

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
ODDELEK ZA FIZIKO
FIZIKA
FIZIKA JEDRA IN OSNOVNIH DELCEV

Anže Medved

**KARAKTERIZACIJA ČITALNE ELEKTRONIKE
ZA DETEKTOR OBROČEV ČERENKOVA PRI
BELLE II**

Magistrsko delo

MENTOR: doc. dr. Rok Pestotnik

Ljubljana, 2016

Izjava o avtorstvu in objavi elektronske oblike

izjavljam:

- da sem magistrsko delo z naslovom *KARAKTERIZACIJA ČITALNE ELEKTRONIKE ZA DETEKTOR OBROČEV ČERENKOVA PRI BELLE II* izdelal samostojno pod mentorstvom doc. dr. Roka Pestotnika,
- da je elektronska oblika dela identična s tiskano obliko in
- da Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani dovoljujem objavo elektronske oblike svojega dela na spletnih straneh Repozitorija Univerze v Ljubljani.

Ljubljana, dne 5. 9. 2016

Podpis: _____

Zahvala

Zahvaljujem se prof. dr. Petru Križanu, ki me je s svojimi predavanji navdušil za študij fizike osnovnih delcev in mi omogočil opravljanje magistrskega dela na odseku F9 Instituta Jožef Stefan v Ljubljani. Za pomoč pri izvedbi eksperimenta in magistrskega dela se zahvaljujem mentorju doc. dr. Roku Pestotniku in prof. dr. Samo Korparju. Zahvaljujem se tudi dr. Roku Dolencu za pomoč pri analizi podatkov. Posebna zahvala gre moji družini, vsem prijateljem in sošolcem, ki so me podpirali med študijem.

Izvleček

V eksperimentalni fiziki osnovni delcev je zelo pomembna identifikacija. Za ločevanje med kaoni in pioni bo v spektrometru Belle II uporabljen detektor obročev Čerenkova. Njegove glavne komponente so sevalec iz aerogela, prostor kjer se razširjajo obroči Čerenkova, fotonski detektor HAPD in čitalna elektronika. Celoten sistem mora delovati v močnem magnetnem polju in mora biti odporen na sevalne poškodbe. Magistrsko delo obravnava preizkus čitalne elektronike, ki smo jo testirali pred vgradnjo v spektrometer. Opisana je eksperimentalna shema in eksperimentalni podatki. Pri vsaki čitalni elektroniki smo morali izmeriti napajalne napetosti in tokove, napetosti, ki omogočijo pravilno delovanje celotnega tiskanega vezja, odziv kanalov na testni signal, nivo šuma in odziv kanalov na spreminjanje nivoja proženja.

Ključne besede: identifikacija delcev, sevanje Čerenkova, detektor obročev Čerenkova, aerogel, HAPD, čitalna elektronika, FPGA, ASIC, šum, testni signal, naklon srednje vrednosti.

Abstract

Identification is very important in experimental particle physics. To distinguish between kaons and pions in spectrometer Belle II, ring imaging Cherenkov counters will be used. Its main components are the radiator from the aerogel, an expanded volume to form Cherenkov rings, HAPD photon detector and readout electronics. The entire system must operate in the strong magnetic field and must be resistant to radiation damage. The master's thesis deals with the examination of the readout electronics, which was tested before installation in the spectrometer. In this work I describe an experimental scheme and experimental data. For each readout electronics we need to measure the power voltages and currents, voltages that enable the proper functioning of the whole printed circuit, response of the channels on the test signal, the noise level and response of the channels to the threshold levels.

Keywords: particle identification, Cherenkov radiation, ring imaging Cherenkov counter, aerogel, HAPD, readout electronics, FPGA chip, ASIC chip, test of the readout electronics.

Kazalo

Seznam slik	iii
Seznam tabel	vii
1 Uvod	1
1.1 Uvod	1
1.2 Motivacija	2
1.3 Pospeševalnik SuperKEKB	3
1.4 Spektrometer Belle II	4
2 Teorija	7
2.1 Sevanje Čerenkova	7
2.2 Identifikacija delcev s pomočjo sevanja Čerenkova	10
3 Detektor obročev Čerenkova	15
3.1 Detektor obročev Čerenkova ARICH	15
3.2 Sevalec	16
3.3 Fotonski detektor	20
3.3.1 Polprevodniški detektor	21
3.3.2 HAPD	23
3.4 Čitalna elektronika	24
3.4.1 Čip ASIC	27
3.4.2 Čip FPGA	30
3.4.3 Testni signal	31
3.4.4 Vezje za nastavitve nivoja proženja	32
3.4.5 Temperaturni senzor	33
3.4.6 Sistem za zajemanje podatkov	33
4 Merilni sistem za karakterizacijo tiskanih vezij	37
4.1 Shema eksperimentalne postavitve	37
4.2 Potek meritev	40
4.2.1 Dodatno tiskano vezje	41
4.2.2 Programa za zajemanje podatkov	43
5 Analiza meritev	47
5.1 Meritev tokov	47
5.1.1 Primeri napak	49
5.1.2 Porazdelitve tokov	50
5.2 Analiza testa tiskanih vezij	52

5.2.1	Analiza testa linearnosti vezja za nivo proženja	52
5.2.2	Analiza napetosti in temperature	54
5.2.3	Odziv kanalov	58
5.2.4	Analiza odziva kanalov na testni signal	59
5.2.5	Analiza šuma	61
5.2.6	Odziv kanalov na spreminjanje odmika od nivoja proženja . .	64
5.2.7	Primeri napak	68
6	Zaključek	71
	Literatura	73
	Dodatek A Protokol meritev	75
	Dodatek B Sheme testiranega vezja	79
	Dodatek C Povezava med HAPD in ASIC	83

Seznam slik

1.1	Tri generacije osnovnih delcev, umeritveni bozoni in Higgsov bozon sestavljajo Standardni model [1].	1
1.2	Pospeševalnik SuperKEKB [4].	3
1.3	Shema spektrometra Belle II in posamezni deli detektorja [7].	4
2.1	Primer polarizacije dielektrične snovi pri prehodu negativno nabitega delca. Smer potovanja delca je označena s puščico [10].	8
2.2	Sevanje Čerenkova v snovi. Z rdečo puščico je označena trajektorija nabitega delca, z modrimi pa emisije fotonov [9].	9
2.3	Princip delovanja obročev Čerenkova (RICH). Na levi so prikazane trajektorije fotonov, ki so se izsevali pri višji hitrosti nabitega delca, kot na desni strani.	11
2.4	Porazdelitev kota Čerenkova v odvisnosti od gibalne količine v dveh primerih: ko uporabimo za sevalec aerogel in mešanico plina [13].	11
2.5	Porazdelitev kota Čerenkova za kaone in pione pri gibalni količini 3.5 GeV/c in sevalcu z lomnim količnikom 1.05 [14].	12
3.1	Shematski prikaz detektorja obročev Čerenkova. Povzeto in prirejeno po [3].	16
3.2	Shema prikazuje postavitev fotonskega detektorja HAPD (zgoraj) in sevalca iz aerogela (spodaj) [14].	17
3.3	Izmerjena prepustnost [3].	18
3.4	Kos aerogela [3].	19
3.5	Prikaz širine σ_θ	19
3.6	Dva primera uporabe dveh sevalcev. V primeru (a) imamo dva enako debela sevalca z istima lomnima količnikoma. V primeru (b) imamo dva enako debela sevalca, vendar z različnima lomnima količnikoma, pri čemer mora biti drugi lomni količnik večji od prvega.	20
3.7	(a) Shema delovanja in (b) fotografija fotonskega detektorja HAPD [3].	21
3.8	Shematski prikaz p-n stika v silicijevi fotodiodi. Povzeto in prirejeno po [17].	22
3.9	Shematski prikaz delovanja hibridnih detektorjev APD. Povzeto in prirejeno po [17].	23
3.10	Kvantni izkoristek fotokatode pri HAPD [14].	24
3.11	Shematski prikaz sprednje in zadnje strani elektronike. Pomen številke od 1 do 9 je razložen v tekstu.	25
3.12	Shema povezave enega kanala iz sensorja HAPD do čipa ASIC. Vrednosti upornika in kondenzatorja znašata: $R=10\text{ M}\Omega$, $C=1\text{ nF}$	26
3.13	Shema čipa ASIC [19].	27

3.14	Pot signala znotraj čipa ASIC. Povzeto in prirejeno po [5].	28
3.15	Ohišje s Sa03 čipom ASIC (a) spredaj in (b) zadaj.	29
3.16	Čip FPGA.	30
3.17	(a) Shematski prikaz vezja, ki generira testni signal in (b) oblika testnega signala.	32
3.18	Vezje za nivo proženja. Vrednost upornika znaša $R=10\text{ k}\Omega$	32
3.19	Register temperaturnega senzorja.	33
3.20	Komunikacija SPI, kjer prenesemo 4-bitno sporočilo [5].	34
3.21	Podatkovni okvir.	34
3.22	Prenos podatkov [5].	34
3.23	Primer meritve dolžine signala nad pragom [5].	35
4.1	Shema eksperimentalne postavitve.	38
4.2	Fotografije naprav, ki smo jih uporabili za test tiskanih vezij.	39
4.3	Priprava na meritev. Vsaki čitalni elektroniki sem določil serijsko številko in popisal čipe ASIC.	40
4.4	Seznam kanalov v tiskanem vezju. Kanali z enako barvo pripadajo enemu čipu ASIC, ki je označen z enako barvo.	41
4.5	Dodatno tiskano vezje, ki smo ga uporabili za testiranje čitalne elektronike.	42
4.6	Grafični vmesnik programa ARICH Feb Test.	43
4.7	Grafični vmesnik programa Sa02_daq.	44
4.8	Okno za nastavljanje parametrov čipa Sa02.	45
5.1	Analiza tokov.	48
5.2	Primeri napak pri meritvi z visoko napetostjo.	49
5.3	Primeri napak pri meritvi z nizko napetostjo.	50
5.4	Tokovi pri napajalnih napetostih.	51
5.5	Rezultati drugega dela meritev.	52
5.6	Meritev odziva linearnosti vezja za nivo proženja pri tiskanem vezju s serijsko številko 101.	53
5.7	Primeri napak pri testu linearnosti.	53
5.8	Meritev napetosti v odvisnosti sn časa pri tiskanem vezju s serijsko številko 116.	54
5.9	Porazdelitve napajalnih napetosti.	55
5.10	Porazdelitve VCC napetosti.	56
5.11	Porazdelitev VDD (a) in VSS (b) napetosti.	56
5.12	Porazdelitev dveh napetosti za nivo proženja.	57
5.13	Porazdelitev temperature.	57
5.14	Shematski prikaz signala enega kanala (levo) in njegove porazdelitve (desno).	58
5.15	Primer beleženja števila dogodkov čez prag diskriminacije.	58
5.16	a) Odziv vseh 144 kanalov tiskanega vezja s serijsko številko 442 na testni signal, b) odziv kanala 51 na testni signal in prikaz določevanja parametra FWHM.	59
5.17	Porazdelitev parametra FWHM za vse kanale tiskanega vezja s serijsko številko 442.	60
5.18	Primerjava odziva kanalov in porazdelitve parametra FWHM za dva tiskana vezja.	61

5.19	Odziv kanala 58 tiskanega vezja s serijsko številko 349 na testni signal.	61
5.20	a) Porazdelitev meritve signala elektronskega šuma tiskanega vezja s serijsko številko 442 in b) meritev signala elektronskega šuma kanala 51.	62
5.21	Porazdelitev parametra σ za vse kanale tiskanega vezja s serijsko številko 442.	63
5.22	Primerjava šuma kanalov in porazdelitve σ za dve čitalni elektroni.	63
5.23	Šum kanala 58 pri čitalni elektroni s serijsko številko 349.	64
5.24	Odziv kanalov na grobo nastavitvev parametra odmika nivoja proženja	65
5.25	Odziv kanalov na fino nastavitvev parametra odmika nivoja proženja. .	66
5.26	Odvisnost srednje vrednosti kanalov od odmika nivoja proženja in porazdelitev naklonov.	67
5.27	Korelacija naklonov iz meritev čipov in iz meritev tiskanih vezij za (a) grobo in (b) fino nastavitvev odmika od nivoja proženja.	68
5.28	Primer napake na tiskanem vezju s serijsko številko 433.	69
5.29	Primer napake na tiskanem vezju s serijsko številko 363.	69
A.1	Priprava na meritev. Vsaki čitalni elektroni sem določil serijsko številko in popisal čipe ASIC.	75
A.2	Dodatno tiskano vezje, ki smo ga uporabili za testiranje čitalne elektrone.	76
A.3	Grafični vmesnik programa ARICH Feb Test.	77
A.4	Grafični vmesnik programa Sa02_daq.	78
B.1	Shema vezja, kjer iz napajalnih napetosti dobimo manjše napetosti preko komponent LDO.	79
B.2	a) Shema vezja za nivo proženja in b) shema vezja za generacijo testnega signala.	80
B.3	a) Shema vezja za merjenje temperature in b) shema vezja za uravnavanje urinega takta.	81
B.4	Shema povezav, ki smo jih testirali pri testu z visoko napetostjo. . . .	82
C.1	Shema povezave med detektorjem HAPD in čipom ASIC.	83
C.2	Vse povezave na fotonskem detektorju HAPD.	84

Seznam tabel

3.1	Lastnosti HAPD [3].	24
3.2	Seznam globalnih parametrov [5].	28
3.3	Seznam lokalnih parametrov [5].	29
3.4	Specifikacija Sa03 čipa ASIC [5].	30
3.5	Specifikacija čipa FPGA [21].	31
4.1	Vrednosti kondenzatorjev in upornikov na dodatnem tiskanem vezju.	41

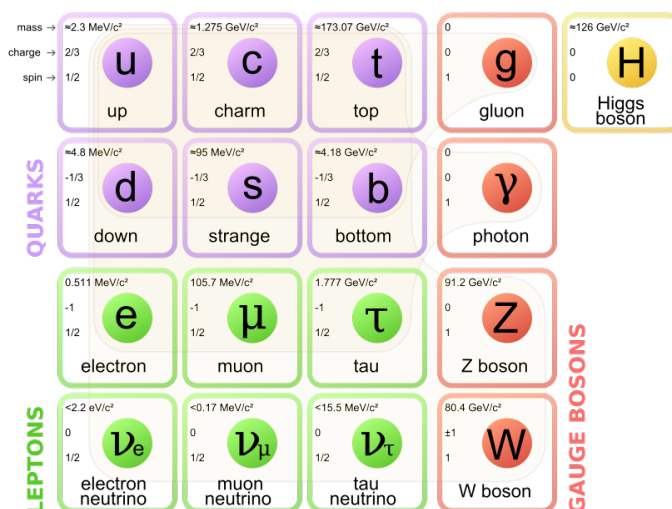
Poglavje 1

Uvod

1.1 Uvod

Vse okoli nas, torej vsa snov v našem vesolju, je sestavljena iz le nekaj osnovnih gradnikov snovi, ki jim pravimo osnovni delci. Te gradnike delimo v dve skupini, in sicer na *leptone* in *kvarke*. Leptoni nastopajo samostojno, medtem ko kvarke vedno najdemo povezane v skupinah. Kombinacijam kvark-antikvark ($q\bar{q}$) pravimo *mezoni*, medtem ko med *barione* uvrščamo kombinacije treh kvarkov ($q_1q_2q_3$). Med njimi delujejo štiri sile: elektromagnetna, šibka, močna in gravitacijska. Elektromagnetna sila poskrbi, da se atomi vežejo v molekule in da elektroni krožijo okoli atomskega jedra. Močna sila povezuje kvarke med seboj v nukleonu, medtem ko šibka sila poskrbi za to, da se kvarki pretvarjajo eden v drugega.

Naše razumevanje, kako ti osnovni delci in tri od štirih naštetih sil, interagirajo med sabo, je združeno v Standardnem Modelu (SM) osnovnih delcev. Znotraj SM poznamo tri generacije osnovnih delcev, Slika 1.1. Poleg kvarkov in leptonov SM vsebuje tudi umeritvene bozone, ki so nosilci osnovnih sil. Ključno vlogo pa ima Higgsov bozon, ki pojasni, zakaj dobijo osnovni delci maso.



Slika 1.1: Tri generacije osnovnih delcev, umeritveni bozoni in Higgsov bozon sestavljajo Standardni model [1].

Tipične raziskave na področju eksperimentalne fizike osnovnih delcev potekajo tako, da delce pospešimo v pospeševalniku in jih nato trčimo med sabo ali v tarčo in

gledamo njihove razpadne produkte. Med takšne eksperimente sodi tudi eksperiment Belle II, ki se nahaja v mestu Tsukuba na Japonskem.

V prvem delu mojega magistrskega dela bom na kratko predstavil eksperiment Belle II. Sestavljata ga pospeševalnik SuperKEKB in spektrometer Belle II, ki sta nadgradnja obstoječega pospeševalnika KEKB in spektrometra Belle. Spektrometer Belle II je postavljen na interakcijski točki pospeševalnika. Njegova glavna naloga je identifikacija razpadnih produktov, ki nastanejo po trku. Pri identifikaciji nabitih delcev, ki so v eksperimentu Belle II v območju gibalne količine med $1 \text{ GeV}/c$ in $100 \text{ GeV}/c$, so zelo uporabni detektorji obročev Čerenkova.

V drugem delu mojega magistrskega dela bom predstavil teoretično ozadje sevanja Čerenkova. Prav tako bom opisal identifikacijo delcev s pomočjo omenjenega procesa. Pri eksperimentu Belle II ta pojav izkoriščajo predvsem za ločevanje med kaoni in pioni. Pri tem si lahko pomagamo z dvema tipa detektorjev. Predstavil bom njune komponente in kako se razlikujeta.

V tretjem delu bom opisal tip Čerenkovega detektorja, ki smo ga izbrali za naš eksperiment. Obrazložil bom, zakaj je ravno ta primeren in bo v nadaljevanju podrobneje predstavljen. Večji poudarek bo na opisu čitalne elektronike takšnega detektorja, saj je to osrednja tema mojega magistrskega dela.

V četrtem delu bom predstavil eksperimentalno postavitve za testiranje čitalne elektronike. Navedel bom vse pripomočke in aplikacije, ki smo jih uporabili pri testiranju, ter opisal potek meritev in težave, s katerimi sem se srečeval.

V zadnjem delu bom predstavil rezultate meritev. Opisal bom dva testa, ki smo ju opravili in pokazal statistične porazdelitve dobljenih rezultatov. Predstavim še nekaj napak, s katerimi sem se srečeval pri meritvah.

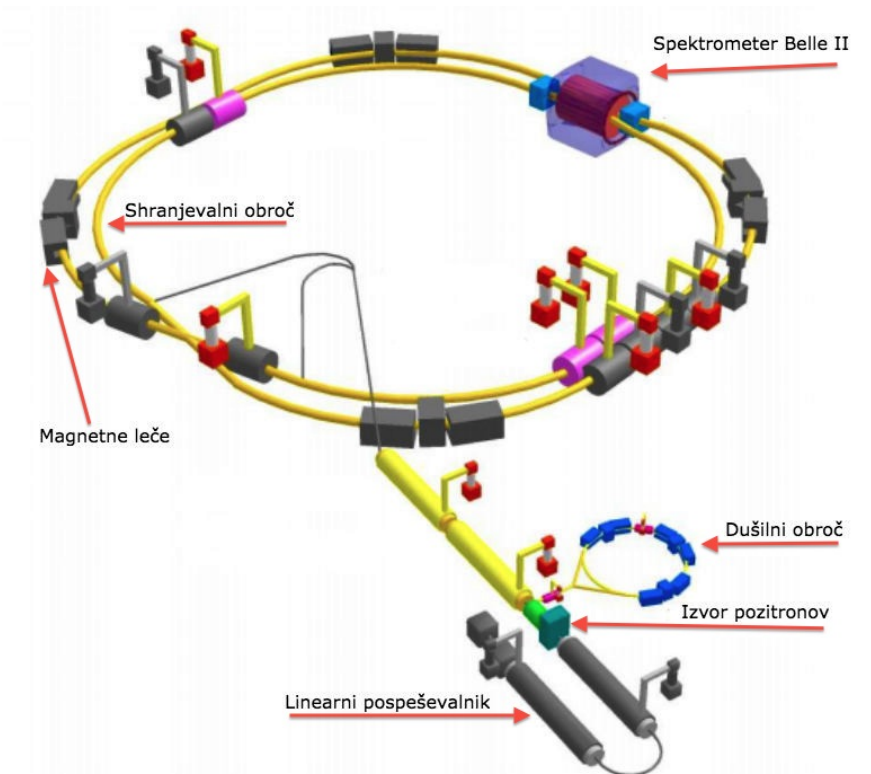
1.2 Motivacija

Znotraj Standardnega modela ne znamo opisati gravitacije, kot jo opisuje splošna teorija relativnosti. Opisati ne znamo samo gravitacije, ampak tudi nekaterih procesov, ki imajo znotraj SM povsem drugačne vrednosti, kot so jih pokazali eksperimenti. Ne znamo, na primer, opisati nevtrinskih oscilacij, kar nakazuje na to, da imajo nevtrini maso. Znotraj SM so ti delci brez mase. Prav tako ne znamo opisati asimetrije med materijo in antimaterijo ter izvora temne snovi in temne energije. To vse nakazuje na fiziko onkraj SM. Vanjo sodijo teoretični modeli in teoretična dognanja, ki opisujejo manjkajoče člene. Eden od načinov za proučevanje te t. i. *nove fizike* je študij redkih procesov. Za takšen način raziskovanj so se odločili pri eksperimentu Belle II. Raziskovali bodo redke procese pri razpadih mezonov B in D ter leptonov τ . Mezioni B so kratkoživi delci in takoj razpadejo na kaone, pione, protone, nevtrone, elektrone, mione in nevtrine.

