroskopskih i interventnih procedura koje traju dugo, sistem može neprekidno računati kumulativno integralno dozno opterećenje, upozoravajući medicinski tim na mesta povećane radijacione opasnosti.
3. **Kontrola u prostorijama za nuklearnu medicinu:** Zbog visoke osetljivosti scintilacionih NaI(Tl) i gasnih (GM) čvorova na niske energetske nivoe, sistem je idealan za praćenje eventualnog curenja radioizotopa i šetnje ambijentalnog fona u laboratorijama za pripremu i aplikaciju radiofarmaka.

10 LITERATURA

1. Todorović N., Nuklearna fizika i detektori jonizujućeg zračenja, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Univerzitet u Novom Sadu, 2009.
2. Krmar M., Interakcija jonizujućeg zračenja sa materijom i detekcija zračenja, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, 2013.
3. Janjić I., Fizika i radiološka tehnika, Medicinska knjiga, Beograd - Zagreb, 1992.
4. ICRP Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Annals of the ICRP, Vol. 37, No. 2-4, Elsevier, 2007.
5. ICRU Report 57: Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation, International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, Maryland, 1998.
6. Knoll G. F., Radiation Detection and Measurement, 4th Edition, John Wiley & Sons, New York, 2010.
7. Boylestad R. L., Nashelsky L., Electronic Devices and Circuit Theory, 11th Edition, Pearson, 2012.
8. nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver Product Specification, Version 1.0, Nordic Semiconductor, 2008.
9. Rainbow MCA 7010 Multichannel Analyzer User Manual and Technical Documentation, Exploration Technologies Inc., 1998.
10. Visual Basic 6.0 Programmer's Guide, Microsoft Corporation, Microsoft Press, 1998.
11. Bushberg J. T., Seibert J. A., Leidholdt E. M., Boone J. M., The Essential Physics of Medical Imaging, 3rd Edition, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2011.
12. Leo W. R., Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach, 2nd Revised Edition, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
13. Ahmed S. N., Physics and Engineering of Radiation Detection, 2nd Edition, Academic Press, Elsevier, 2014.
14. Franco S., Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits, 4th Edition, McGraw-Hill Education, New York, 2015.

15. ICRU Report 85: Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation, Journal of the ICRU, Vol. 11, No. 1, Oxford University Press, 2011.
 16. Kainka B., Measure Gamma Rays with a Photodiode, Elektor Magazine, Issue 414 (June 2011), pp. 22-25, Elektor International Media. (Referenca za Fazu 1 - Elektor koncept).
 17. PhysicsOpenLab, CERN DIY Particle Detector: Solid-State Gamma and Particle Detector developed at CERN S'Cool LAB, naučni portal PhysicsOpenLab, internet adresa: <https://physicsopenlab.org> (Pristupljeno: Avgust, 2026). (Referenca za Fazu 2 - CERN S'Cool LAB koncept).
 18. OpenGeiger.de, Das Stuttgarter-Geigerle: Ein hochempfindlicher Halbleiter-Strahlungsdetektor mit PIN-Fotodioden BPW34, Tehnička dokumentacija i priručnik za razvoj nuklearnih detektora, internet adresa: <http://opengeiger.de> (Pristupljeno: Avgust, 2026). (Referenca za Fazu 3 - OpenGeiger / Stuttgarter-Geigerle koncept).
 19. Fluke Biomedical, Fluke 451B Ion Chamber Radiation Detection Meter with Beta Slide: Users Manual, Fluke Corporation, Radiation Management Services, Cleveland, Ohio, 2014. (Zvanični tehnički etalonski priručnik za rad instrumenta i Freezing mod).
 20. ICRU Report 51, Quantities and Units in Radiation Protection Measurements, International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, Maryland, USA, Bethesda, MD, 1993. (Zvanični međunarodni metrološki standard za definisanje i kalibraciju operativne veličine ambijentalnog doznog ekvivalenta $H^*(10)$).
-