S študijami redkih razpadov so v eksperimentu Belle že prišli do pomembnih odkritij. Izmerili so majhno razliko pri razpadih $B^0\bar{B}^0$. Zaradi eksperimentalnega dokaza kršitve simetrije CP v mezonih B, ki sta ga neodvisno predstavili dve eksperimentalni skupini, so leta 2008 prejeli Nobelovo nagrado *Y. Nambu* za *odkritje mehanizma spontane zlomitve simetrije v osnovnih delcih*, ter *M. Kobayashi* in *T. Maskawa* za *odkritje in izvor kršitve CP simetrije, ki napove obstoj vsaj treh družin kvarkov v naravi* [2].

1.3 Pospeševalnik SuperKEKB

SuperKEKB je asimetričen trkalnik e^-e^+ , Slika 1.2. Sestavljajo ga izvor nabitih delcev, linearni pospeševalnik in shranjevalna obroča, v katerih vodimo ter pospešujemo elektrone in pozitrone. Izbira okroglega pospeševalnika nam omogoča, da lahko delce pospešujemo večkrat in do višjih hitrosti. Obroč, po katerem potujejo elektroni, se imenuje visoko-energijski obroč (angl. high energy ring HER). Drugi, po katerem potujejo pozitroni, pa se imenuje nizko-energijski obroč (angl. low energy ring LER) [3]. Zaradi večje energije v HER obroču elektroni potujejo z večjo hitrostjo kot pozitroni v LER obroču. Izvor elektronov je lahko fotokatoda, pozitrone pa



Slika 1.2: Pospeševalnik SuperKEKB [4].

dobimo s trkanjem relativističnih elektronov v tarčo iz volframa [5]. Za usmerjanje in pospeševanje curkov v obročih se uporabljajo elektromagneti. Premer celotnega kroga je ~ 1 km.

SuperKEKB je poznan kot tovarna mezonov B. V interakcijski točki trčita e^- z energijo 7 GeV in e^+ z energijo 4 GeV [3]. Pri tem nastane resonanca $\Upsilon(4S)$. To ustreza mezonu, ki je sestavljen iz kvarka b in njegovega antidelca \bar{b} , ter maso 10.58 GeV.

$$E = 2\sqrt{E_{HER}E_{LER}}. \quad (1.1)$$

Ta v trenutku razpade na para mezonov $B\bar{B}$, in sicer B^+B^- ali $B^0\bar{B}^0$. Verjetnost za ta razpadni kanal je 96 % [6]. Ker mezoni B niso obstojni, razpadejo še preden jih lahko detektiramo v spektrometru. To pa ni edini možni proces. Poleg velikega števila mezonov B dobimo tudi večjo količino mezonov D in leptonov τ .

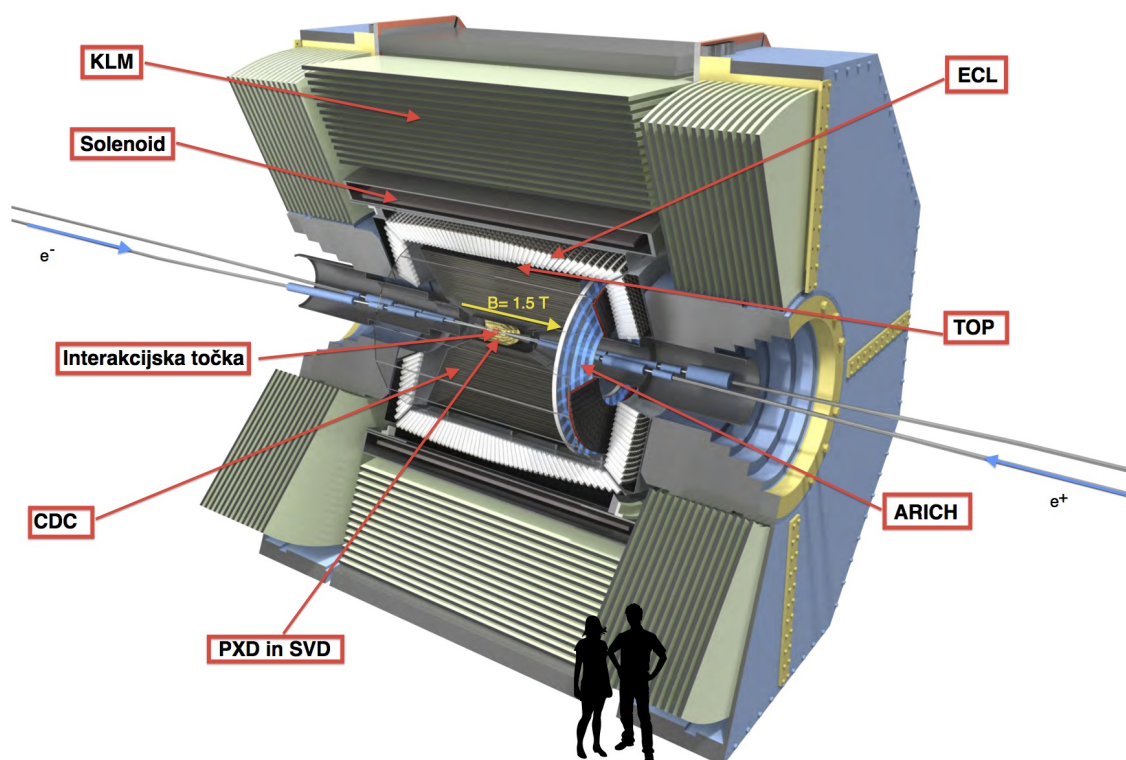
Ti delci imajo zelo kratek življenjski čas in razpadejo še preden jih lahko detektiramo. Detektiramo pa lahko njihove razpadne produkte, ki imajo zadosti dolgo

življenjsko dobo. Ti večinoma letijo v smeri HER, kar omogoča študijo časovno odvisnih razpadov. Med razpadne produkte, ki jih lahko detektiramo, sodijo kaoni, pioni, mioni, elektroni, protoni in nevtroni.

Z nadgradnjo pospeševalnika bodo luminoznost povečali približno za 40-krat, kar bo omogočalo 50-krat večji vzorec podatkov kot pri pospeševalniku KEKB [3].

1.4 Spektrometer Belle II

Da bi preučili fizikalno ozadje samih razpadov, moramo detektirati razpadne produkte. Za to uporabljamo spektrometre, kot je spektrometer Belle II, Slika 1.3, znotraj katerega je močno magnetno polje z gostoto 1.5 T, ki ga generira superprevodni solenoid. Magnetno polje bo kazalo v smeri HER in bo zajemalo celoten detektor [3]. Trajektorije nabitih delcev bodo v magnetnem polju ukrivljene, medtem ko na nenabite delce magnetno polje nima vpliva. Iz ukrivljenosti trajektorije lahko določimo gibalno količino nabitega delca in to je eden od načinov njegove identifikacije.



Slika 1.3: Shema spektrometra Belle II in posamezni deli detektorja [7].

Okoli interakcijske točke je najprej postavljen detektor verteksov, ki ga sestavljata PXD¹ in SVD² [3]. Ta dva sistema nam priskrbita detekcijo prvih točk pri letu razpadnih delcev skozi detektor. Iz teh točk nato rekonstruiramo trajektorije delcev. Ti nato preletijo osrednjo potovalno komoro CDC³. S pomočjo ionizacije

¹Pixel Detektor

²Silicon Vertex Detector

³Central Drift Chamber

plina v tej komori lahko določimo energijske izgube nabitega delca dE/dx in njegovo gibalno količino iz rekonstruiranega tira. Pri identifikaciji delcev bosta sodelovala še dva tipa detektorja, ki bosta ločevala na podlagi izsevanih fotonov Čerenkova. Detektor časovnega razširjanja fotonov Čerenkova TOP⁴ in detektor obročev Čerenkova ARICH⁵ bosta služila za identifikacijo kaonov in pionov in ločevanje med njima. Naslednji del spektrometra sestavlja elektromagnetni kalorimeter ECL⁶. Ta identificira elektrone in fotone s pomočjo meritve odložene energije. Že iz imena lahko ugotovimo, da se v njem ustavijo delci, ki elektromagnetno interagirajo s snovjo. Zunanji del detektorja predstavlja sistem KLM⁷, v katerem bodo detektirali dolgožive nevtralne kaone K_L^0 in mione. Ti se zaradi šibke interakcije s snovjo ne zaustavijo v kalorimetru.

⁴Time-Of-Propagation detector

⁵Aerogel Ring-Imaging Cherenkov detector

⁶Electromagnetic Calorimeter

⁷ K_L^0 in μ detektor

Poglavje 2

Teorija

Identifikacija delcev je zelo pomembna v fiziki osnovnih delcev. Delce lahko ločujemo po njihovi masi, ali po tem, kako interagirajo. Identifikacija s pomočjo slednje metode se uporablja za ločevanje med elektroni, fotoni in mioni. V ta namen se uporabljajo kalorimetri in mionski sistemi. Maso delcev lahko določimo iz relacije med gibalno količino in hitrostjo delca:

$$p = \gamma mv, \quad (2.1)$$

kjer gibalno količino p določimo iz ukrivljenosti trajektorije nabitega delca v magnetnem polju. Hitrost v lahko izmerimo na več načinov:

- iz meritve časa preleta,
- iz ionizacijskih izgub $\frac{dE}{dx}$,
- iz prehodnega sevanja in
- iz sevanja Čerenkova.

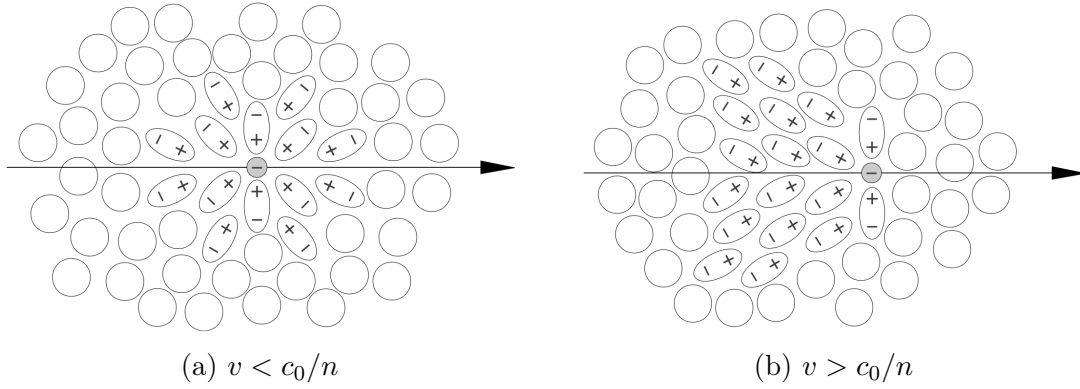
V spektrometru Belle II kar dva sistema uporabljata Čerenkovo sevanje za identifikacijo delcev. To sta TOP in ARICH, ki smo ju spoznali na Sliki 1.3.

V tem poglavju, ki je v celoti namenjeno sevanju Čerenkova, bom najprej opisal teoretično ozadje in nato identifikacijo delcev s pomočjo omenjenega sevanja.

2.1 Sevanje Čerenkova

Sevanje Čerenkova je pojav, pri katerem nabiti delec, ki se v dielektričnem sredstvu giblje hitreje kot svetloba, izseva fotone. Leta 1934 je P. A. Čerenkov opazil emisijo modre svetlobe iz steklenice, napolnjene z vodo, ki je bila izpostavljena radioaktivnemu sevanju [8]. Kmalu za tem, leta 1937, sta I. M. Frank in I. J. Tamm izoblikovala teorijo, ki opiše ta pojav. Za odkritje in teoretično razlago so leta 1958 dobili Nobelovo nagrado [9].

Poglejmo si to sevanje podrobneje. Nabiti delec pri prehodu skozi dielektrično sredstvo, povzroči začasno polarizacijo snovi, skozi katero je potoval. Pri tem nastanejo šibki električni dipoli. Poglejmo si primer prehoda negativno nabitega delca, kar prikazuje Slika 2.1. Takšno stanje ni stabilno, zato pride do oscilacij dipolov. Le-ti se relaksirajo nazaj v osnovno stanje in pri tem izsevajo fotone.



Slika 2.1: Primer polarizacije dielektrične snovi pri prehodu negativno nabitega delca. Smer potovanja delca je označena s puščico [10].

Ločimo lahko dva primera: $v < c$ in $v > c$, kjer je v hitrost nabitega delca in $c = c_0/n$ hitrost svetlobe v mediju. V prvem primeru, Slika 2.1a, dobimo polarizacijo, ki je simetrična okoli nabitega delca. Relaksacija v tem primeru je destruktivna, posledično se ne izseva noben foton. V drugem primeru, Slika 2.1b, dobimo polarizacijo, ki sledi nabitemu delcu. Sedaj je relaksacija konstruktivna in pride do izsevanja fotonov.

Gibanje delca lahko v splošnem opišemo z elektromagnetnim valovanjem. V vakuumu velja sledeča zveza:

$$\omega^2 = k^2 c_0^2. \quad (2.2)$$

Enačba opisuje zvezo med kotno hitrostjo ω , velikostjo valovnega vektorja \mathbf{k} ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$) in svetlobno hitrostjo v vakuumu c_0 . Za splošno valovanje velja:

$$\omega = \mathbf{k} \cdot \mathbf{v} = k v \cos \theta. \quad (2.3)$$

V snovi se enačba 2.2 zapiše malce drugače:

$$\omega^2 = k^2 c^2 = k^2 \frac{c_0^2}{\epsilon(\omega)\mu(\omega)} = k^2 \frac{c_0^2}{n^2(\omega)}, \quad (2.4)$$

kjer smo vpeljali frekvenčno odvisni lomni količnik, ki določa hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja v snovi [11]. Lomni količnik je sorazmeren korenu dielektričnosti snovi:

$$n = \sqrt{\epsilon(\omega)\mu(\omega)}. \quad (2.5)$$

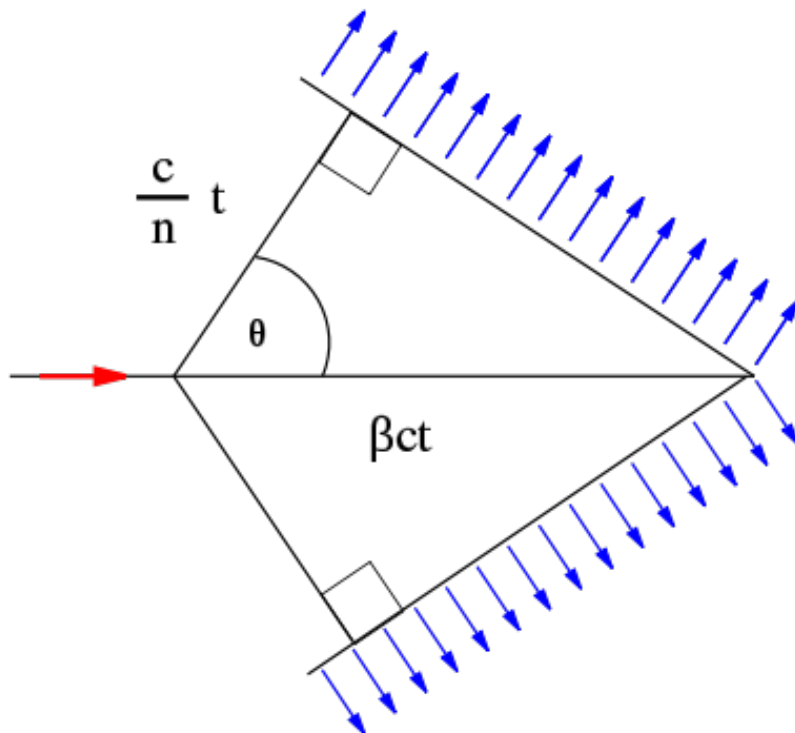
Že od vsega začetka predpostavimo, da je $n > 1$, potemtakem je ustrezna hitrost širjenja valovanja

$$c = \frac{c_0}{n(\omega)}. \quad (2.6)$$

Če sedaj združimo enačbi 2.3 in 2.4, dobimo sledeči pogoj:

$$\cos \theta_c = \frac{c_0}{v n} = \frac{1}{\beta n}, \quad (2.7)$$

kjer smo vpeljali $\beta \equiv \frac{v}{c_0}$. θ_c je kot sevanja Čerenkova, ki se izseva relativno na trajektorijo nabitega delca. Iz enačbe 2.7 je razvidno, da mora biti $\beta n > 1$ in temu



Slika 2.2: Sevanje Čerenkova v snovi. Z rdečo puščico je označena trajektorija nabitega delca, z modrimi pa emisije fotonov [9].

sledi $\beta > 1/n$. Analogija enačbe 2.7 je razvidna iz Slike 2.2. Minimalna hitrost $v_s = c_0/n$, pri katerem dobimo sevanje Čerenkova, se imenuje hitrost praga.

Spekter izsevanih fotonov opisuje enačba, ki sta jo izpeljala *Frank* in *Tamm* [12]:

$$\frac{d^2 N}{dE dl} = \left(\frac{z^2 e_0^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar^2 c_0^2} \right) \sin^2 \theta. \quad (2.8)$$

Tukaj je dN število izsevanih fotonov v intervalu energije med E in $E+dE$, ko delec prepotuje dolžino dl v sredstvu. $z e_0$ je označen naboj vpadnega delca. Če v enačbo 2.8 vstavimo enačbo 2.7, dobimo:

$$\frac{d^2 N}{dE dl} = \left(\frac{z^2 \alpha}{\hbar c_0} \right) \left[1 - \left(\frac{1}{\beta n(E)} \right)^2 \right], \quad (2.9)$$

kjer smo $z \alpha = \frac{e_0^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c_0} \approx 1/137$ označili konstanto fine strukture. Za delce z enoto naboja lahko zgornjo enačbo zapišemo kot:

$$\frac{d^2 N}{dE dl} = \left(\frac{370}{eV cm} \right) \left[1 - \left(\frac{1}{\beta n(E)} \right)^2 \right]. \quad (2.10)$$

Če sedaj enačbo 2.10 integriramo po dolžini sevalca, dobimo, da je število izsevanih fotonov na intervalu energije

$$\frac{dN}{dE} = \left(\frac{370}{eV cm} \right) L \sin^2 \theta, \quad (2.11)$$

kjer je L dolžina sevalca. Če v zgornji enačbi upoštevamo še relacijo $E = h\nu$, dobimo

$$\frac{dN}{dE} = konst. = \frac{dN}{d\nu}. \quad (2.12)$$

Sedaj še pogledajmo odvisnost števila izsevanih fotonov od valovne dolžine. Z upoštevanjem relacij med valovno dolžino, frekvenco in energijo pridemo do naslednje enačbe:

$$\frac{dN}{d\lambda dl} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \sin^2\theta. \quad (2.13)$$

Naredimo še integral po celotni dolžini medija ter dobimo sledečo porazdelitev:

$$\frac{dN}{d\lambda} \propto \frac{1}{\lambda^2}. \quad (2.14)$$

Število izsevanih fotonov Čerenkova je obratno sorazmerno s kvadratom njihove valovne dolžine.

Sedaj, ko poznamo osnove sevanja Čerenkova, si lahko podrobneje pogledamo identifikacijo delcev s pomočjo omenjenega sevanja.

2.2 Identifikacija delcev s pomočjo sevanja Čerenkova

Sevanje Čerenkova detektiramo s pomočjo detektorjev Čerenkova. Sestavljeni so iz sevalca, ki ima ustrezni lomni količnik, optičnega sistema, ki je prostor, kamor se sevanje razširi, in detektorjev svetlobe. Ločimo dva tipa detektorjev Čerenkove svetlobe: pragovne števec in detektorje, ki merijo kot Čerenkova.

Pri pragovnih števcih Čerenkova uporabljamo dejstvo, da se Čerenkova svetloba izseva le nad določeno hitrostjo nabitega delca (enačba 2.6). Prag sevanja lahko izrazimo s pomočjo gibalne količine (enačba 2.1):

$$p_{prag} = \frac{mc_0}{\sqrt{n^2 - 1}}, \quad (2.15)$$

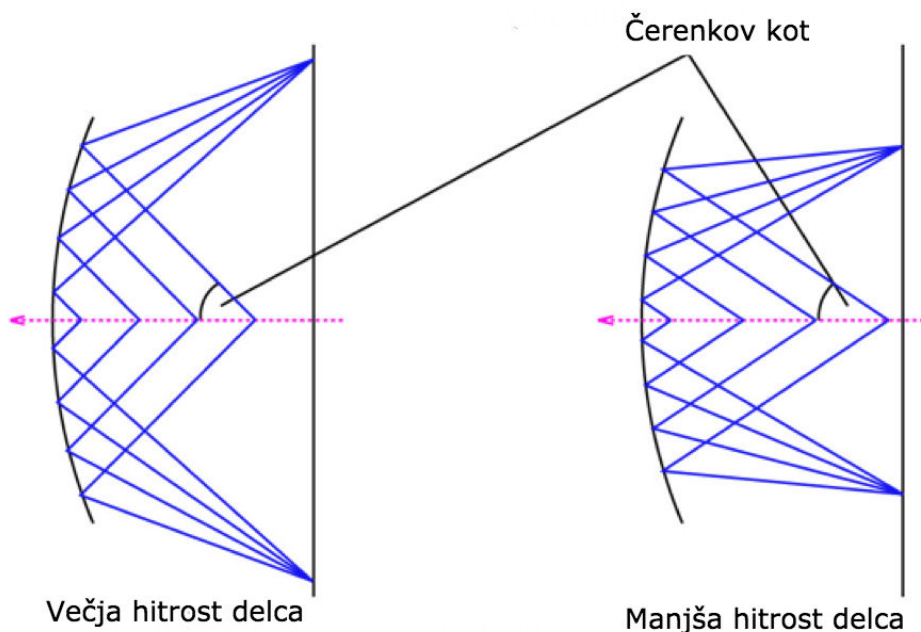
kjer smo upoštevali:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{c_0^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{c_0^2}{c_0^2 n^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}}. \quad (2.16)$$

S pomočjo tega lahko ločujemo med delci v treh različnih intervalih gibalne količine:

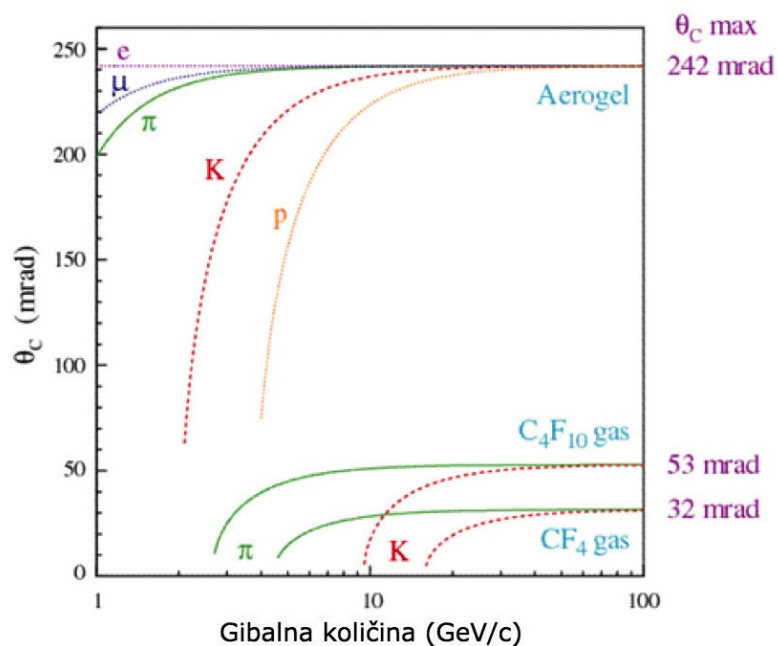
1. interval, v katerem je gibalna količina nabitega delca premajhna, da bi izseval fotone Čerenkova,
2. interval, v katerem lažji delci izsevajo fotone Čerenkova prej, kakor težji delci, in
3. interval, v katerem oba delca izsevata fotone Čerenkova.

Podobno kot pragovni števec Čerenkova delujejo detektorji obročev Čerenkova (angl. ring-imaging Cherenkov RICH), ki merijo kot izsevanih fotonov. Princip delovanja prikazuje Slika 2.3. V splošnem uporabimo sistem zrcal, ki nam fokusirajo žarke na fotonsko ravnino, kjer so razporejeni detektorji. Izsevane fotone lahko merimo direktno, brez uporabe zrcal. Na takšen način bomo merili v sistemu ARICH.



Slika 2.3: Princip delovanja obročev Čerenkova (RICH). Na levi so prikazane trajektorije fotonov, ki so se izsevali pri višji hitrosti nabitega delca, kot na desni strani.

Odvisnost kota Čerenkova od gibalne količine za različne delce je predstavljena na Sliki 2.4. Prav tako je na tej sliki predstavljena porazdelitev kota za tri različne sevalce, od katerih je eden aerogel, ostala dva pa sta mešanici plinov. Vidimo lahko, da v primeru aerogela zelo dobro ločujemo med delci pri nižjih gibalnih količinah, pri višjih pa so bolj uporabni plinski sevalci. S plinskimi sevalci, ki imajo nižji lomni



Slika 2.4: Porazdelitev kota Čerenkova v odvisnosti od gibalne količine v dveh primerih: ko uporabimo za sevalec aerogel in mešanico plina [13].

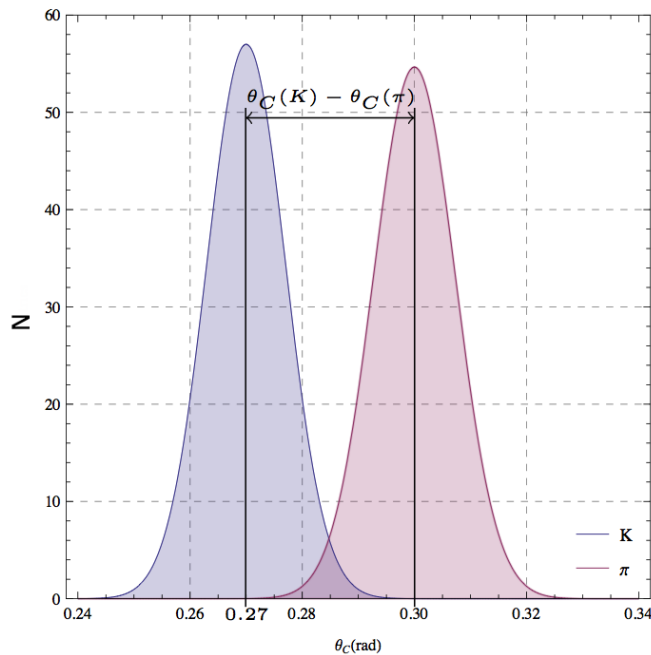
količnik, lahko ločujemo med delci vse do gibalnih količin $100 \text{ GeV}/c$, medtem ko s trdimi sevalci pokrijemo področje med $1 \text{ GeV}/c$ in nekaj GeV/c . Pri plinskih sevalcih je velikost lomnega količnika okoli 1.001, pri trdnih sevalcih pa vse tja do 1.5. Prednost sevalcev iz trdne snovi je tudi ta, da zavzamejo dosti manj prostora, reda velikosti nekaj centimetrov. Nasprotno morajo biti plinski sevalci, da dosežejo enako število izsevanih fotonov, dolgi vsaj nekaj metrov.

Negotovosti, pri detektiranju fotonov Čerenkova, so odvisne od:

1. zrnatosti fotonskega detektorja,
2. kvalitete optičnega sistema,
3. negotovosti in napak pri merjenju poti delca v prejšnjih sistemih in
4. večkratnega sipanja fotonov v sevalcu.

Kot sem že omenil, gibalno količino delca določimo iz ukrivljenosti trajektorije. Da bi ugotovili identiteto, torej maso delca, moramo izmeriti še hitrost. Pri sevanju Čerenkova hitrost v dobimo iz meritev kota Čerenkovega, kar je razvidno iz enačbe 2.7. Naš detektor bi radi uporabili za ločevanje med kaoni in pioni. Masa kaona je $m_K \approx 500 \text{ MeV}/c^2$ in masa piona je $m_\pi \approx 140 \text{ MeV}/c^2$. Iz enačb 2.1 in 2.7 ter Slike 2.4 je razvidno, da bo imel kaon pri isti gibalni količini manjši kot Čerenkova kot pion.

Za določeno gibalno količino narišemo porazdelitev vrednosti izmerjenih kotov Čerenkova za kaone in pione. Pri vsaki eksperimentalni meritvi prihaja do napak. Zaradi njih je porazdelitev izmerjenega kota Čerenkova normalna, Slika 2.5. Pričakovana kota za kaone in pione v sevalcu z lomnim količnikom 1.05 pri gibalni



Slika 2.5: Porazdelitev kota Čerenkova za kaone in pione pri gibalni količini $3.5 \text{ GeV}/c$ in sevalcu z lomnim količnikom 1.05 [14].

količini $3.5 \text{ GeV}/c$ sta 277 mrad in 307 mrad . Delcu, ki mu izmerimo kot, ki je enak

2.2. Identifikacija delcev s pomočjo sevanja Čerenkova

pričakovanemu kotu za pione, proglasimo kot pion. Zgodi se, da se porazdelitvi za kaone in pione prekrivata. Kaone lahko napačno proglasimo za pione. Enako velja tudi za pione. Večje kot je prekrivanje, slabše ločujemo med delcema in obratno. To nam omeji območje gibalnih količin, kjer lahko delce ločujemo. Zanesljivo jih lahko ločujemo do gibalnih količin, kjer sta porazdelitvi razmaknjeni vsaj za nekaj večkratnikov ločljivosti, s katero mi izvajamo meritve. Porazdelitev na Sliki 2.5 nam torej pove, s kolikšno zanesljivostjo lahko delce proglasimo za pione ali kaone.

Poglavje 3

Detektor obročev Čerenkova

Spektrometer Belle II bo sestavljen iz več podsistemov. Eden takšnih je detektor obročev Čerenkova (*angl.* ring-imaging Cherenkov counter RICH), ki uporablja sevanje Čerenkova za ločevanje med kaoni in pioni. V tem poglavju bom najprej predstavil celoten detektor ARICH. Katere so njegove glavne komponente, bom predstavil v prvem delu. Nato bom opisal posamezne komponente, kot so sevalec, ftonski detektor in čitalna elektronika. Večji poudarek bo na opisu čitalne elektronike, saj je to osrednja tema mojega dela. Predstavil bom glavne elemente in njihovo delovanje.

3.1 Detektor obročev Čerenkova ARICH

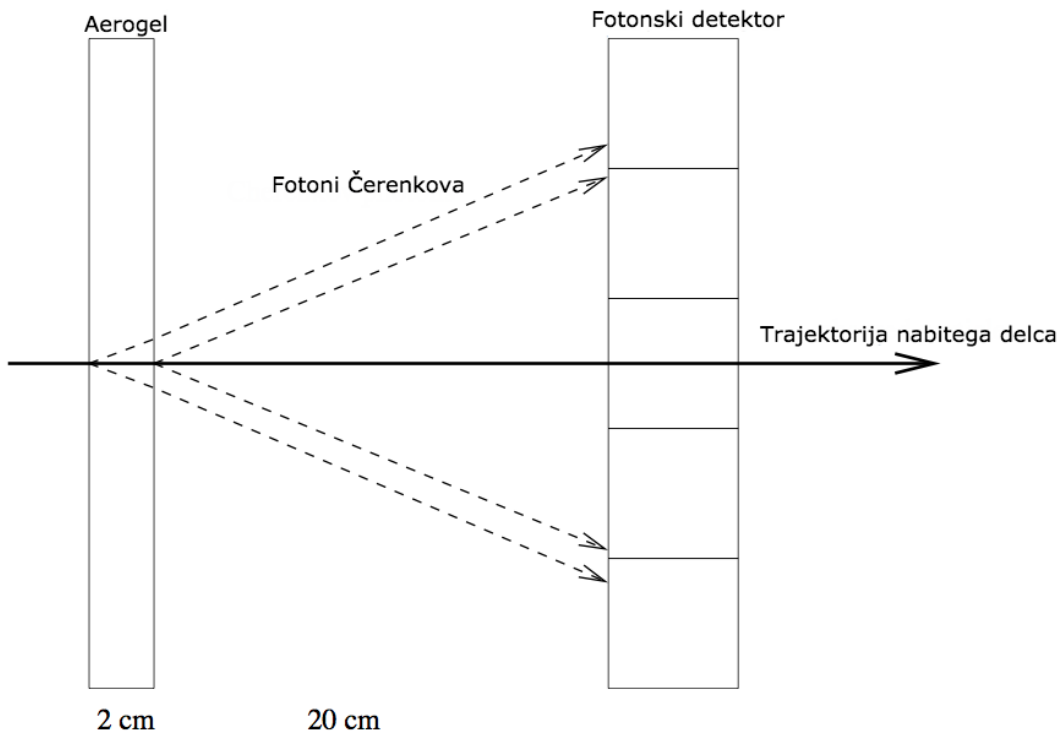
Pri razvoju in izbiri detektorja je bilo potrebno upoštevati kar nekaj zahtev. Nekatere so mehanske, druge pa predvsem fizikalne. Ker smo prostorsko omejeni, se mora naš celotni detektor prilegati v le 28 cm široko odprtino, ki se nahaja med detektorjema ECL in CDC. Notranji podsistemi se nahajajo v močnem magnetnem polju z gostoto 1.5 T. Celoten spektrometer mora nemoteno delovati znotraj tega polja. Odporen mora biti na nevtronsko in γ sevanje, ki bo prisotno ob samih reakcijah. Poleg vseh omenjenih mehanskih omejitev je potrebno zadostiti še fizikalnim zahtevam. Z detektorjem moramo biti sposobni ločevati med pioni in kaoni s 4σ , pri gibalnih količinah od 1 GeV/c do 4 GeV/c. Poleg tega moramo ločevati med kaoni, pioni in elektroni pri gibalnih količinah do 1 GeV/c.

Detektor obročev Čerenkova ustreza vsem zgoraj zapisanim zahtevam. Osnovni elementi, ki sestavljajo takšen detektor so:

1. sevalec iz aerogela, v katerem nabiti delci izsevajo fotone Čerenkova,
2. prostor, kjer fotoni Čerenkova oblikujejo obroče na ftonskem detektorju,
3. pozicijsko občutljiv detektor fotonov, ki je sposoben zaznati posamezne fotone v visokem magnetnem polju, z visoko učinkovitostjo in zelo dobro resolucijo v dveh dimenzijah, in
4. čitalna elektronika za ftonski detektor, ki je sposobna ojačati šibke signale iz ftonskega detektorja.

Takšen detektor lahko vidimo na Sliki 3.1. Ker naš sistem vsebuje aerogel kot sevalec, se celoten detektor imenuje ARICH (*angl.* aerogel ring-imaging Cherenkov counter).

Celoten sistem bo sestavljen iz 420 fotonских detektorjev, ki bodo razporejeni v 7 koncentričnih krogih, kjer je notranji polmer kroga 410 mm, zunanji pa 1140 mm.



Slika 3.1: Shematski prikaz detektorja obročev Čerenkova. Povzeto in prirejeno po [3].

To lahko vidimo na Sliki 3.2. Sevalec iz aerogela bo sestavljen iz več manjših plošč in bo pokrival celotno površino. Približno 20 cm za aerogelom bodo postavljeni fotonски detektorji. Zaradi njihove končne oblike in koncentrične porazdelitve ne bodo pokrivali celotne površine, ampak približno 75 % le-te.

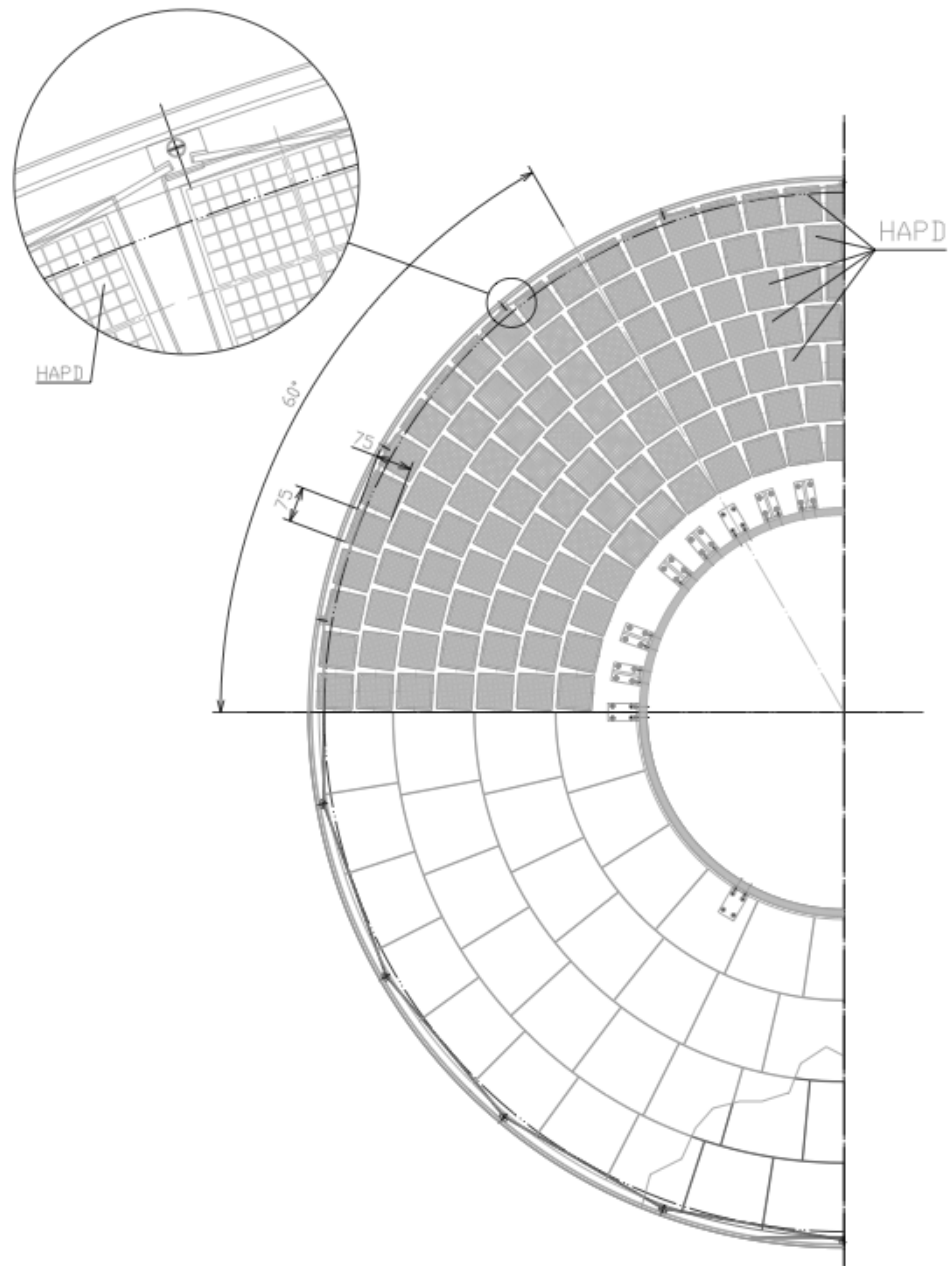
Ključni parameter zmogljivosti našega detektorja je ločljivost kota Čerenkova, ki se izračuna kot:

$$\sigma_{sledi} = \frac{\sigma_{\theta}}{\sqrt{N}}, \quad (3.1)$$

kjer je σ_{θ} širina porazdelitve detektiranih posameznih fotonov in N število detektiranih fotonov [3]. Širša kot je ta porazdelitev, slabše je ločevanje med delci in tudi obratno. Z ustrezno izbiro lomnega količnika sevalca lahko dosežemo prekrivanje obročev Čerenkova na fotonском detektorju. To ustreza fokusiranju fotonov znotraj sevalca, kar odpravi, ali vsaj zmanjša razpršenost zaradi negotovosti izvora točke izsevanja. To lahko dosežemo le z aerogelom, ki ga lahko proizvedemo z lomnim količnikom v razponu med 1.01 in 1.2 [3]. Več o tem in o napakah zaradi izvora točke izsevanja bom predstavil v naslednjem poglavju o sevalcu.