11 BIOGRAFIJA

Branko Radojković rođen je 7.aprila 1968. Godine u Vranju, SFR Jugoslavija. Osnovnu školu završio je u OŠ “Boris Kidrič” (danas OŠ Karadjordje”) u Gornjem Matejevcu kod Niša. Srednju školu OVO “Svetozar Marković” u Nišu, završio je kao laborant za Fiziku i bio učenik generacije za godinu 1986 godine. Za istu godinu dobio je “Teslinu nagradu za stvaralaštvo mladih” Fonda Nikola Tesla za rad “Održivanje koeficijenta trenja pri kotrljanju”. 1987 godine upisao je Prirodno matematički fakultet u Beogradu smer Teorijsko eksperimentalna Fizika. Bio je stipendista Srpske akademije nauka i umetnosti - Beograd i Instituta “Vinča” u Vinči.. 1997 upisao je Prirodno matematički fakultet u Nišu, smer Primenjena Fizika i diplomirao 2005.godine u Nišu. Naslov rada je “Eksperimentalno određivanje prinosa fotonuklearnih reakcija $^{55}\text{Mn}(\gamma,n)$ ^{54}Mn i $^{127}\text{J}(\gamma,n)$ ^{126}J na linearnom akceleratoru”. Od 2001 godine zaposljen je u “Zavodu za zdravstvenu zaštitu radnika Niš” iz Niša i radi u odeljenju za zaštitu od zračenja gde i danas radi. Od 2019 godine radi na poslovima kontrole rendgen aparata. 2022. Godine upisuje master studije Medicinska Fizika na Prirodno-matimatičkom fakultetu u Novom Sadu, departman za fiziku. Autor i koautor više radova i publikacija. Izmedju ostalih:

1. “Radon in a spa in Serbia, a case study”, September 2024, [Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry](#) 333(12):6267-6271, DOI:10.1007/s10967-024-09756-4
2. “A preliminary survey of natural radionuclides in soil and indoor radon in the town of Niš, Serbia”, June 2021, [Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry](#) 329(2):671-677, DOI:10.1007/s10967-021-07851-4
3. RADIOACTIVITY OF SOIL IN THE REGION OF THE TOWN OF NIŠ, SERBIA, March 2019, [Radiation Protection Dosimetry](#), DOI:10.1093/rpd/ncz034
4. Measurement of radon concentration in kindergartens and schools in Nis, Serbia, January 2019, [Facta universitatis - series Physics Chemistry and Technology](#), 17(2):191-197, DOI:10.2298/FUPCT1902191M

12 SAŽETAK (ABSTRACT)

NOVI DETEKCIONI SISTEM ZA MERENJE PROSTORNE DISTRIBUCIJE AMBIJENTALNOG DOZNOG EKVIVALENTA

Sažetak: U ovom radu projektovan je, realizovan i metrološki verifikovan novi autonomni SCADA radijacioni sistem namenjen online praćenju prostorne distribucije ambijentalnog doznog ekvivalenta $H^*(10)$ u medicinskim dijagnostičkim poljima. Bežična senzorska mreža (WSN) operiše u ISM opsegu na 2.4 GHz preko unificiranog nRF24L01+ mrežnog grida sa implementiranim jednosekundnim vremenskim prozorima (*Time-Slotting*), čime je prelivanje komunikacionih bafera svedeno na nulu. Centralna akviziciona stanica na bazi ATmega2560 mikrokontrolera vrši simultani radio-prijem, lokalno skladištenje na FAT32 MicroSD karticu preko robusne *SdFat* biblioteke i asinhroni serijski transfer podataka na PC računar brzinom od 57600 bauda. Mrežu čine četiri periferna merna čvora sa različitim aktivnim volumenima: poluprovodnički čvorovi sa oklopljenim silicijumskim PIN fotodiodama (BPW34S i FD80) povezanim na transimpedansne pojačavače (TIA), interfejs sa profesionalnim gasnim instrumentom Inspector EXP preko optokaplerske izolacije, i višekanalni spektrometar Rainbow MCA 7010 sa neorganskim NaI(Tl) scintilacionim kristalom. Razvijena Windows Visual Basic 6.0 aplikacija, oslanjajući se na asinhroni blok-prijem i originalni "Tajmer tišine" od 1.5 sekunde, uspešno preuzima velike baze mernih podataka i kroz OLE automatizaciju sa MS Excel-om u realnom vremenu generiše integralne dozne proračune i uporedne krive odziva zračenja i termalnih profila. Eksperimentalni test pod medicinskim zakočnim X-snopom od 80 kV dokazao je izvanrednu stabilnost sistema, visoku stopu SNR odnosa i izuzetnu linearnost pojačanih poluprovodničkih PIN fotodioda u poređenju sa profesionalnim etalonima, verifikujući spremnost sistema za trajnu instalaciju u angio-salama i prostorijama za nuklearnu medicinu.