3.2 Sevalec

V detektorju ARICH je bil kot sevalec izbran aerogel, sestavljen iz silicijevega dioksida SiO_2 . Kljub imenu je aerogel trdna snov. Nastane tako, da iz gela, ki je



Slika 3.2: Shema prikazuje postavitev fotonskega detektorja HAPD (zgoraj) in sevalca iz aerogela (spodaj) [14].

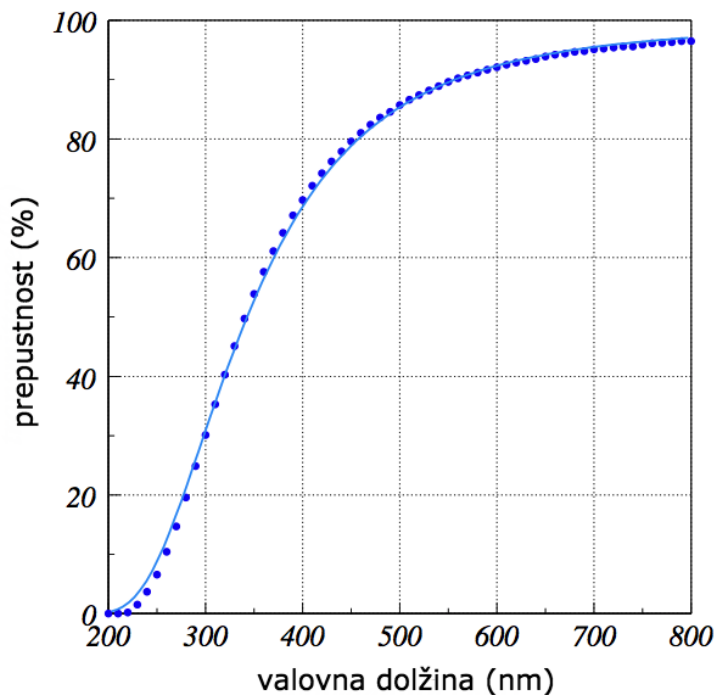
alkoholna mešanica, odstranimo alkohol preko superkričnega sušenja¹. Alkohol v gelu se zamenja s plinom. Več o aerogelu si lahko brelec prebere v [15]. Aerogel je zelo porozen material, saj kar 98 % strukture predstavlja zrak, ki je ujet v porah, velikosti do 100 nm [16]. Pomembna lastnost aerogela je ta, da mu lahko v fazi proizvodnje s pravimi koncentracijami gela nastavimo želeni lomni količnik. Problem lahko nastane, ker je velikost por primerljiva z valovnimi dolžinami izsevane svetlobe Čerenkova. Fotoni Čerenkova se Reyleighjevo sipljejo, kar nam otežuje rekonstrukcijo obročev Čerenkova na fotonskem detektorju.

¹Fazni prehod, ki zaobide kritično točko. S tem se izognemo prehodu iz tekočega direktno v trdno stanje.

Izmerjeno optično prepustnost aerogela lahko opišemo z enačbo [3]:

$$T = T_0 e^{-\frac{l}{\Lambda(\lambda)}}, \quad (3.2)$$

kjer je T_0 intenziteta svetlobe pred prehodom skozi aerogel in T intenziteta svetlobe, ki zapusti aerogel debeline l . Enačba 3.2 vsebuje še Λ , ki predstavlja transmisijsko dolžino, odvisno od valovne dolžine svetlobe λ . Izmerjene podatke lahko vidimo na Sliki 3.3.



Slika 3.3: Izmerjena prepustnost [3].

Na merske točke prilagodimo modelsko funkcijo s pomočjo Huntove parametrizacije:

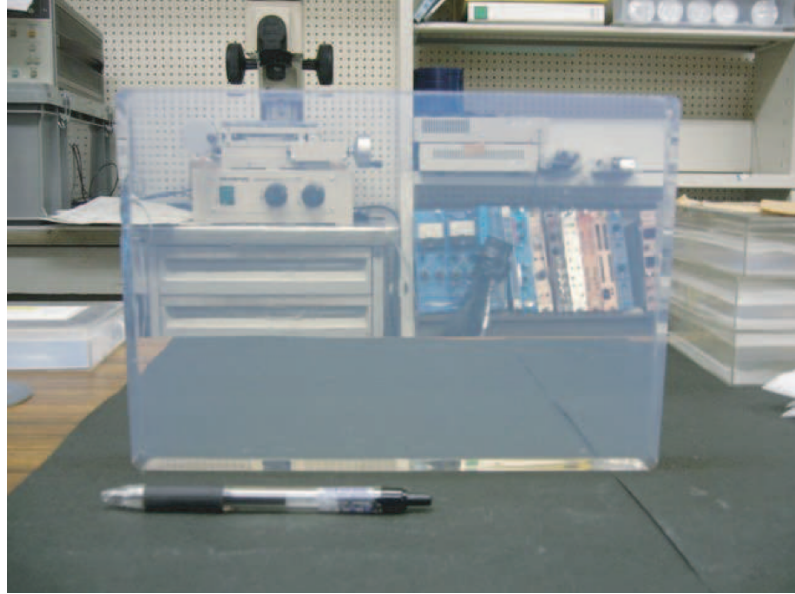
$$T(\lambda, l) = A e^{-\frac{lC}{\lambda^4}}, \quad (3.3)$$

kjer je A absorpcija in C/λ^4 sipalni prispevek atenuacijske dolžine [3]. Za absorpcijo se predpostavi, da je neodvisna od valovne dolžine, medtem ko sipalni prispevek predstavlja velikost Reyleighjevega sipanja. Pri valovni dolžini 400 nm je transmisijska dolžina ~ 55 mm. Za kos aerogela na Sliki 3.4 znaša ta dolžina 40 mm. Pri tej valovni in transmisijski dolžini se izseva največ fotonov.

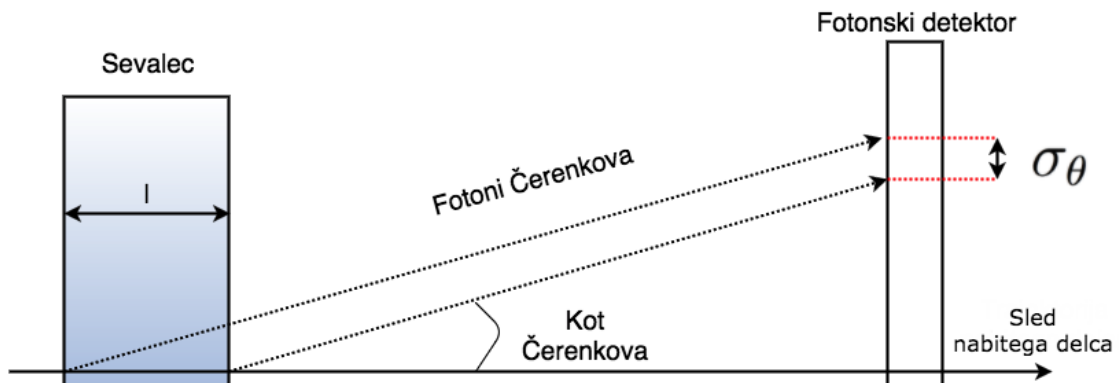
Število prepuščenih fotonov po valovni dolžini v sevalcu z debelino l , se izračuna po enačbi:

$$\frac{dN}{d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \sin^2\theta T(\lambda, l) dl. \quad (3.4)$$

Z daljšim sevalcem se število izsevanih fotonov poveča, vendar se ločljivost zmanjšuje zaradi negotovosti pri izvoru točke izsevanja, Slika 3.5. Ta negotovost se odraža tako, da se lahko fotoni izsevajo na začetku, nekje v sredini ali na koncu sevalca. Širina porazdelitve detektiranih fotonov σ_θ se tako večja z daljšim sevalcem. S tem se nam poveča tudi naš parameter ločljivosti po enačbi 3.1. Za naš detektor je optimalna dolžina sevalca 2 cm.



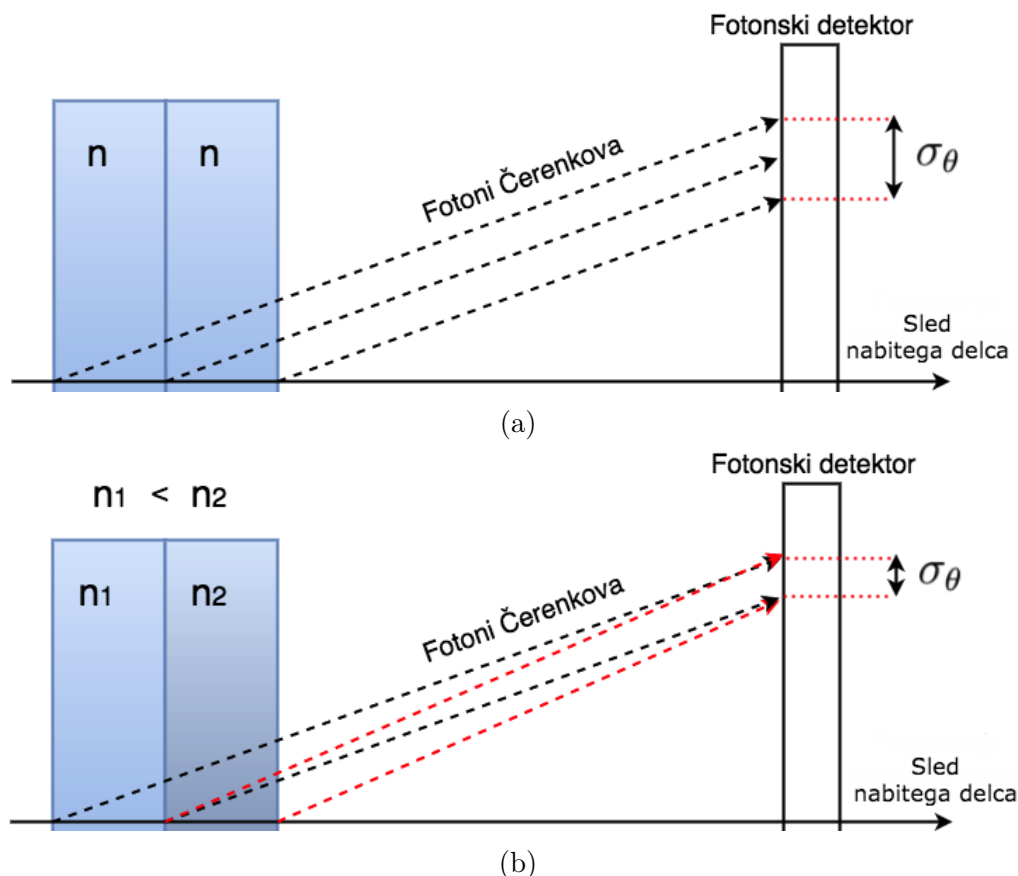
Slika 3.4: Kos aerogela [3].

Slika 3.5: Prikaz širine σ_θ .

Poglejmo si dva možna primera postavitve aerogela v eksperimentu. V prvem primeru postavimo zaporedno dva aerogela z istim lomnim količnikom in debelino 2 cm. To je enako, kot če bi postavili samo en aerogel z debelino 4 cm. V drugem primeru izberemo dva enako debela sevalca, vendar z dvema različnima lomnima količnikoma. Omejimo se še na primer, da naj bo lomni količnik prvega manjši kot drugi $n_1 < n_2$. To nam prikazuje Slika 3.6. Ta dva lomna količnika sta skrbno izbrana, saj moramo zadostiti pogoju. Obroči Čerenkova se morajo na celotnem intervalu gibalnih količin pri izbrani gibalni količini prekrivati na fotonski ravnini. V primeru (b) vidimo, da dobimo boljše prekrivanje obročev Čerenkova. To pomeni, da imamo sedaj manjšo σ_θ , kar nam poveča zmogljivost našega sistema.

Ker lahko aerogelu nastavljamo željeni lomni količnik, lahko naredimo sevalca z dvema različnima lomnima količnikoma in ju nato združimo, kot prikazuje Slika 3.6b. Da bi povečali število izsevanih fotonov brez izgube ločljivosti, sta bili za naš detektor kot sevalec izbrani dve plošči iz aerogela z debelino 2 cm in lomnima količnikoma $n_1 = 1.045$ in $n_2 = 1.055$ [3]. Pri tej debelini je napaka meritev kota Čerenkova minimalna. S temi pogoji lahko ločujemo med kaoni in pioni s

$$\theta(\text{pion}) - \theta(\text{kaon}) \geq 4\sigma_{\text{sledi}} \quad (3.5)$$



Slika 3.6: Dva primera uporabe dveh sevalcev. V primeru (a) imamo dva enako debela sevalca z istima lomnima količnikoma. V primeru (b) imamo dva enako debela sevalca, vendar z različnima lomnima količnikoma, pri čemer mora biti drugi lomni količnik večji od prvega.

na intervalu gibalnih količin do 4 GeV/c. Poglejmo si še sedaj, koliko znaša ta razlika pri tej gibalni količini. Najprej izračunajmo kot Čerenkova po enačbi 2.7. Za lomni količnik vzemimo kar povprečje obeh, in sicer 1.05. Takrat je $\theta_\pi = 308$ mrad in $\theta_{kaon} = 284$ mrad. Razlika znaša le 24 mrad. Potrebujemo torej zelo natančen fotonski detektor, ki bo zmožen razlikovati med obema obročema.

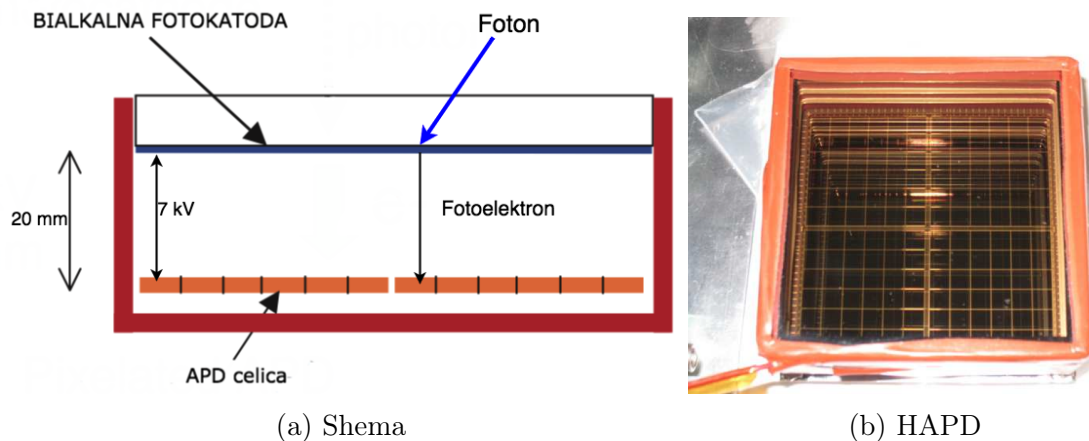
Poglejmo si še, koliko fotonov se izseva iz našega sevalca. Uporabili bomo enačbo 3.4. Če se omejimo na vidni spekter, to je območje, v katerem deluje naš fotonski detektor, ter upoštevamo energijski interval nabitih delcev, je število izsevanih fotonov približno 100. Torej potrebujemo takšen fotonski detektor, ki bo sposoben detekcije posameznih fotonov.

3.3 Fotonski detektor

Pri izbiri fotonskega detektorja je potrebno upoštevati kar nekaj pogojev. V splošnem bi lahko uporabili kar navadne fotopomnoževalke. Problem teh je ta, da ne delujejo v magnetnem polju. Že pri magnetnih poljih z gostoto nekaj mT elektroni pobegnejo iz pomnoževalne verige. V našem detektorju, kjer gostota magnetnega polja dosega 1.5 T, so takšni fotonski detektorji neuporabni. Ker se izseva samo nekaj fotonov, moramo biti sposobni detekcije posameznih fotonov, ki so ključni pri

rekonstrukciji obročev Čerenkova. Prav tako morajo biti fotonski detektorji odporni na visoko sevalno obremenitev.

Kot fotonski detektor za naš sistem je bil izbran *hibridni plazovni fotonski detektor* HAPD (angl. Hybrid Avalanche Photo Detector). Izkazal se je kot zelo zanesljiv detektor v magnetnem polju in odporen na sevalno obremenitev. Sestavljen je iz bi-alkalne fotokatode, vakuumskega prostora in polprevodniškega senzorja APD (angl. avalanche photodiode), ki ga imenujemo tudi plazovna fotodioda. Shema in delovanje detektorja prikazuje Slika 3.7.



Slika 3.7: (a) Shema delovanja in (b) fotografija fotonskega detektorja HAPD [3].

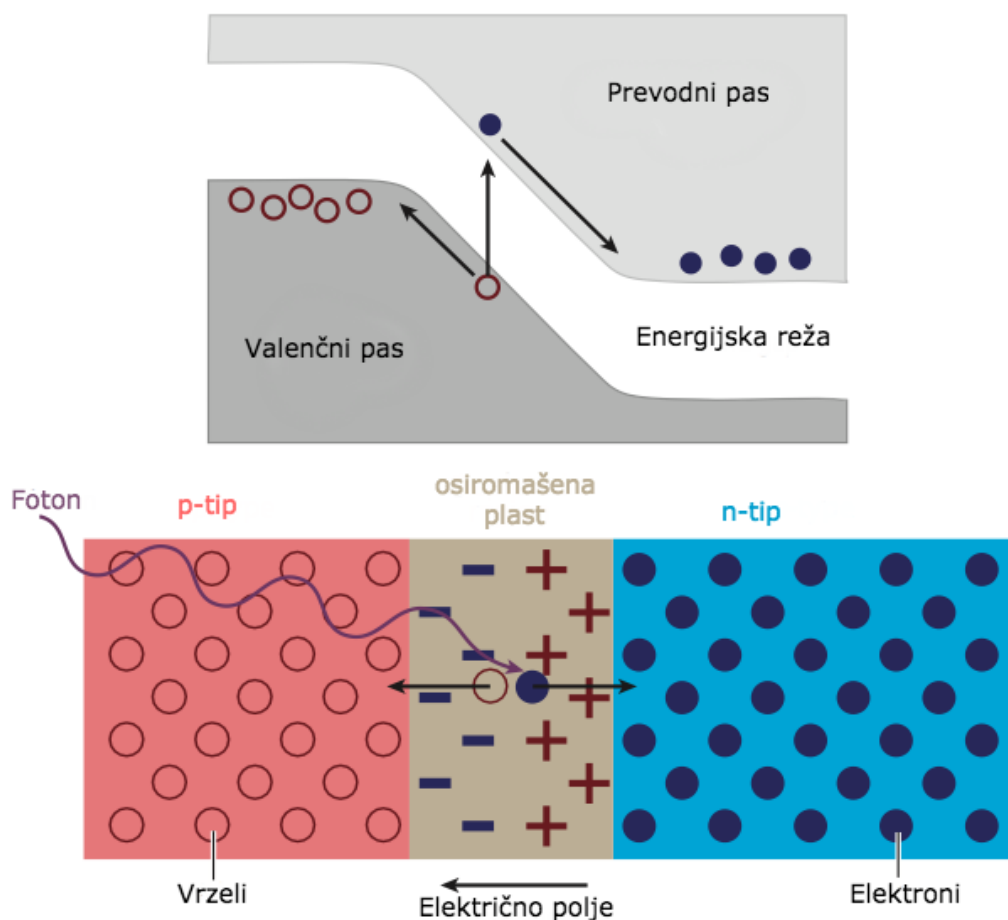
3.3.1 Polprevodniški detektor

V polprevodniških detektorjih svetlobe nabiti delci nastanejo in se detektirajo v istem detekcijskem volumnu [17]. Prednosti teh detektorjev je njihova močna in kompaktna struktura. Delujejo pri nizkih napetostih in niso občutljiva na vplive magnetnega polja.

Najpreprostejši takšni detektorji so fotodiode, sestavljene iz p-n stika, Slika 3.8. Zaradi difuzije nosilcev naboja nastane na stiku osiromašeno področje. To nam služi kot absorpcijski volumen za detekcijo svetlobe. Ko se foton absorbira v tem področju, nastane para elektron-vrzel. Zaradi električnega polja med p-n stikom se začnejo elektroni gibati proti n-dopirani plasti, vrzeli pa k p-dopirani plasti. To gibanje nabojev nam da električni pulz v fotodiodi, ki ga lahko zaznamo. Ali bo foton sprožil proces nastanka para, je odvisno od energijske vrzeli. Samo v primeru, ko ima foton večjo energijo, kot je energijska razlika med valenčnim in prevodnim pasom, nastane par elektron-vrzel. V siliciju znaša vrednost te energijske vrzeli 1.12 eV. To ustreza valovnim dolžinam fotona, ki so manjša od približno 1100 nm [17].

Fotodiode nimajo notranjega ojačanja. Njihov signal je sorazmeren številu detektiranih fotonov. Uporabljajo se lahko le v primerih, v katerih je njihovo pričakovano število večje ~ 1000 .

V našem primeru detektiramo le nekaj fotonov. To pomeni, da bodo signali zelo šibki. Za detekcijo takšnih signalov lahko izboljšamo občutljivost fotodiode. Če nanjo priključimo dovolj visoko zaporno napetost, nastane v osiromašenem področju dovolj veliko električno polje. V tem polju lahko prosti nosilci naboja pridobijo dovolj veliko energijo, da preko ionizacije pričnejo ustvarjati nove pare elektron-

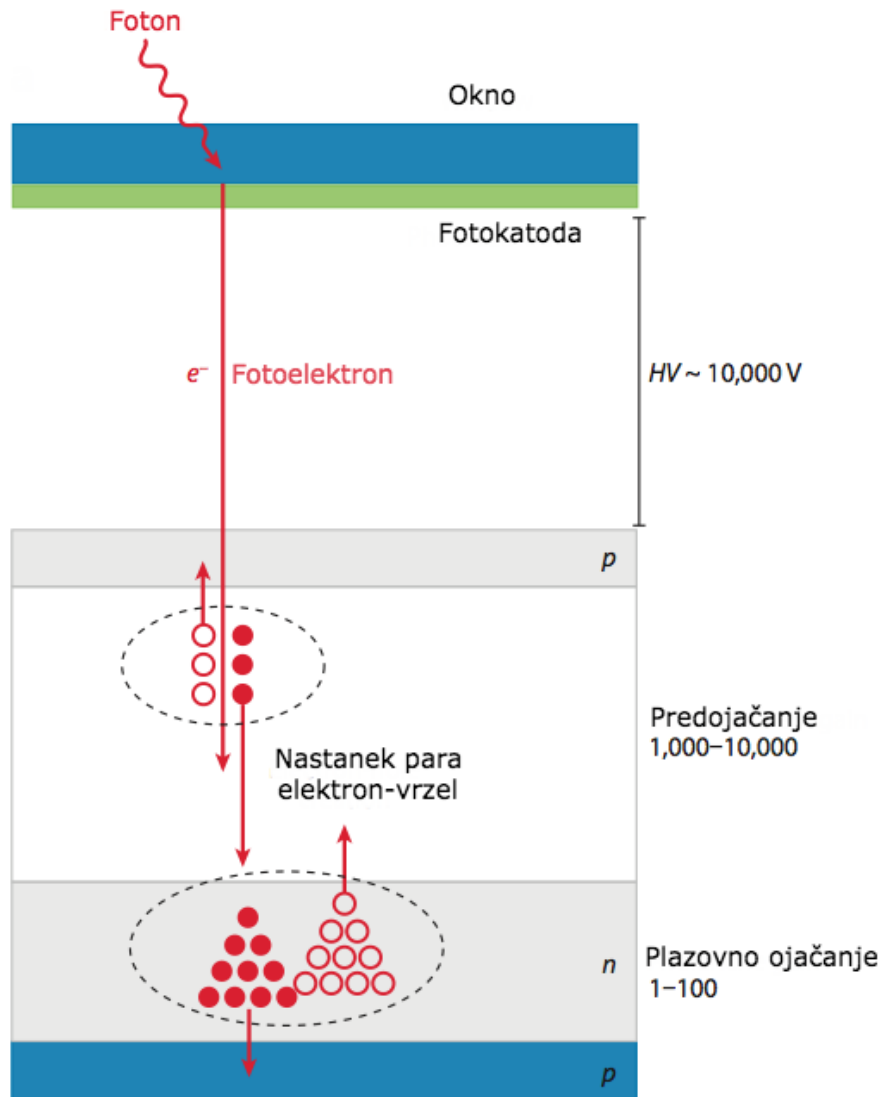


Slika 3.8: Shematski prikaz p-n stika v silicijevi fotodiodi. Povzeto in prirejeno po [17].

vrzel. Pri elektronih pride do pojava plazmu, saj ionizirajo pri nižjih energijah kot vrzeli. Takšnim fotodiodam pravimo plazovne fotodiode APD.

Te polprevodniške detektorje lahko združimo s klasičnimi fotopomnoževalkami. Pri tem obdržimo fotokatodo, dinodni pomnoževalni sistem pa zamenjamo z visokim električnim poljem in plazovnimi fotodiodami. V tem primeru dobimo hibridne plazovne detektorje svetlobe. Kombinacija obeh nam da dobro prostorsko in energijsko ločljivost polprevodniških detektorjev ter veliko površino in občutljivost običajnih fotopomnoževalk. Tak fotonski detektor je bil izbran v našem primeru.

Shematsko delovanje takšnega detektorja prikazuje Slika 3.9. Ko foton zadene fotokatodo, iz nje izbiye fotoelektron preko fotoefekta, ki ga močno električno polje ($V \sim 10-20$ kV) pospeši do APD. Od trku ima zadosti energije, da tvori več tisoč primarnih parov elektron-vrzel preko ionizacije. Na APD lahko napeljemo še dodatni potencial. Posledica tega je, da se primarni pari še dodatno ojačajo, saj vsak ustvari še nekaj 10 sekundarnih parov. Skupno ojačanje v APD je torej zmnožek primarnega in sekundarnega ojačanja, ki lahko doseže vrednosti do približno 10^4 [17].



Slika 3.9: Shematski prikaz delovanja hibridnih detektorjev APD. Povzeto in prirejeno po [17].

3.3.2 HAPD

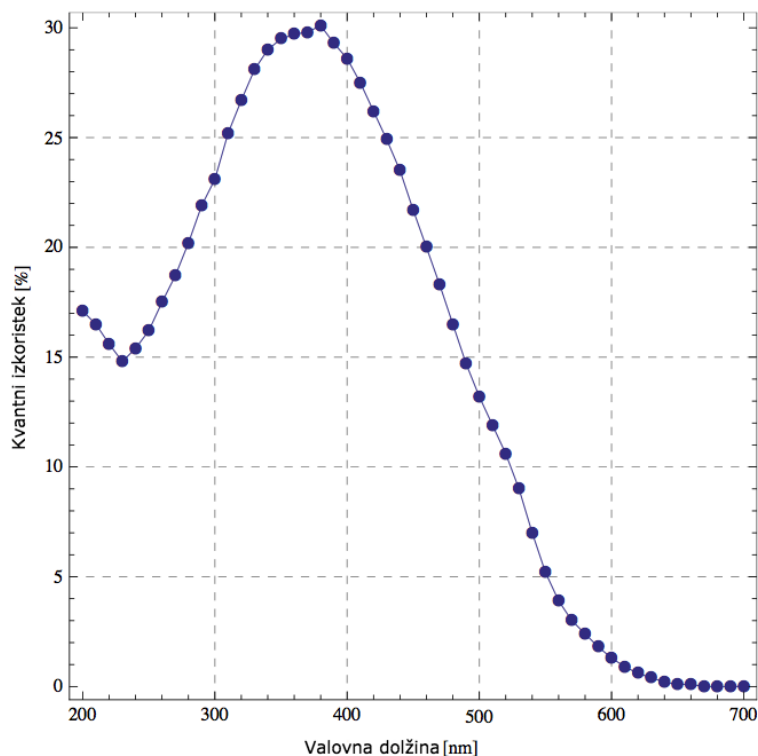
Fotonski detektor HAPD je razvil japonski proizvajalec *Hamamatsu Photonics* [3]. Polprevodniški detektor sestavljajo štiri čipi APD, ki so razdeljeni na 6×6 celic. Vsaka celica ima velikost $4.9 \times 4.9 \text{ mm}^2$. Razdrobljenost čipov na manjše dele nam omogoča večjo prostorsko ločljivost. Tipične lastnosti so predstavljene v Tabeli 3.1.

Ker je ojačanje fotonskega detektorja majhno, v primerjavi z običajnimi fotopomoževalkami, potrebujemo dodatno ojačanje in čitalno elektroniko z malo šuma, da lahko detektiramo posamezne fotone [18]. Ojačanje je odvisno od ionizacijske energije W , ki je potrebna za generacijo enega para elektron-vrzel. Fotoelektron z energijo E generira E/W parov.

Poleg ojačanja je zelo pomemben kvantni izkoristek, ki je za fotokatode definiran kot razmerje med številom izsevanih fotoelektronov s številom vpadlih fotonov. Kvantni izkoristek je odvisen od valovne dolžine, kar nam prikazuje Slika 3.10.

velikost	$72 \times 72 \text{ mm}^2$
število čipov APD	4
število celic	12×12 oz. 6×6 /čip
velikost celice	$4.9 \times 4.9 \text{ mm}^2$
efektivno območje	67 %
tipični kvantni izkoristek	25 %
predojačanje	~ 1500
plazovno ojačanje	~ 30
skupno ojačanje	$\sim 10^5$
masa	220 g

Tabela 3.1: Lastnosti HAPD [3].



Slika 3.10: Kvantni izkoristek fotokatode pri HAPD [14].

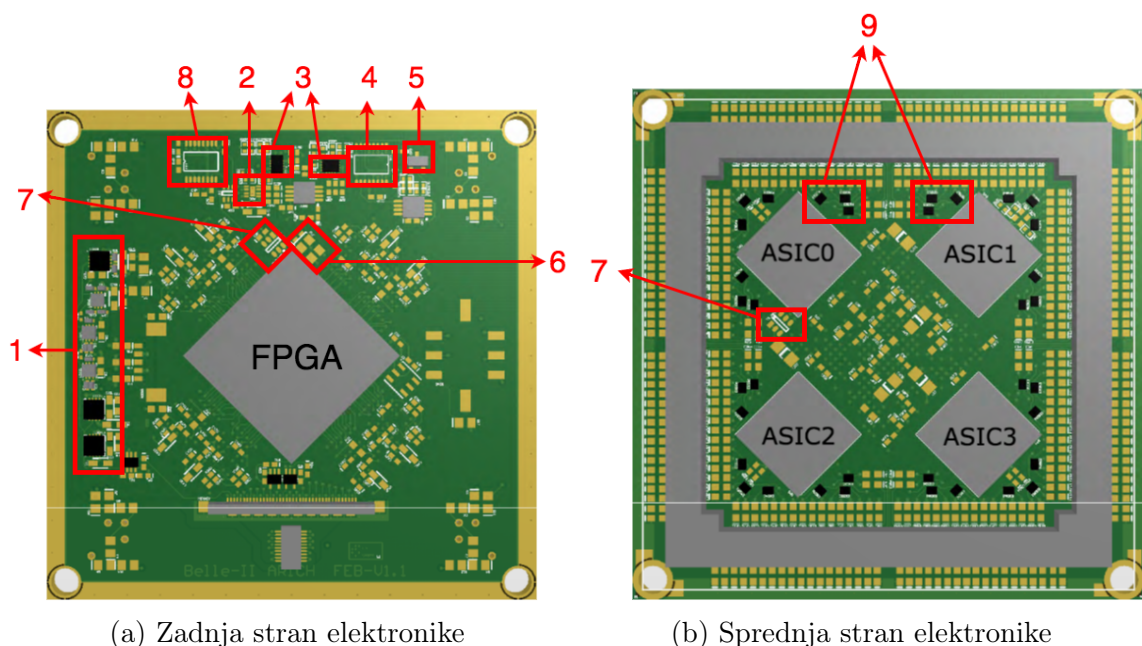
Vrh porazdelitve z vrednostjo 30% ustreza valovni dolžini okoli 360 nm. Pomembno si je zapomniti, da ta vrh sovpada z valovno dolžino sevanja Čerenkova.

3.4 Čitalna elektronika

Ker je ojačanje fotonskega detektorja manjše od običajnih fotopomoževalk, potrebujemo posebno elektroniko, ki bo omogočala detekcijo posameznih fotonov. Pri načrtovanju takšne elektronike je potrebno upoštevati spodnje zahteve:

1. delovati mora v visokem magnetnem polju do 1.5 T,
2. delovati mora v okolju, kjer je prisotno sevanje,
3. namestiti jo moramo v majhen prostor za HAPD-jem (50 mm × 76 mm × 76 mm),
4. imeti mora nizek šum,
5. sistem mora biti sposoben ojačati in oblikovati majhen analogni signal iz ftonskega detektorja ter ga nato digitalizirati,
6. ločiti mora med signalom šuma in signalom iz ftonskega detektorja,
7. imeti mora nastavljiv nivo proženja,
8. omogočiti mora testni signal,
9. meriti mora temperaturo čitalne elektronike,
10. omogočiti nam mora merjenje napajalnih napetosti in
11. na HAPD mora pripeljati predojačevalno napetost.

Izgled sprednje in zadnje strani tiskanega vezja lahko vidimo na Sliki 3.11. Glavne komponente so štirje čipi ASIC² ter čip FPGA³. Za nemoteno delovanje



Slika 3.11: Shematski prikaz sprednje in zadnje strani elektronike. Pomen številk od 1 do 9 je razložen v tekstu.

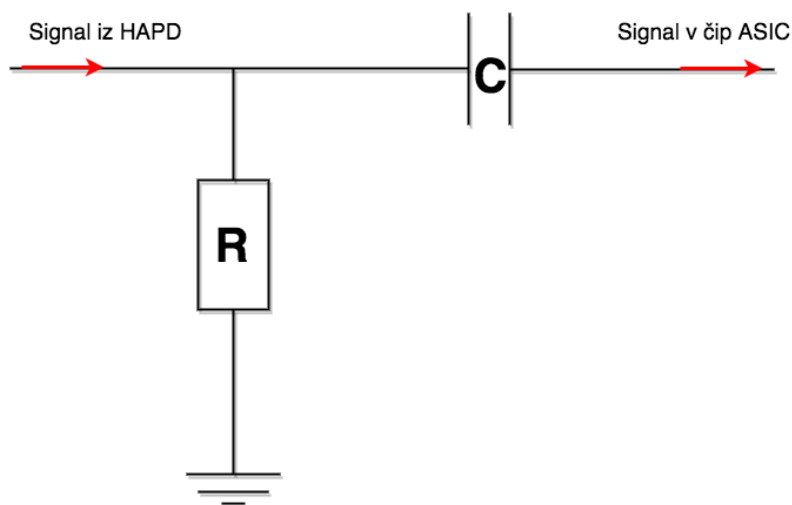
celotnega tiskanega vezja je potrebno imeti še druge dodatne manjše komponente, ki so na Sliki 3.11 predstavljene s številkami:

²Application Specific Integrated Circuit

³Field-Programmable Gate Array

1. LDO-*low dropout regulator*. Te komponente zagotavljajo točno določeno napetost. Na tiskanem vezju potrebujemo več napetosti. Na ta način lahko iz ene napetosti generiramo več različnih referenčnih in napajalnih napetosti.
2. ADC-*analog to digital converter*. Uporabljamo ga za merjenje nivojev napetosti na različnih delih vezja.
3. MUX-*multiplexer*. Uporabljamo ga za preklapljanje med različnimi vhodi. Na ta način lahko z enim kanalom ADC-ja s preklopom MUX-a izmerimo različne vrednosti.
4. *Digitalni potenciometer*. Skupaj z referenčno diodo ga uporabljamo za nastavljanje nivoja proženja.
5. *Referenčna dioda*. Priskrbi nam konstantno napetost 1.25 V. Skupaj z digitalnim potenciometrom jo uporabljamo za nastavljanje nivoja proženja.
6. *Oscillator*. Generira urin takt, ki ga uporabljamo v čipu FPGA.
7. *Temperaturna senzorja*, ki nam merita temperaturo tiskanega vezja na sprednji in zadnji strani.
8. Generator testnega signala, ki ga potrebujemo pri našem testu.
9. ESD- *electrostatic discharge*. Te komponente uporabljamo za diodno zaščito vhodov, da ne prihaja do prebojev med kanali.

Poleg vseh teh komponent tiskano vezje vsebuje veliko število kondenzatorjev. Prav tako vsak signal, ki pride direktno iz HAPD-ja, potuje najprej skozi upornik in kondenzator, šele nato prispe v čip ASIC, Slika 3.12. Vrednost upornika R znaša $10\text{ M}\Omega$ in kondenzatorja C 1 nF . S tem zmanjšamo šum in preprečimo visoki tok skozi čip v primeru, da bi prišlo do nepredvidenih prebojev. Shema vseh 36 kanalov je predstavljena v Dodatku C.



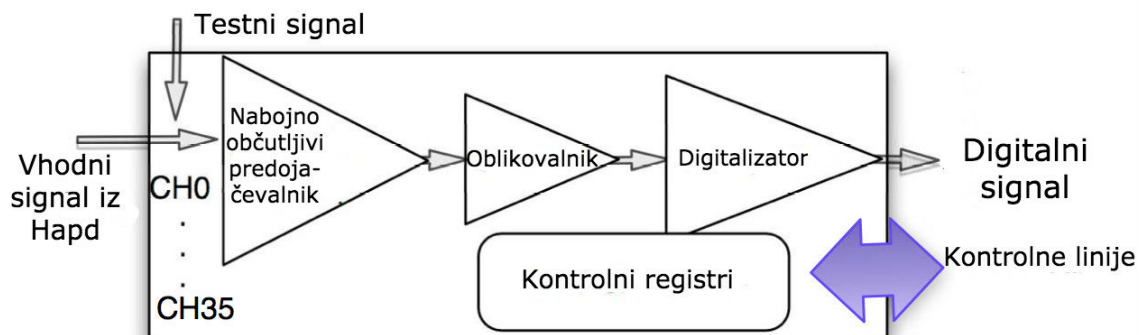
Slika 3.12: Shema povezave enega kanala iz senzorja HAPD do čipa ASIC. Vrednosti upornika in kondenzatorja znašata: $R=10\text{ M}\Omega$, $C=1\text{ nF}$.

3.4.1 Čip ASIC

Delovanje čitalne elektronike je vezano na delovanje čipa ASIC. Njegova glavna naloga je digitalizacija analognega signala iz HAPD-ja. Vhodni signali se znotraj čipa, ki ga sestavljajo tri komponente, obdelajo v treh zaporednih korakih:

1. nabojno občutljivi predojačevalnik nam ojača šibke signale iz HAPD-ja,
2. oblikovalec signalov nam jih oblikuje tako, da so primerni za nadaljnjo obdelavo in
3. enobitni digitalizator nam pretvori analogne signale v digitalno obliko.

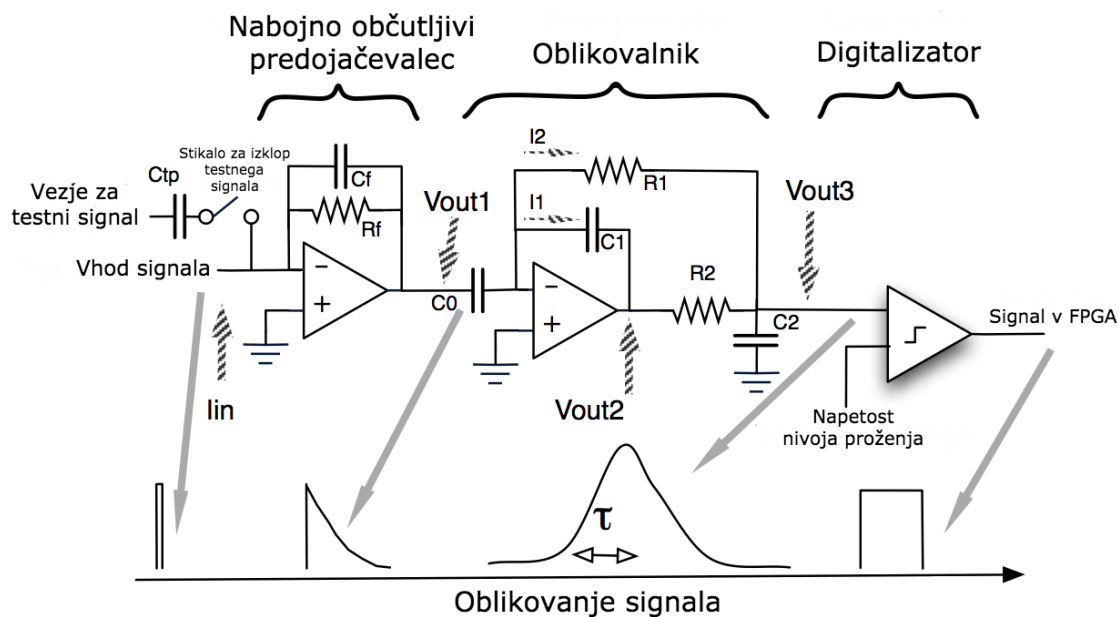
Shema čipa ASIC nam prikazuje Slika 3.13.