NEW DETECTION SYSTEM FOR MEASURING THE SPATIAL DISTRIBUTION OF AMBIENT DOSE EQUIVALENT

Abstract: This paper presents the design, development, and radiological verification of a novel automated SCADA radiometric system designed for real-time monitoring of the spatial distribution of ambient dose equivalent $H^*(10)$ in diagnostic X-ray environments. The architecture is based on a wireless sensor network (WSN) consisting of four spatially dislocated peripheral nodes utilizing a 2.4 GHz nRF24L01+ transceiver grid operating at 250 kbps. The central base station, designed around an ATmega2560 microcontroller, handles simultaneous radio reception, local data logging onto a FAT32 MicroSD card via the SdFat library, and high-speed communication with a PC at 57600 baud. The peripheral nodes employ distinct active volumes to compare detector medium responses: Nodes 1 and 2 utilize shielded silicon PIN photodiodes (BPW34S and FD80) paired with ultra-low bias current transimpedance amplifiers (TIA); Node 3 interfaces with a professional Inspector EXP Geiger-Müller instrument via optocoupler isolation; and Node 4 integrates a multichannel spectrum analyzer Rainbow 7010 equipped with a highly efficient **NaI(Tl)** scintillation crystal. Communication lockups and buffer overflows were permanently eliminated by implementing a custom asynchronous ASCII-Stream parser driven by single-character Carriage Return (`\r`) commands, combined with a PC host "Silence Timer" operating on a 1.5-second timeout window. The system was experimentally tested in a diagnostic radiography room under an 80 kV Bremsstrahlung beam. The newly developed Visual Basic 6.0 software seamlessly performed OLE automation with Microsoft Excel, automatically distributing data into dedicated tabs, calculating integral dose load via custom mathematical formulas, and plotting 4-channel comparative response curves. The results demonstrated excellent linearity and sensitivity of the enhanced semiconductor photodiodes compared to professional gas-filled detectors under high-intensity fields, verifying the system's readiness for permanent installation in cardiac catheterization labs, angiography suites, and nuclear medicine facilities.

Keywords: Ambient Dose Equivalent, PIN Photodiode, Scintillation Spectrometry, WSN, SCADA, OLE Automation, X-ray Radiation Protection.

13 DODATAK (APPENDIX)

U dodatku navodim kompletna uputstvo za izradu prijemnika i svih čvorova uključujući i module sa PIN diodama. Na kraju dodatka data je specifikacija hardverskih komponenti (Bill of Materials – BOM).

13.1 FRITZING UPUTSTVO ZA CENTRALNI PRIJEMNIK (ARDUINO MEGA 2560)

U Fritzing-u postavite modul **Arduino Mega 2560** u centar, a oko njega rasporedite **MicroSD modul**, **nRF24L01+ radio**, **RTC DS1307 sat** i **LCD 20x4 displej**. Povežite ih tačno prema Tabeli 13.1:

Tabela 13.1 Način povezivanja modula u prijemniku

Periferni modul i njegov PIN	Pin na Arduinu Mega 2560	Svrha veze i inženjerska napomena
MicroSD - GND	GND	Zajedničko uzemljenje napajanja
MicroSD - VCC	+5V	Napajanje logičkih kola čipa
MicroSD - MISO	Pin 50	Hardverska SPI linija (Master In Slave Out)
MicroSD - MOSI	Pin 51	Hardverska SPI linija (Master Out Slave In)
MicroSD - SCK (CLK)	Pin 52	Hardverski takt (Serial Clock)
MicroSD - CS	Pin 53	Fiksni SS (Chip Select) za SdFat biblioteku
nRF24L01+ - GND	GND	Zajedničko uzemljenje napajanja
nRF24L01+ - VCC	+3.3V	⚠ Strogo 3.3V! Povezivanje na 5V trajno uništava radio!
nRF24L01+ - CE	Pin 7	Kontrolni pin radija definisan u kodu Mege
nRF24L01+ - CSN	Pin 8	Selekcioni pin radija definisan u kodu Mege
nRF24L01+ - SCK	Pin 52	Deli hardversku SPI liniju takta sa SD karticom
nRF24L01+ - MOSI	Pin 51	Deli hardversku SPI liniju MOSI sa SD karticom
nRF24L01+ - MISO	Pin 50	Deli hardversku SPI liniju MISO sa SD karticom
nRF24L01+ - IRQ	<i>Nepovezan</i>	Linija prekida (ostaje slobodna u vazduhu)

RTC DS1307 - GND / VCC	GND / +5V	Napajanje hardverskog sata
RTC DS1307 - SDA	Pin 20 (SDA)	I2C linija podataka (Zajednička magistrala)
RTC DS1307 - SCL	Pin 21 (SCL)	I2C linija takta (Zajednička magistrala)
LCD 20x4 I2C - GND / VCC	GND / +5V	Napajanje pozadinskog osvetljenja i ekrana
LCD 20x4 I2C - SDA	Pin 20 (SDA)	Spaja se <i>paralelno</i> sa RTC modulom na SDA liniju
LCD 20x4 I2C - SCL	Pin 21 (SCL)	Spaja se <i>paralelno</i> sa RTC modulom on SCL liniju

13.2 FRITZING UPUTSTVO ZA SVA ČETIRI BEŽIČNA ČVORA (ARDUINO NANO)

Svaki od četiri dislocirana predajnika koristi **Arduino Nano** mikrokontroler. Povezivanje unutrašnjih zajedničkih modula (**nRF24L01+** i **DS18B20**) je identično za sve čvorove, dok se ulazni merni pin razlikuje u zavisnosti od senzorske sonde .

A. Zajedničke bežične i termalne veze (Važi za Čvorove 1, 2, 3 i 4)

- **nRF24L01+ Radio:** Spojite **GND** na GND, **VCC** na **+3.3V** Arduina Nano, **MOSI** na **D11**, **MISO** na **D12**, **SCK** na **D13**, **CSN** na **D7** i **CE** na **D10** (osim na Čvoru 4 gde CE ide na pin **D9**) .
- **Temperaturni senzor DS18B20:** **Pin 1 (GND)** ide na GND, **Pin 3 (VDD)** ide na +5V, a **Pin 2 (Data)** ide direktno na digitalni pin **D5** Arduina Nano.
- **⚠ Važan Pull-Up:** U Fritzing-u obavezno nacrtajte otpornik od **4.7 kΩ** spojen između **Pina 2 (Data)** i **Pina 3 (VDD)** senzora DS18B20!

B. Specifične ulazne metrološke veze po čvorovima

- ◇ **ČVOR 1:** Poluprovodnički detektor BPW34S
 - Izlazni signal sa prve analogne TIA pločice (Krajnji izlaz filtera TL072) povezuje se na analogni ulaz **A0** Arduina Nano.
- ◇ **ČVOR 2:** Poluprovodnička sonda FD80
 - Izlazni pojačani signal sa druge analogne pločice (Krajnji izlaz filtera TL072) povezuje se na analogni ulaz **A0** Arduina Nano.
- ◇ **ČVOR 3:** Interfejs za gasni etalon Inspector EXP

- Kolektor fototranzistora unutar optokaplera **4N25** spaja se na digitalni pin **D2** Arduina Nano (omogućava rad drajvera preko hardverskog prekida `Interrupt 0`) . Emitterski pin optokaplera ide na zajednički GND.
- ◇ ČVOR 4: Interfejs za višekanalni analizator Rainbow MCA 7010
 - Komunikacioni pinovi sa plavog **MAX232** modula spajaju se na Arduino Nano kako bi SoftwareSerial stabilno funkcionisao :
 - **TXD** pin MAX232 modula (Plava žica) → Spaja se na digitalni pin **D4 (RX)** Arduina Nano
 - **RXD** pin MAX232 modula (Zelena žica) → Spaja se na digitalni pin **D3 (TX)** Arduina Nano .