Slika 3.13: Shema čipa ASIC [19].

Nabojno občutljivi predojačevalnik deluje kot nizkoprepustni filter, ki nam ojači in preoblikuje zbrani naboj iz HAPD v napetost [5], ki je proporcionalna naboju. Izhodni signal ima obliko, ki hitro naraste in nato eksponentno pada. Takšen signal nato pride v oblikovalnik in oblikuje v obliko, ki jo prikazuje Slika 3.14. V tem delu vezja lahko nastavljamo oblikovanje sunkov s časovno konstanto oblikovanja τ . Definirana je kot čas, ki je potreben, da se signal dvigne iz 10 % do 90 % celotne višine. Takšen signal nato vstopi v digitalizator. To vezje nato primerja, ali je analogni signal večji od nastavljenega nivoja za proženje. V primeru, da je večji, dobimo škatlasti logični signal velikost 1.65 V, v nasprotnem primeru pa ima signal konstantno vrednost 0 V. Širina škatlastega signala je enaka času, ko je analogni signal nad nivojem proženja. Celoten potek signala in vezje nam prikazuje Slika 3.14.

Z enim čipom lahko obdelamo signale iz 36 kanalov HAPDja. Delovanje celotnega detektorja se bo s časoma spreminjalo. Razlog za to je visoko sevanje, ki bo prisotno med delovanjem spektrometra. Zaradi izpostavljenosti sevanju se ftonski detektor počasi degradira. To pomeni, da se bo naš signal spreminjal. Elektronika je najbolj prizadeta ob trkih ionizirajočih delcev, kot so elektroni, ioni ... (angl. single event upset SEU). S tem se sčasoma poslabša delovanje celotnega sistema. S pomočjo kontrolnih registrov, ki so predstavljeni v Tabeli 3.2 in 3.3, lahko spreminjamo nastavitve vseh treh komponent čipa ASIC, da zagotovimo optimalno delovanje.



Slika 3.14: Pot signala znotraj čipa ASIC. Povzeto in prirejeno po [5].

Nivo proženja je nastavljen za vse kanale enako in ga lahko nastavljamo v intervalu med -1.25 V in $+1.25\text{ V}$ v 1024 korakih. Premik srednje vrednosti kanala je lahko nastavljen individualno v 16 grobih korakih po 40 mV in 16 finih korakih po 4 mV . S tem lahko vse premike kanalov poravnamo tako, da so srednje ravni porazdelitve šuma poravnane med sabo. Prav tako lahko spreminjamo časovno konstanto oblikovanja τ in ojačanje predojačevalnika. Poleg teh nastavitvev imamo še mnogo drugih, ki nam omogočajo optimalno delovanje čipa. Parametre ločimo na skupne (Tabela 3.2), torej takšne, ki so enaki za vseh 36 kanalov, in takšne (Tabela 3.3), ki jih lahko nastavljamo za vsak kanal posebej.

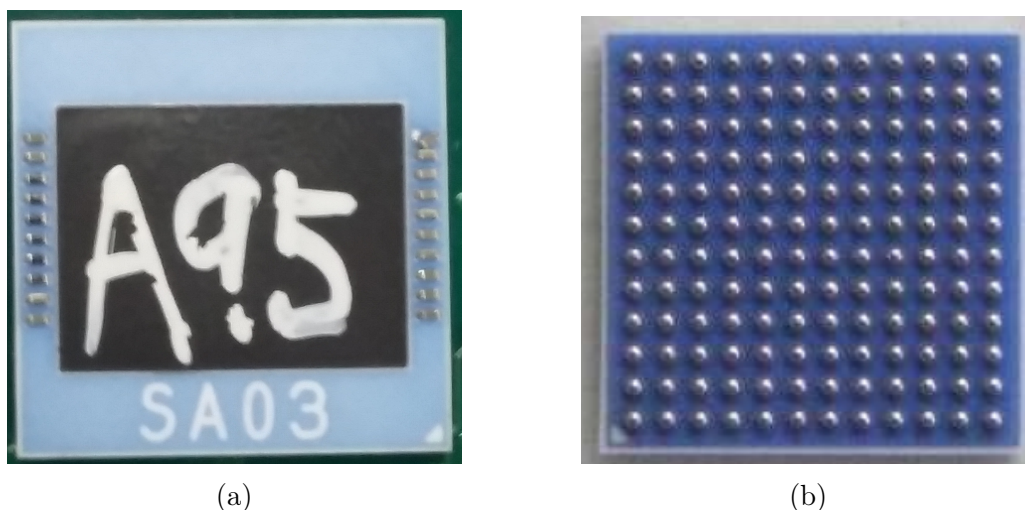
Register	Ime	Funkcija
D[1:0]	PHASECMPS	kompensacija faze v vezju
D[3:2]	GAIN	ojačanje nabojno občutljivega predojačevalnika (3=min, 0=max)
D[5:4]	SHAPINGTIME	časovna konstanta oblikovanja τ (0=min, 3=max)
D[6]	COMPARATOR	izbira komparatorja (0=unipolarni, 1=bipolarni)
D[14:7]	VRDRIVE	omejitev toka
D[16:15]	MONITOR	izbira signala signala za monitor
D[25:17]	ID	identifikacijska številka čipa

Tabela 3.2: Seznam globalnih parametrov [5].

Register	Ime	Funkcija
D[2:0]	DECAY TIME	karakteristični čas predojačevalca (ni v uporabi)
D[6:3]	OFFSET	premik srednje vrednosti (ničle) kanala
D[10:7]	FINEADJ UNIPOL	fina nastavitvev premika ničle za unipolarni komparator
D[14:11]	FINEADJ DIFF	fina nastavitvev ničle za bipolarni komparator
D[15]	-	rezervirano
D[16]	TP ENABLE	omogoči testni signal (1=onemogoči, 0=omogoči)
D[17]	KILL	onemogoči kanal (1=onemogoči, 0=omogoči)

Tabela 3.3: Seznam lokalnih parametrov [5].

Želimo si detektor, ki bi imel majhen šum. Ključno vlogo pri tem odigra parameter časovne konstante oblikovanja τ . Novodobni detektorji uporabljajo tehniko, ki oblikuje signal. To nam optimizira razmerje med signalom in šumom pri detektiranju signala [5]. Zaradi visokega sevanja se s časom poslabša razmerje med signalom in šumom. Šum prične prevladovati. To lahko optimiziramo, če lahko nastavljamo časovno konstanto τ , ki nam spreminja širino signala. Elektroniki lahko s tem zagotovimo optimalno delovanje, ki lahko traja več let navkljub visokemu sevanju.



Slika 3.15: Ohišje s Sa03 čipom ASIC (a) spredaj in (b) zadaj.

Slika 3.15 prikazuje čip ASIC, ki smo ga uporabili v našem eksperimentu. Pritrjen je na matriko priključnih kroglic BGA (angl. Ball Grid Array). Ohišje BGA ima 144 priključnih kanalov, ki so pritrjeni na tiskano vezje. Služijo nam kot vhodi za napajalne napetosti, izhodi za signale iz čipa in prenašanje parametrov na čip ASIC. Nekaj specifikacij čipa ASIC in ohišja BGA je predstavljeno v Tabeli 3.4.

Velikost ohišja BGA	13 mm×13 mm
Število priključnih kanalov BGA	12×12
Razmak med priključnimi kanali	1 mm
Velikost čipa ASIC	6.5 mm×3 mm
Število kanalov	36
Ojačanje	20-70 mV/fA
Časovna konstanta oblikovanja τ	250-1000 ns
Nivo proženja	± 1.25 V
Napajalna napetost	± 1.65 V

Tabela 3.4: Specifikacija Sa03 čipa ASIC [5].

3.4.2 Čip FPGA

Čip FPGA je integrirano vezje, ki ga je mogoče reprogramirati po izdelavi, da ustreza želenim zahtevam pri uporabi in funkcionalnosti. Ta funkcija razlikuje čip FPGA od čipa ASIC, ki je izdelan za točno določene naloge. Zaradi svoje zmogljivosti in vsestranskosti je uporaben v več sistemih, še posebno v tistih, kjer je potrebno procesirati veliko število podatkov v kratkem času. Uporablja se v letalstvu za radarske sisteme, v medicini pri CT, MRI in PET napravah in še na mnogih drugih področjih [20].

V našem eksperimentu smo kot čip FPGA uporabili Spartan-6 XC6SLX45, proizvajalca Xilinx, ki ga predstavlja Slika 3.16. Glavne značilnosti so predstavljene v Tabeli 3.5. Več o tem si lahko bralec prebere v [21].



Slika 3.16: Čip FPGA.

Velikost paketa	23 mm × 23 mm
Maksimalno število vhodov/izhodov	358
Število skupkov vhod/izhod	4
Število logičnih celic	43,661
Maksimalni RAM	401 Kb
Napajalne napetosti	+1.2 V, +1.5 V, + 2.5 V, +3.3 V
Napetost logičnega nivoja za skupek 0	+3.3 V
Napetost logičnega nivoja za skupek 1	+1.5 V
Napetost logičnega nivoja za skupek 2	+2.5 V
Napetost logičnega nivoja za skupek 3	+1.5 V

Tabela 3.5: Specifikacija čipa FPGA [21].

Čip FPGA uporabljamo za komunikacijo s čitalno elektroniko. Preko njega nalagamo parametre za pravilno delovanje čipov ASIC in ostalih komponent ter prejemo eksperimentalne podatke. Signali vstopajo in izstopajo skozi čip FPGA preko vhodov in izhodov. Tisti, ki delujejo na istem napetostnem nivoju, so povezani v skupke.

Poleg čipov ASIC in čipa FPGA tiskano vezje vsebuje še dodatne komponente, ki jih potrebujemo pri testiranju in zajemu podatkov. Te komponente bom na kratko opisal v naslednjih podpoglavjih.

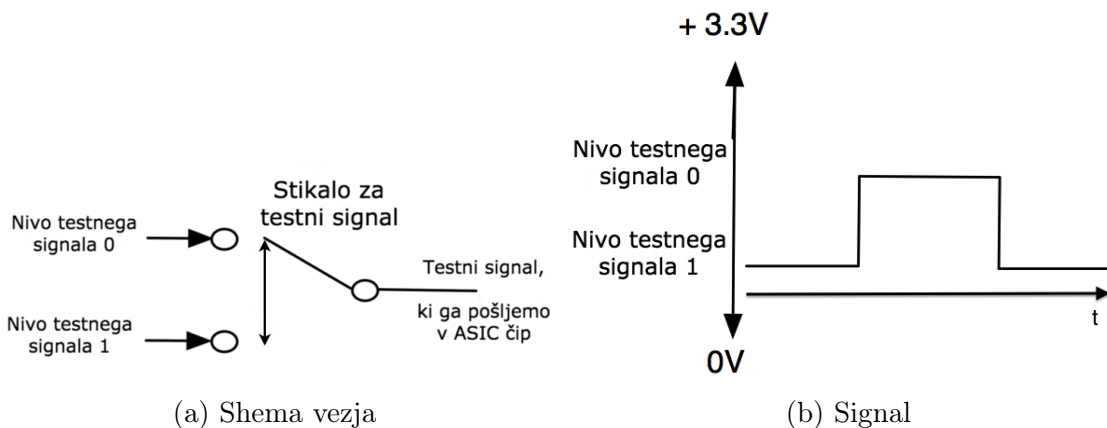
3.4.3 Testni signal

Testni signal generiramo z namenom, da preverimo ustrezen odziv vseh kanalov čitalne elektronike. Za ta namen potrebujemo vezje, ki nam bo v čip vbrizgalo naboj, ki je podoben naboju iz HAPD. Takšno vezje sestavljata dva izvora napetosti, ki ju lahko poljubno nastavljamo s pomočjo digitalnega potenciometra (serijska številka AD5232), ter stikalo (serijska številka ADG779), ki bo med njima preklapljal. Shemo prikazuje Slika 3.17a. S pomočjo dveh različnih izvorov napetosti lahko kontroliramo količino naboja, ki bo prišel v čip ASIC, lahko s pomočjo enačbe 3.6 tudi izračunamo [5].

$$\Delta Q = \Delta V \cdot C_{tp}, \quad (3.6)$$

kjer je ΔV razlika med dvema potencialoma, ki ju nastavimo mi. C_{tp} tukaj predstavlja kapacitivnost kondenzatorja za testni signal, ki ga lahko vidimo na shemi čipa ASIC, na Sliki 3.14. Njegova kapacitivnost je 10 nF. Razliko med dvema potencialoma lahko nastavljamo na intervalu med 0 V in +3.3 V.

Oblika testnega signala bo imela obliko škatle, ki nam jo prikazuje Slika 3.17b. Ta signal bo enak za vse kanale čitalne elektronike in bo dosti večji od šuma. V kolikor je signal enega kanala dosti večji od vseh ostalih, pomeni, da takšen kanal ne deluje pravilno zaradi napak pri izdelavi. Kanal s takšnim odzivom označimo kot "hot channel".



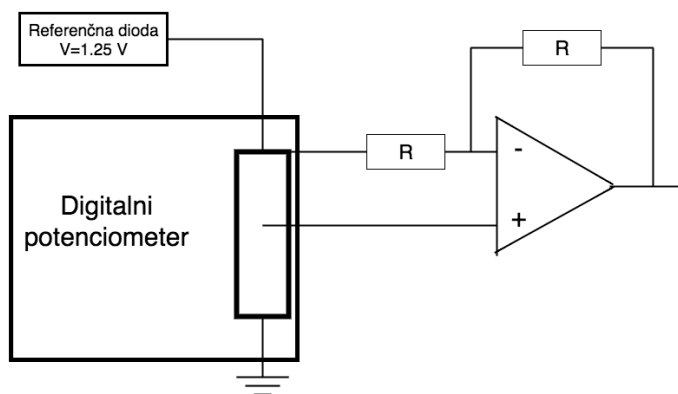
Slika 3.17: (a) Shematski prikaz vezja, ki generira testni signal in (b) oblika testnega signala.

3.4.4 Vezje za nastavitve nivoja proženja

Nivo proženja (angl. threshold) potrebujemo, da lahko ločujemo med signali. Ustvari ga vezje, ki je sestavljeno iz [5]:

1. referenčne diode (serijska številka ADR1581),
2. 10-bitnega, 2-kanalnega digitalnega potenciometra (serijska številka AD5232) in
3. ojačevalnika (serijska številka LM8262MM).

Slika 3.18 prikazuje shemo takšnega vezja. Referenčna dioda nam priskrbi konstantno napetost $V_{ref}=1.25$ V. Vezje nam omogoča nastavljanje napetosti proženja V_{th} med -1.25 V in +1.25 V z ločljivostjo 2.5 mV. To napetost lahko izračunamo kot:



Slika 3.18: Vezje za nivo proženja. Vrednost upornika znaša $R=10$ k Ω .

$$V_{th} = \frac{2 \cdot V_{ref}}{razpon} \cdot Podatki - 1.25 \text{ V}, \quad (3.7)$$

kjer je razpon 1024, saj imamo 10-bitni potenciometer. Nastavitve digitalnega potenciometra je odvisna od vrednosti parametra *Podatki* in so sledeči:

1. *Podatki*=0, če je napetost -1.25 V,

2. Podatki=511, če je napetost 0 V in
3. Podatki=1023, če je napetost +1.25 V.

3.4.5 Temperaturni senzor

Zaradi možnosti pregrevanja elektronike, kar je znak neke napake, imamo v tiskanem vezju vgrajena dva temperaturna senzorja (serijska številka TMP121). Eden je sprednji, drugi na zadnji strani. Čip ima notranji termometer, digitalizacijsko enoto in pomični register. Temperatura, ki jo izmerimo, se izračuna po naslednji enačbi [5]:

$$T = \text{Polarnost} \cdot 0.0078[^\circ\text{C}] \cdot \text{Podatki} \quad (3.8)$$

Polarnost ima en bit informacije, in sicer velja $\text{Polarnost}=0$, če velja $T > 0^\circ\text{C}$, ter $\text{Polarnost}=1$, če velja $T < 0^\circ\text{C}$. Podatki zavzema jo velikost 12 bitov. Vse skupaj nam čip pošlje 16-bitni okvir zadnje meritve. Vsebina podatkov, ki jih pošilja senzor, je grafično predstavljena na Sliki 3.19.



Slika 3.19: Register temperaturnega senzorja.

3.4.6 Sistem za zajemanje podatkov

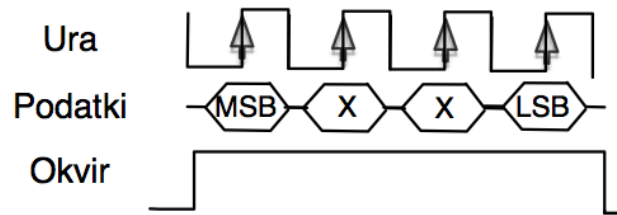
Za pravilno delovanje čipa FPGA potrebujemo procesor za nadzor delovanja in sistem za zajemanje podatkov. Poleg teh dveh glavnih sistemov sta potrebna še dva podpora sistema; prvi je sistem za nadzor urinega takta (serijska številka Xtal), drugi pa je vezje za ublažitev napak pri sevalnih poškodbah.

Sprednji del čitalne elektronike je sestavljen iz več naprav, ki jih je potrebno nadzirati, da pravilno delujejo. S pomočjo krmilnega procesorja nadziramo vse te naprave. Služi kot vstopna točka iz zunanjega sveta. Z njim zmanjšamo količino potrebnih povezav in poenostavimo komunikacijo. Procesor uporablja poenostavljeno verzijo komunikacije SPI⁴, Slika 3.20. Signalni okvir kaže, da je prenos aktiven. Podatki se prenesejo iz registra enega sistema v drugega ob naraščajočem urinem taktu.

Iz čipov ASIC dobimo digitalne signale, ki jih je potrebno najprej zaznati, nato pa poslati v sistem za zajemanje podatkov. Naš čip FPGA nam omogoča zajemanje podatkov na tri načine. Ti so:

1. meritev dolžine signala nad pragom,
2. beleženje signala ob prehodu čez prag in

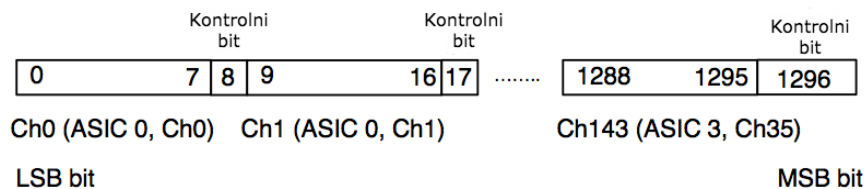
⁴Serial Protocol Interface



Slika 3.20: Komunikacija SPI, kjer prenesemo 4-bitno sporočilo [5].

3. test, kjer preverimo pravilno delovanje s pomočjo določenega podatkovnega vzorca.

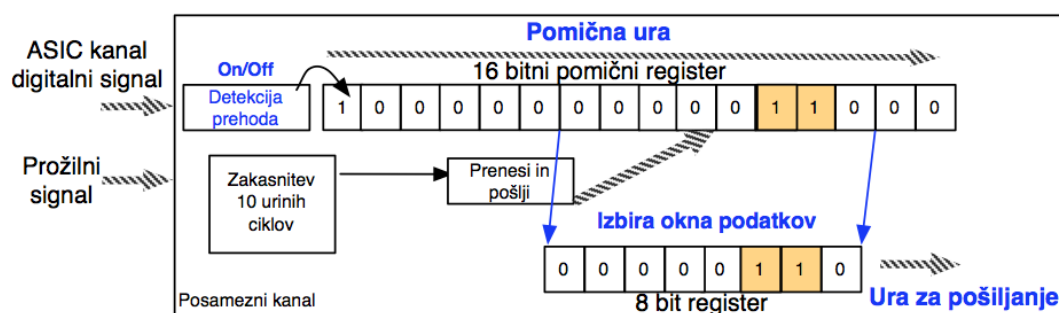
Zahteve za ta sistem so, da mora delovati s frekvenco 30 kHz in mora ločevati med dvema dogodkoma, ki sta 250 ns narazen [5]. Podatkovni okvir je sestavljen iz osmih bitov na kanal, ki jih ločuje kontrolni bit, Slika 3.21. Kontrolni bit uporabljamo za



Slika 3.21: Podatkovni okvir.

diagnostiko prenosa podatkov. Njegova vrednost mora biti vedno nič. V primeru napake na enem od 144 kanalov se stanje kontrolnega bita tistega kanala obrne.