13.3 EASYEDA UPUTSTVO ZA POJAČAVAČKI MODUL BPW34S (ČVOR 1)

Ovaj modul pretvara minijaturnu struju nastalu fotoefektom u silicijumskom kristalu u naponski signal . Koristi se JFET predpojačavač i prvi stepen duplog čipa TL072 konfigurisan kao transimpedansno pojačalo (TIA) sa niskom strujom pomaka .

Net-lista i šema povezivanja komponenti:

1. **Reverzni prednapon fotodiode (Cathode Bias):** Spojite **Katodu (K)** fotodiode **BPW34S** direktno na pozitivni vod baterije od **+9V** (ovo proširuje osiromašenu i-zonu i smanjuje unutrašnji kapacitet sa 70 pF na svega 25 pF).
2. **Ulaz fotostruje:** Spojite **Anodu (A)** fotodiode **BPW34S** na kapiju (*Gate*) N-kanalnog JFET tranzistora **J310** i na **Pin 2 (Invertujući ulaz)** čipa **TL072**.
3. **Transimpedansna povratna sprega (TIA):** Između **Pina 2** i **Pina 1 (Izlaz 1)** čipa **TL072** povežite *paralelno*:
 - Visokoomski otpornik R_1 vrednosti **10 M Ω** (određuje faktor strujno-naponskog pojačanja).
 - Mali keramički kondenzator C_1 vrednosti **1 pF** (stabilizuje rad kola i neutrališe parazitski kapacitet rešetke).
4. **Referentna tačka: Pin 3 (Neinvertujući ulaz)** čipa **TL072** spojite direktno na zajedničko uzemljenje (**GND** / negativni pol baterije).
5. **Napajanje čipa: Pin 8** čipa **TL072** spaja se na **+9V**, a **Pin 4** na zajednički **GND**.

13.4 EASYEDA UPUTSTVO ZA POJAČAVAČKI MODUL FD80 (ČVOR 2)

*S obzirom na to da beogradska industrijska PIN dioda **FD80** poseduje znatno veći aktivni volumen i širu površinu kristala, ona generiše jaču fotostruju pod rendgenom, ali ima i veći sopstveni šum . Zato njena šema povratne sprege koristi dodatni komparatorski stepen oblikovanja impulsa preko drugog dela istog čipa TL072 i precizni trimmer za odsecanje fona .*

13.5 Net-lista i šema povezivanja komponenti:

1. **Katoda** velike diode **FD80** spaja se na naponsku šinu od **+9V**.
2. **Anoda** velike diode **FD80** spaja se na kapiju (*Gate*) drugog JFET tranzistora **J310** i vodi se na **Pin 6 (Invertujući ulaz 2)** čipa **TL072**.
3. **Povratna sprega TIA stepena:** Između **Pina 6** i **Pina 7 (Izlaz 2)** čipa **TL072** povežite paralelno:
 - Otpornik R_2 vrednosti **10 M Ω** (Braon-Crna-Plava-Braon).
 - Mali kondenzator C_2 vrednosti **2.2 pF** (keramički disk sa oznakom 2 ili 2.2, neophodan zbog veće unutrašnje kapacitivnosti **FD80** kristala).
4. **Ugradnja trimera praga (Oznaka 103 - 10 k Ω):**
 - **Nožicu 1** trimera spojite na zajednički **GND**.
 - **Nožicu 3** trimera spojite na stabilisani napon od **+5V** sa Arduina Nano .
 - **Srednju nožicu 2 (Klizač)** trimera spojite na **Pin 5 (Neinvertujući ulaz 2)** čipa **TL072**. Okretanjem ovog trimera na pločici, ručno postavljate oštru naponsku granicu iznad koje će sistem propuštati čiste pravougaone impulse ka Arduinu, potpuno odsecajući parazitski šum fona !
5. **Izlaz signala:** Sa **Pina 7** čipa **TL072** povucite zaštitni otpornik od **10 k Ω** (Braon-Crna-Crna-Crvena-Braon) i povežite ga direktno na analogni ulaz **A0 Arduina Nano**.