V tem sistemu ima vsak vhodni kanal 16-bitni pomični register, Slika 3.22, ki je vgrajen v čipu FPGA. Ta služi za beleženje signalov iz čipov ASIC. Signal potuje

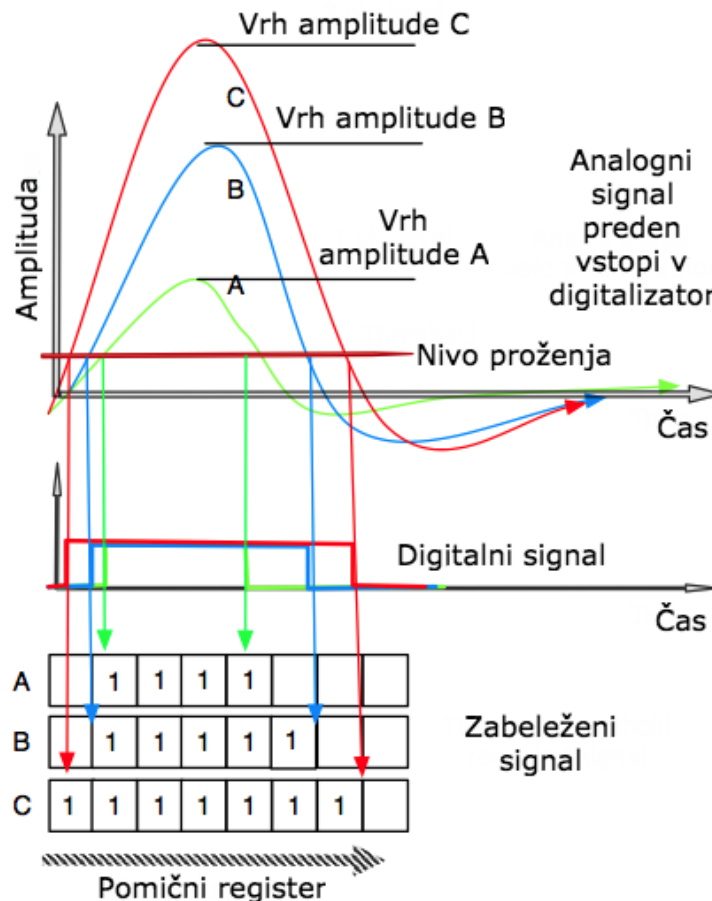


Slika 3.22: Prenos podatkov [5].

po pomičnem registru s frekvenco pomika, ki jo lahko nastavljamo za vse kanale enako, in sicer med 3.75 MHz in 48 MHz. Vsak kanal ima prav tako osem bitni register, kjer so zbrani podatki shranjeni in pripravljene za prenos. Te podatke lahko pošljamo pri različnih vrednostih, ki so odvisni od ure za pošiljanje. Po prihodu sprožilca sistem samodejno požene 10 urinih ciklov. Takrat se podatki prenesejo v osem bitni register za pošiljanje. Med globalnimi parametri uporabimo parameter *Position*, ki določi, kateri del 16-bitnega pomičnega registra se bo kopiral v osem

bitni register za pošiljanje. V naslednjem koraku se podatki prenesejo iz čitalne elektronike v zunanji svet. Tudi register za pošiljanje ima nastavljivo uro. Največja hitrost prenosa podatkov je pri 120 MHz. To pomeni, da se za vseh 144 kanalov osem bitni podatki prenesejo v $11 \mu\text{s}$ [5].

Poglejmo si, kako izgledajo ti podatki pri meritvi dolžine signala nad pragom. Slika 3.23 prikazuje ta primer za tri različne velikosti amplitud. Na neki logični



Slika 3.23: Primer meritve dolžine signala nad pragom [5].

vrednosti postavimo nivo proženja (zgoraj). Signal dobimo samo takrat, ko signal/krivulja seka nivo proženja. Dolžina digitalnega signala je odvisna od časa, ko je amplituda nad tem nivojem (v sredini). Podatki v pomičnem registru imajo obliko, ki je na sliki predstavljena spodaj.

Poglavje 4

Merilni sistem za karakterizacijo tiskanih vezij

Spektrometer Belle II bo v času eksperimenta neprestano deloval dalj časa, zato je ključno, da vse komponente delujejo brezhibno. Brezhibnost zagotovimo z veliko predhodnimi meritvami, ki posnemajo delovanje spektrometra. Čitalna elektronika in HAPD sta osrednja elementa detektorja ARICH, zato moramo zagotoviti njuno brezhibno delovanje. S testiranjem določimo njihove karakteristike, ki jih je potrebno upoštevati pri vgradnji v spektrometer.

Moja naloga na *Institutu "Jožef Stefan"* v Ljubljani je obsegala pripravo aparature, s katero bomo na čitalni elektroniki izvedli naslednje stvari:

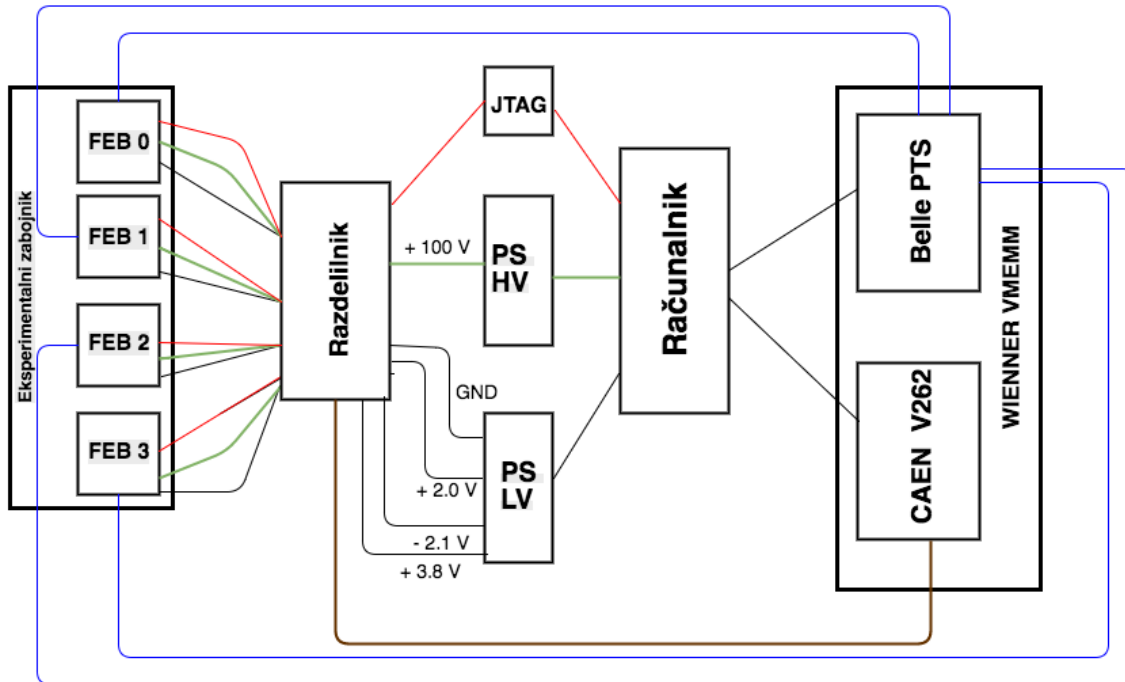
1. preverili, ali smo pravilno naložili parametre čipov ASIC in FPGA,
2. določili tokove pri napajanju z nizko in visoko napetostjo,
3. opravili test linearnosti vezja za nivo proženja,
4. izmerili napetosti, ki jih potrebujemo za delovanje čitalne elektronike in temperaturo iz dveh senzorjev,
5. določili šumeče kanale,
6. določili kanale, ki delujejo nepravilno in
7. določili naklon srednje vrednosti, pri spreminjanju odmika od nivoja proženja.

4.1 Shema eksperimentalne postavitve

Shema postavitve prikazuje Slika 4.1. Elektronske povezave vodijo od čitalne elektronike do računalnika. Preko njih bomo nalagali parametre za delovanje čipa FPGA in beležili eksperimentalne podatke. Sistem, ki nam bo to omogočal, smo sestavili na osnovi standarda *VME* [22].

Osrednja stvar našega eksperimenta je eksperimentalna škatla, kjer smo testirali čitalno elektroniko. Na sredini je plošča, ki vsebuje štiri odprtine, kamor pritrdimo tiskano vezje. Postavljena je na tečajih, tako da lahko ploščo obračamo za 180° . S tem lahko dostopamo do tiskanega vezja s sprednje in zadnje strani. Na zadnji strani plošče imamo poleg odprtine pritrdjeno še eno tiskano vezje, kamor pritrdimo

kable za prenos podatkov in parametrov. To tiskano vezje je povezano s čitalno elektroniko. Na zadnji strani čitalne elektronike pritrđimo konektorja za visoko in nizko napetost ter konektor za vhod/izhod. Ploščo nato obrnemo in na sprednjo stran čitalne elektronike pritrđimo še dodatna tiskana vezja, ki s kapacitivnimi sklopitvami nadomeščajo priklop detektorja HAPD. Vsi kabli vstopijo v škatlo na zadnji strani, kjer je izdelana majhna špranja.



Slika 4.1: Shema eksperimentalne postavitve.

Da lahko hkrati testiramo štiri tiskana vezja, potrebujemo razdelilnik, ki nam bo vse napetosti in parametre za delovanje čipa FPGA razdelil na štiri enake dele in ki je povezan z modulom *CAEN V262*. Sestavljen je iz štirih med seboj neodvisnih podsistemov. Med njimi je takšen, ki lahko generira 16 nivojev *ECL*¹ na večočkovnem konektorju [23]. Torej, vsaki čitalni elektroniki ustrezajo štirje izhodi *ECL*. S pomočjo te logike lahko preko razdelilnika preklapljammo med tiskanimi vezji. Modul *CAEN V262* razdelilniku pove, na katero tiskano vezje naj pripelje napetosti ter parametre za delovanje čipa FPGA. To nam omogoča testiranje enega tiskanega vezja ali vseh štirih hkrati.

Parametre za delovanje čipa FPGA pošiljamo preko *JTAG Xilinx* USB kontrolerja [24]. Ti so zapisani v obliki računalniške datoteke in jih lahko spreminjamo. Parametre za delovanje čipov ASIC, ki so predstavljeni v Tabeli 3.2 in 3.3, smo na tiskano vezjo naložili preko VME modula *Belle PTS*.

Kot napajalnik za visoko napetost smo uporabili štiri-kanalni NIM modul *CAEN N1470*. Omogoča napetosti do 8 kV in tokove do 3 mA [25]. Za našo elektroniko smo uporabili napajanje z napetostjo 100 V in tokovno limito 20 μ A. Za nizko napetost smo uporabili napajalnik *TEXIO PW-1.8AQ* [26]. Z njim smo napajali elektroniko s +3.8 V in tokovno limito 0.5 A, -2.1 V in tokovno limito 0.9 A ter +2.0 V in tokovno limito 0.8 A.

¹emitter-coupled logic

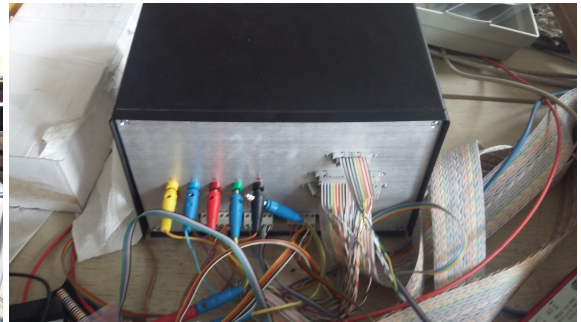
4.1. Shema eksperimentalne postavitve

Vse podatke smo neposredno iz čipa FPGA pripeljali na modul *VME Belle PTS*. Celoten proces testiranja smo kontrolirali z računalnikom, ki je bil povezan z vsemi zgoraj omenjenimi sistemi. Za zbiranje podatkov in nadziranje zgoraj opisanega sistema smo uporabili programsko opremo *LabWindows/CVI* proizvajalca *National Instruments* [27]. Izdelali smo dve aplikaciji. S prvo smo merili tokove, ki so tekli skozi čitalno elektroniko pri nizki in visoki napetosti. Druga nam je služila kot test naše elektronike. Z njo smo merili različne napetosti, ki jih potrebujemo za delovanje celotnega tiskanega vezja, odziv kanalov na testni signal in na spreminjanje nivoja proženja, ter šum.

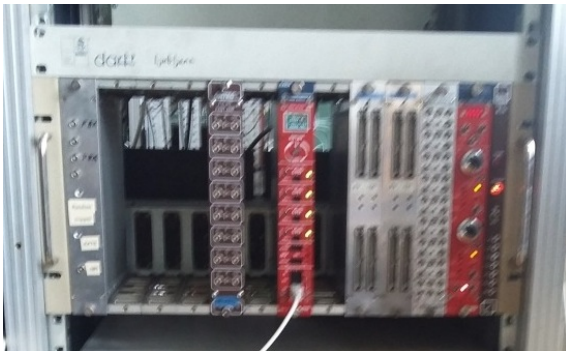
Na Sliki 4.2 so predstavljene fotografije zgoraj omenjenih naprav.



(a) Škatla s tiskanimi vezji.



(b) Razdelilnik.



(c) Napajalnik za visoko napetost.



(d) JTAG Xilinx USB kontroler.



(e) Napajalnik za tiskano vezje.

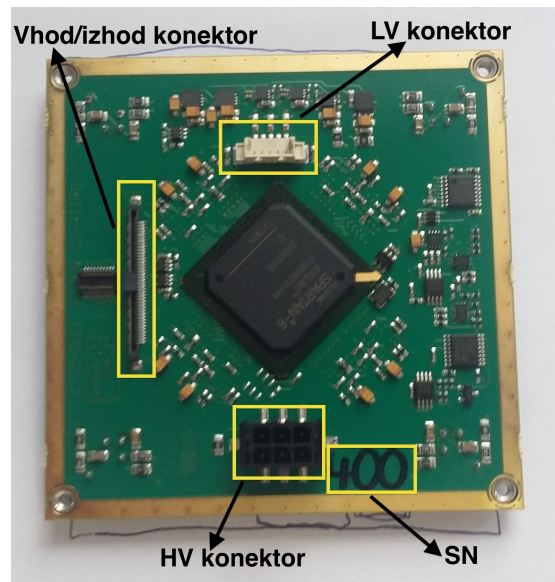


(f) Modula Belle PTS in CAEN V262.

Slika 4.2: Fotografije naprav, ki smo jih uporabili za test tiskanih vezij.

4.2 Potek meritev

Najprej moramo popisati čitalno elektroniko. Na zadnji strani, kjer je konektor za visoko napetost, sem označil serijsko številko SN, kar je vidno na Sliki 4.3. Nato sem na sprednji strani popisal čipe ASIC. Vsi čipi ASIC so bli predhodno izmerjeni na Japonskem.



(a) Zadnja stran čitalne elektronike s čipom FPGA, konektorji in pozicijo serijske številke SN.



(b) Sprednja stran čitalne elektronike s štirimi čipi ASIC.

Slika 4.3: Priprava na meritev. Vsaki čitalni elektroniki sem določil serijsko številko in popisal čipe ASIC.

Ker gledamo odziv posameznih kanalov, teh je 144, moramo vedeti njihove povezave s čipi ASIC. Kot smo že omenili, na vsak čip ASIC je priključenih 36 kanalov. Njihove pozicije prikazuje Slika 4.4. Enaka barva kanalov pripada enakemu čipu ASIC, ki je označen z isto barvo.

Ko smo na zadnji strani čitalne elektronike priključili vse konektorje, smo na spre-

54	50	46	42	38	49	45	41	40	52	NC	125	136	137	133	129	143	139	135	131	127	NC	126													
	51	47	43	39	37	48	44	NC	36	NC	140	G	132	128	141	142	138	134	130	NC															
55	NC																					NC	128												
59	58																						123	122											
63	62																							119	118										
67	66																								115	114									
71	70																									111	110								
57	69																										109	121							
61	56																											120	117						
65	60																												116	113					
64	G																												NC	112					
53	68																													108	124				
NC	NC																													NC	NC				
16	0																														104	89			
4	NC																														G	100			
5	8																															96	101		
9	12																																92	97	
13	1																																105	93	
2	3																																106	107	
6	7																																102	103	
10	11																																	98	99
14	15																																	94	95
18	NC	GND																																NC	91
NC	22	26	30	34	33	20	24	G	32	NC	72	NC	80	84	73	75	79	83	87	NC															
19	23	27	31	35	21	25	29	28	17	NC	88	76	77	81	85	74	78	82	86	90															
NC																																			
NC																																			

Slika 4.4: Seznam kanalov v tiskanem vezju. Kanali z enako barvo pripadajo enemu čipu ASIC, ki je označen z enako barvo.

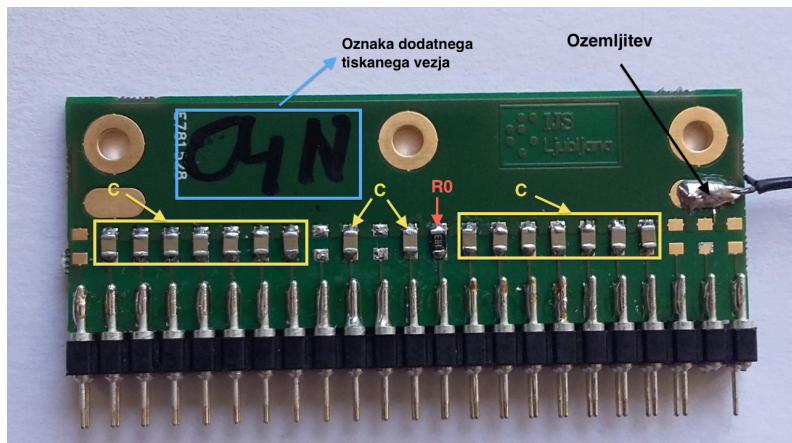
dnji strani nataknilo posebna tiskana vezja, ki nam služijo kot nadomestek HAPD-ju. Prve meritve smo opravili kar s HAPD-jem, vendar smo pri tem naleteli na kar precej težav. Imeli smo samo 4 detektorje in 70 čitalnih elektronik. Pri vsaki meritvi smo morali HAPD nataknilo na elektroniko in po njej odstraniti. Le-teh nismo želeli popolnoma pritrditi v vezje, ker bi za odstranjevanje sensorja potrebovali preveliko silo in bi tako lahko poškodovali čitalno elektroniko in HAPD. Ker nista bila dovolj pritrjena drug na drugega, se je pogosto zgodilo, da se je HAPD snel iz čitalne elektronike, zato nismo mogli preveriti povezave do sensorja. Meritev smo morali tako ponoviti.

4.2.1 Dodatno tiskano vezje

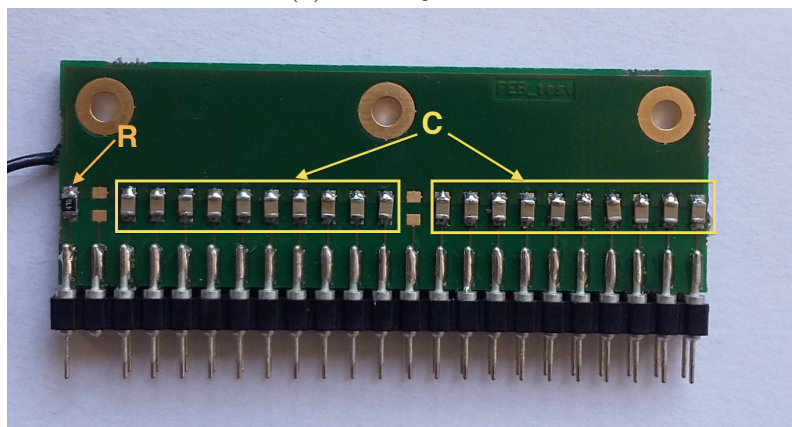
Da bi se izognili zgoraj opisanim težavam, smo izdelali posebna tiskana vezja, ki so imela podobne karakteristike kot HAPD. Imajo podobno kapaciteto in omogočajo meritev tokov po napajalnih linijah. Visokonapetostne priključke so povezala preko upornika z veliko upornostjo z ozemljitvijo. Na ta način smo lahko izmerili tok skozi visokonapetostni priključek. Bila so bolj robustna, z njimi je bilo lažje rokovati in v primeru okvare jih je bilo lažje zamenjati. Notranjo in zunanjo stran tega vezja prikazuje Slika 4.5. Vrednosti kondenzatorjev in upornikov, ki so označeni na sliki, so predstavljeni v Tabeli 4.1.

Kondenzator C	10 nF
Upor R₀	0 Ω
Upor R	47 MΩ

Tabela 4.1: Vrednosti kondenzatorjev in upornikov na dodatnem tiskanem vezju.