13.6 INŽENJERSKI SAVET ZA EKSTREMNI OKLOP (Faradejev kavez):

Kada u EasyEDA programu završite crtanje vodova (*Wire*), predvidite na ivicama obe analogne pločice široke bakarne površine spojene na **GND**. Prilikom sklapanja hardvera na stolu, obe pločice uokvirite **aluminijumskom folijom debljine 16 μ m** koja mora biti fizički

zalemljena za tu GND površinu . Ovaj štit će formirati neprobojan Faradejev kavez koji će unutar rendgen sale stopostotno zaštititi ulazne JFET tranzistore od stravičnog elektromagnetnog šuma !

13.7 SPECIFIKACIJA HARDVERSKIH KOMPONENTI (Bill of Materials - BOM)

Tabela 13.2 Specifikacija hardverskih komponenti (Bill of Materials - BOM)

Pozicija / Modul	Tip / Oznaka komponente	Količina	Funkcija u sistemu i metrološki parametri
Centralni procesor baze	Arduino Mega 2560 (ATmega2560)	1 kom	Akvizicija radio saobraćaja, upravljanje SPI magistralom i FAT32 upisom .
Procesori predajnika	Arduino Nano (ATmega328P)	4 kom	Lokalno brojanje impulsa preko prekida, očitavanje senzora i nRF predaja .
Radio primopredajnici	nRF24L01+ (2.4 GHz ISM)	5 kom	Bežična senzorska mreža, rad na 250 kbps za maksimalan proboj kroz zidove .
Poluprovodnički senzori	PIN Fotodioda BPW34S	4 kom	Aktivni medijum Čvora 1 (Aktivna površina 7.5 mm ²).
Poluprovodnički senzori	PIN Fotodioda FD80 (Ruska)	1 kom	Aktivni medijum Čvora 2 sa proširenim intrinzičnim (i) slojem.
Operacioni pojačavači	TL072 (DIP-8 kućište)	2 kom	Niskošumni dupli Op-Amp za transimpedansno pojačanje (TIA) i filtriranje .
Ulazni tranzistori	J310 (N-channel JFET)	2 kom	Pretpojačavački stepen osjetljiv na punjenje (Charge-Sensitive Preamp).
Gasni etalon sistem	Sonda Inspector EXP (GM cev)	1 kom	Čvor 3 – Eksterni radijacioni etalon za kalibraciju mernog polja.
Scintilacioni spektrometar	Rainbow MCA 7010 + NaI(Tl)	1 kom	Čvor 4 – Višekanalni analizator, scintilacioni kristal natrijum-jodida.
Serijski interfejs MCA	MAX232 TTL-RS232 modul	1 kom	Izolacija i prilagođavanje naponskih nivoa za Rainbow softverski port .
Optoelektronska	Optokapler 4N25 (ili	1 kom	Galvanska izolacija visokog

izolacija	PC817)		napona (500V) GM sonde od procesora .
Senzori temperature	DS18B20 (1-Wire, TO-92)	4 kom	Ambijentalno termalno profilisanje i odbrana od poluprovodničkog drifta.
Lokalna memorija baze	MicroSD Card Modul (SPI, 5V/3.3V)	1 kom	Trajno skladištenje datoteke log.txt preko SdFat drajvera .
Hardverski sat stanice	DS1307 RTC modul + CR2032	1 kom	Generisanje realnog vremena i hronološkog vremenskog pečata .
Lokalni vizuelni ekran	LCD 20x4 sa I2C leđima (0x27)	1 kom	Živi lokalni prikaz doza ($\mu\text{Sv/h}$) i temperatura u sekundi .
Otpornici povratne sprege	10 MΩ (Slojevit, 1% tolerancija)	2 kom	Definiše transimpedansno pojačanje struje fotodiode (R).
Zaštitni/Filterski otpor.	10 kΩ (5 prstenova: Braon-Crna-Crna-Crvena-Braon)	8 kom	Otpornici za oblikovanje impulsa i zaštitu analognih pinova Arduina.
Pull-up otpornici	4.7 kΩ (Ugljeni sloj)	4 kom	Neophodni otpornici za stabilizaciju Dallas 1-Wire magistrale.
Fini trimer potencimetri	103 (10 k Ω , linearni trimer)	2 kom	Hirurško podešavanje komparatorskog praga diskriminacije šuma .
Kondenzatori stabilizacije	1 pF / 2.2 pF (Keramički disk)	4 kom	Kompenzacija parazitnog kapaciteta fotodioda u povratnoj sprezi TIA.
Spojni/Filterski kondenz.	100 nF (Oznaka 104, keramički)	10 kom	Propusni filteri za odsecanje repova impulsa i EMI filtriranje.
Elektromagnetni štit	Aluminijumska folija (16 μm)	-	Apsolutni optički oklop fotodioda i odbrana od parazitskog RF šuma.
Autonomno napajanje	Baterije 9V (Alkalne / Li-Ion)	5 kom	Nezavisno napajanje predajnih čvorova i JFET pojačavača.