(a) Notranja stran



(b) Zunanja stran

Slika 4.5: Dodatno tiskano vezje, ki smo ga uporabili za testiranje čitalne elektronike.

Za vsako čitalno elektroniko smo potrebovali štiri dodatna tiskana vezja. Na notranjo stran smo označili pozicijo, da pri nadaljnjih meritvah ne bi prihajalo do zmešnjave. Tako smo lažje odkrili, ali se je katero dodatno vezje pokvarilo. Na Sliki 4.5 oznaka 04N pomeni sledeče: številka 0 označuje pozicijo čitalne elektronike (FEB0), številka 4 pomeni, da je to četrto dodatno tiskano vezje in ga postavimo tako, da pokrije polovico čipa ASIC 0 in 1, torej povsem levo stran na Sliki 4.4. Dodatna oznaka N pomeni, da je to novo vezje, ker smo predhodno vezje zamenjali zaradi dotrajanosti.

Nekajkrat se je zgodilo, da smo na polovici dveh čipov ASIC dobili zelo malo šuma in zelo velik odziv na testni signal. To je pomenilo, da se nam je dodatno vezje iztaknilo iz čitalne elektronike. Iz številke kanalov sem nato lahko določil, katero vezje se je iztaknilo in ponovil meritev. Takšnih naključij je bilo dosti manj kot pri meritvi s HAPD-jem, zato so te meritve potekale mnogo hitreje in tudi lažje izvedljive.

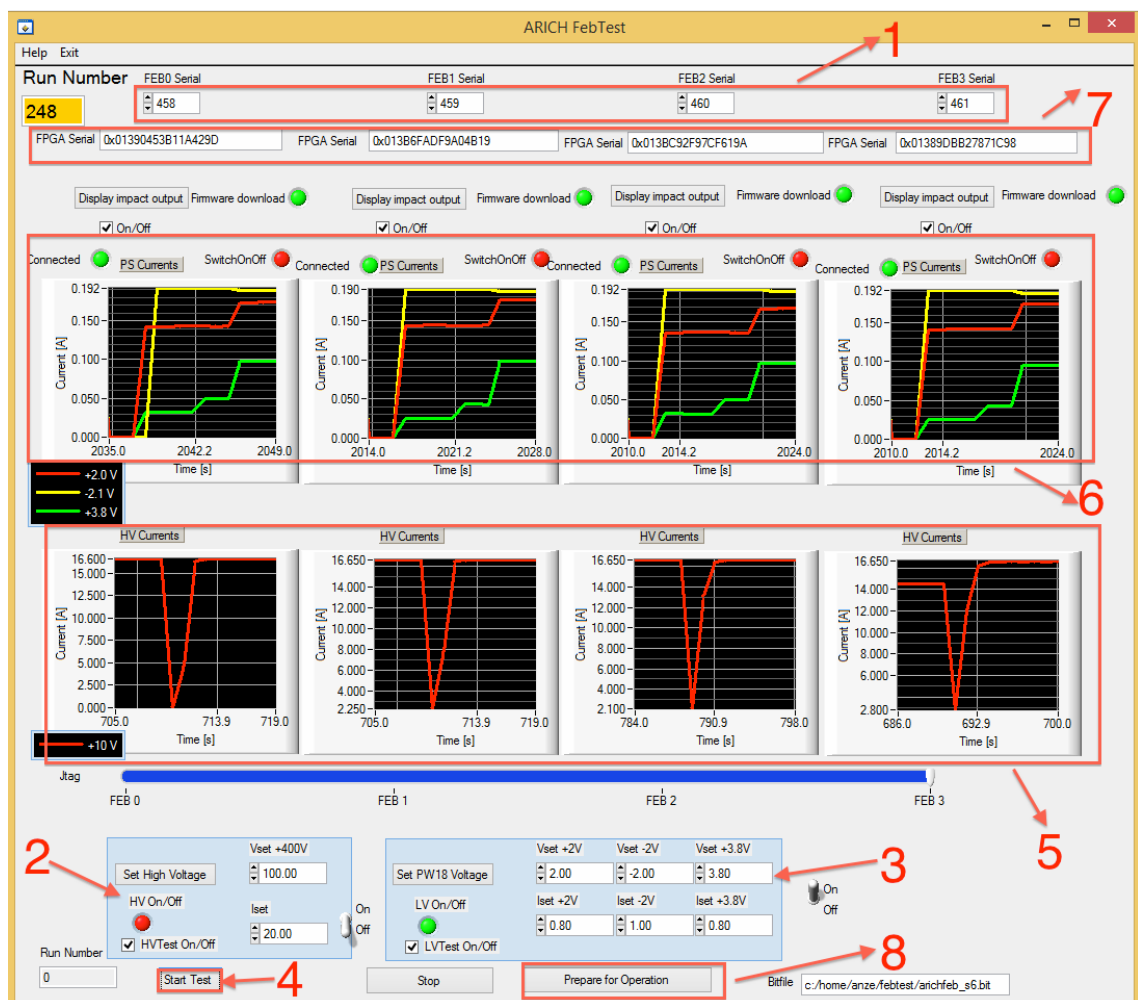
Prednost teh dodatnih vezij je bila tudi ta, da so bila preprosta za izdelavo in popravilo. Največjo težavo pri teh dodatnih vezjih je predstavljala žica, ki smo jo uporabljali za ozemljitev. Večkrat se pretrgala in sem jo moral zamenjati. S temi dodatnimi tiskanimi vezji sem izmeril 360 tiskanih vezij, nekatere tudi po dvakrat ali trikrat.

Električne sheme kanalov, kamor so natakknjena dodatna tiskana vezja, so predstavljena v dodatku C.

4.2.2 Programa za zajemanje podatkov

Meritve sem izvajal s pomočjo dveh aplikacij. Z eno sem meril tokove pri nizki in visoki napetosti. Program nam je omogočal testiranje enega ali vseh štirih tiskanih vezij hkrati, Slika 4.6. Sestavljajo ga:

1. okna, kamor vpišemo serijske številke čitalnih elektronik, ki jih testiramo,
2. nastavitve za visoko napetost,
3. nastavitve za nizko napetost,
4. gumb za zagon meritve,
5. grafični prikaz tokov pri visoki napetosti,
6. grafični prikaz tokov pri nizki napetosti,
7. okna, kamor se izpišejo serijske številke čipov FPGA in
8. gumb, s katerim začnemo pripravo čitalne elektronike za drugi test.



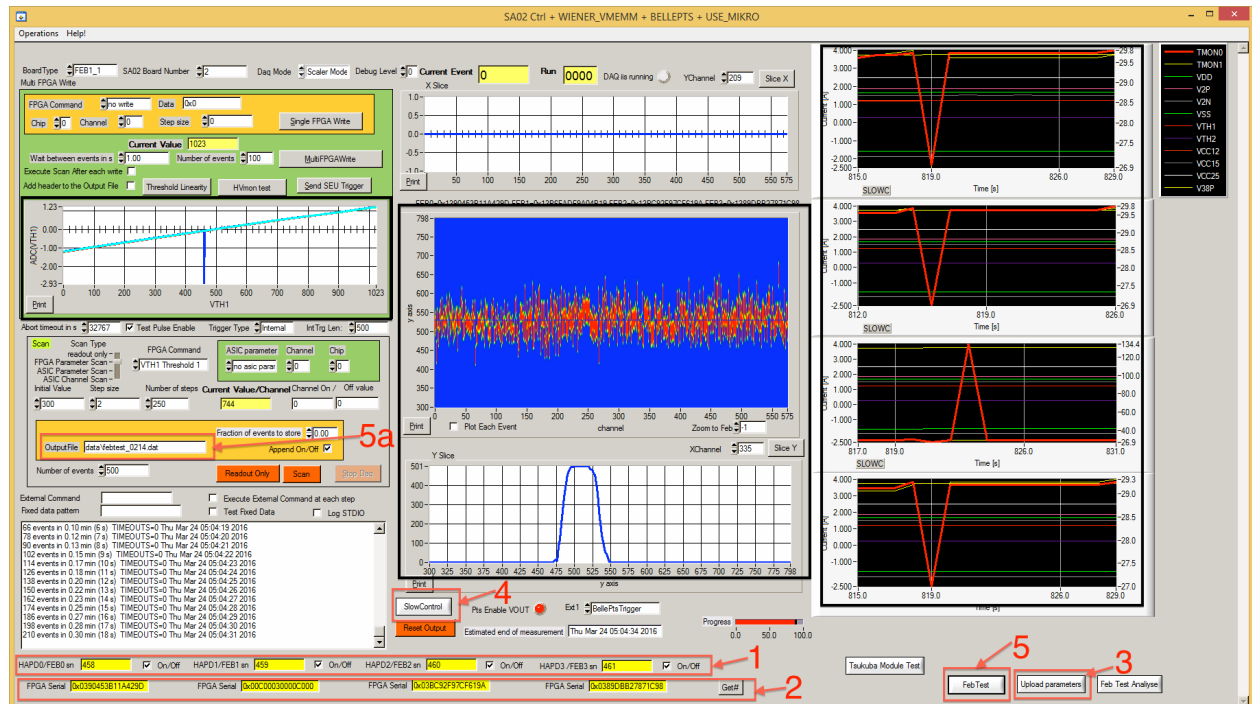
Slika 4.6: Grafični vmesnik programa ARICH Feb Test.

Poglavje 4. Merilni sistem za karakterizacijo tiskanih vezij

Program je napisan tako, da nam vse podatke, kot so serijska številka čitalne elektronike in čipa FPGA ter napetosti in tokove, zabeleži v računalniški datoteki *xml*, s pomočjo katere lahko nato obdelujemo podatke.

Po končani prvi meritvi lahko pričnemo z drugo in hkrati glavno meritvijo. Za to sem potreboval nov program, ki je predstavljen na Sliki 4.7. Ta nam meri vse napetosti, ki jih potrebujemo za delovanje čitalne elektronike in linearnost vezja za nivo proženja. S pomočjo testnega signala sem določil odziv kanalov, s spreminjanjem praga diskriminacije pa parametre za nadaljnjo kalibracijo. Program sestavlja:

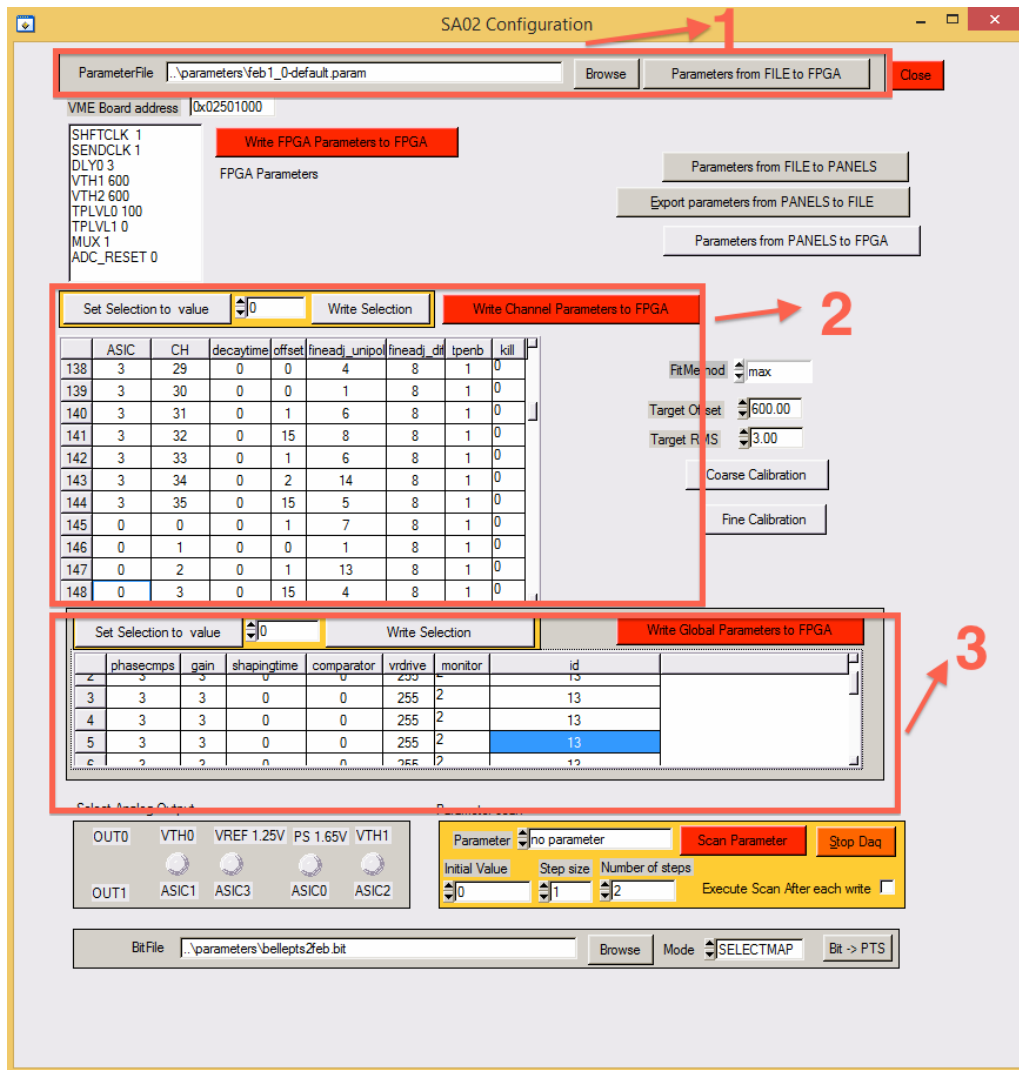
1. okenca, kamor vpišemo serijske številke čitalnih elektronik,
2. okenca, kamor se izpišejo serijske številke čipov FPGA,
3. gumb za nalaganje parametrov na čipe ASIC,
4. gumb za izpis vseh napetosti, ki jih merimo, in
5. gumb za začetek meritve.



Slika 4.7: Grafični vmesnik programa Sa02_daq.

Program nam omogoča sprotno spremljanje podatkov. Meritve se nam izrisujejo v okencih, ki so označeni s črnimi kvadrati. Levo je predstavljen test linearnosti vezja za nivo proženja. Sprotno se izrisujejo posamezne točke meritev za vsako čitalno elektroniko posebej. Na sredini je odziv kanalov na testni signal in meritev šuma. Hkrati merimo vsa štiri tiskana vezja. Zgoraj je izrisana porazdelitev odzivov vseh kanalov iz vseh štirih tiskanih vezij pri izbranem nivoju proženja, spodaj pa lahko spremljamo odziv posameznega kanala. Na desni strani so grafi za napajalne napetosti tiskanega vezja ter čipov ASIC in FPGA, napetosti za nivo proženja in temperaturo. Ti se, prav tako kot test linearnosti, merijo za vsako tiskano vezje posebej.

Ta program omogoča meritve enega ali štirih tiskanih vezij hkrati. To, kar naredimo s pritiskom na gumb *Upload Parameter*, predstavljenim pod točko 3, prikazuje Slika 4.8.



Slika 4.8: Okno za nastavljanje parametrov čipa Sa02.

Pod točko 1 je predstavljena datoteka, v kateri so shranjeni parametri za delovanje čitalne elektronike. Zapišemo jih lahko na čip FPGA s pritiskom na gumb *Parameters from FILE to FPGA*, ali v našem primeru s pritiskom na gumb *Upload Parameter*, Slika 4.7. Te parametre lahko tudi izpišemo, da vidimo njihove vrednosti.

Pod številko 2 vidimo vrednosti za lokalne parametre, ki so bili predstavljeni v Tabeli 3.3. Tukaj lahko spreminjamo njihove vrednosti in jih nato zapišemo na čip FPGA s klikom na gumb *Write Channel Parameters to FPGA*.

Številka 3 predstavlja globalne parametre, ki so bili predstavljeni v Tabeli 3.2. Ponovno lahko vidimo vrednosti teh parametrov za vse kanale in jih spreminjamo. Na FPGA jih zapišemo s klikom na gumb *Write Global Parameters to FPGA*.

Podroben opis poteka eksperimenta je predstavljen v dodatku A.

Poglavje 5

Analiza meritev

Analizo podatkov sem ločil na dva dela. V prvem delu sem kontroliral tokove skozi elektroniko pri nizki in visoki napetosti. Drugi del je bil obširnejši, saj je vseboval test linearnosti vezja za nivo proženja, kjer preverjamo pravilno delovanje vezja za nivo proženja, meritve vseh napetosti in temperature, odziv kanalov na testni signal, meritev šuma in določanje naklona srednje vrednosti za posamezni kanal, pri čemer smo spreminjali nivo proženja. Iz naših kontrolnih programov sem dobili podatke v obliki *xml* in *dat* datotek. Njihovo analizo sem izvedel s programom *ROOT*, ki omogoča obdelavo velike količine podatkov [28]. Grafične rezultate sem izvozil v obliki *pdf* (zaradi večje preglednosti), ostale pa v *xml* datoteko.

5.1 Meritev tokov

Napisal sem program, ki nam bo združil meritve za tokove pri nizki in visoki napetosti. Rezultate shranjuje v *pdf* formatu, kar nam prikazuje Slika 5.1, ki jo lahko razdelimo na tri dele.

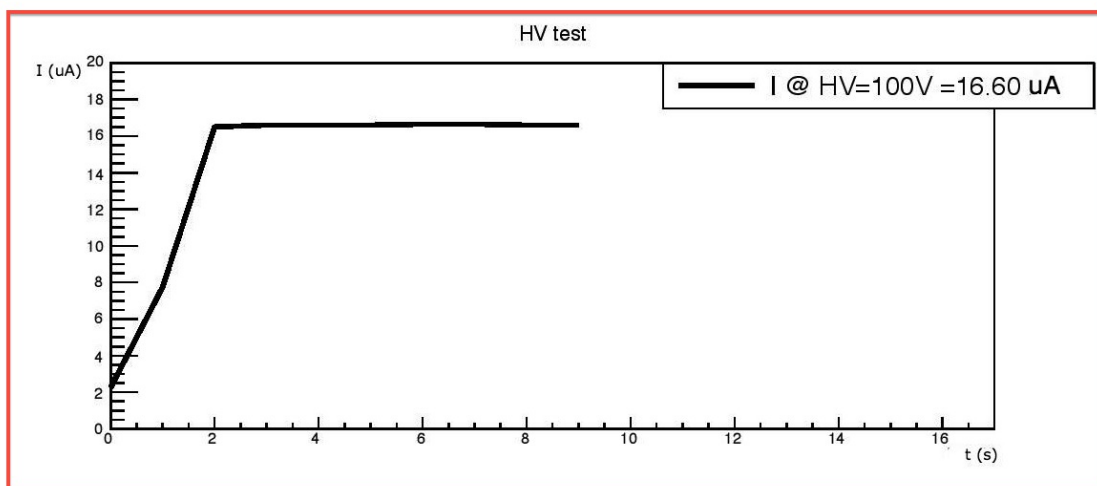
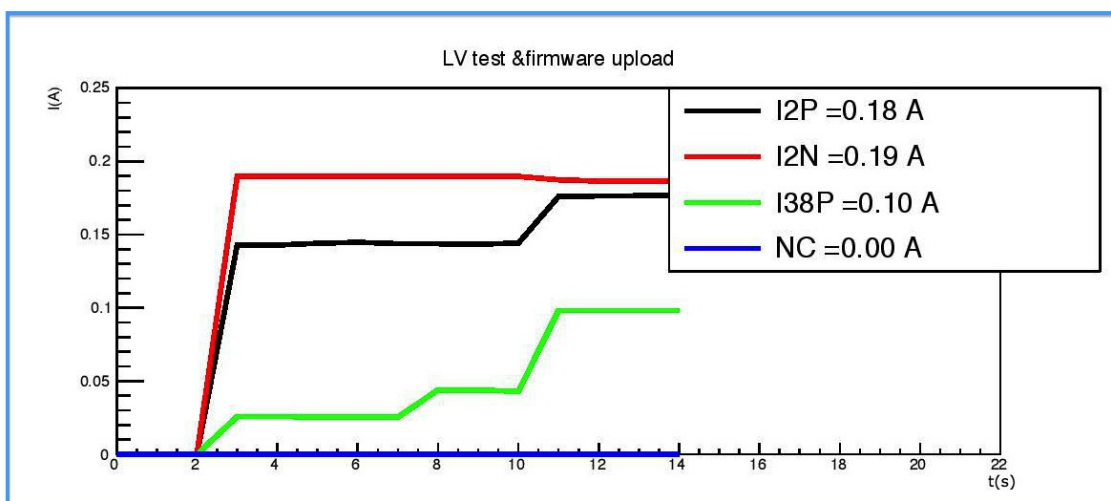