UNIVERZITET U NOVOM SADU

PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa:

Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada:

Master rad

VR

Autor:

Branko Radojković

AU

Mentor:

Miodrag Krmar

MN

Naslov rada:

Novi detekcioni sistem za merenje
prostorne distribucije ambijentalnog
doznog ekvivalenta

NR

Jezik publikacije:

srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda:

srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja:

Srbija

ZP

Uže geografsko područje:

Vojvodina

UGP

Godina:

2026.

GO

Izdavač:

Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa:

Prirodno-matematički fakultet, Trg
Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

MA

Fizički opis rada:

FO

Naučna oblast:

Medicinska fizika

NO

Naučna disciplina:

Fizika

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

Ambijentalni dozni ekvivalenta, detektori

PO

UDK

Čuva se:

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u
Novom Sadu

ČU

Važna napomena:

nema

VN

Izvod:

IZ

U ovom radu je razvijen i metrološki verifikovan novi autonomni bežični SCADA sistem za online merenje prostorne distribucije ambijentalnog doznog ekvivalenta $H^*(10)$ u medicinskim dijagnostičkim poljima. Sistem uspešno integriše centralni akvizicioni prijemnik (Arduino Mega 2560) sa MicroSD FAT32 skladištenjem i četiri daljinska merna čvora koji pokrivaju poluprovodničke PIN fotodiode (BPW34S i FD80), gasni Geiger-Müller detektor i NaI(Tl) scintilacioni spektrometar.

April 2023.

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

Datum odbrane:

2026.

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

Prof. dr Miodrag Krmar

član:

član:

član:

UNIVERSITY OF NOVI SAD

FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

Monograph publication

DT

Type of record:

Textual printed material

TR

Content code:

Final paper

CC

Author:

Branko radojković

AU

Mentor/comentor:

Miodrag Krmar

MN

Title:

**NEW DETECTION SYSTEM FOR
MEASURING THE SPATIAL
DISTRIBUTION OF AMBIENT DOSE
EQUIVALENT**

TI

Language of text:

Serbian (Latin)

LT

Language of abstract:

English

LA

Country of publication:

Serbia

CP

Locality of publication:

Vojvodina

LP

Publication year:

2026

PY

Publisher:

Author's reprint

PU

Publication place:	Faculty of Science and Mathematics, Trg
PP	Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
Physical description:	
PD	
Scientific field:	Medical Physics
SF	
Scientific discipline:	Physics
SD	
Subject/ Key words:	Ambient Dose Equivalent, Detectors.
SKW	
UC	
Holding data:	Library of Department of Physics, Trg
HD	Dositeja Obradovića 4
Note:	none
N	
Abstract:	This paper presents the development and
AB	radiological verification of a new autonomous wireless SCADA system designed for online monitoring of the spatial distribution of ambient dose equivalent $H^*(10)$ in medical diagnostic fields. The architecture successfully integrates a central data acquisition receiver (Arduino Mega 2560) utilizing FAT32 MicroSD logging with four dislocated sensor nodes featuring enhanced silicon PIN photodiodes (BPW34S and FD80), a gas-filled Geiger-Müller tube, and NaI(Tl) scintillation spectrometer.
Accepted by the Scientific Board:	April 2023.
ASB	
Defended on:	
DE	
Thesis defend board:	
DB	

President:

Prof.dr Miodrag Krmar

Member:

Member:

Member: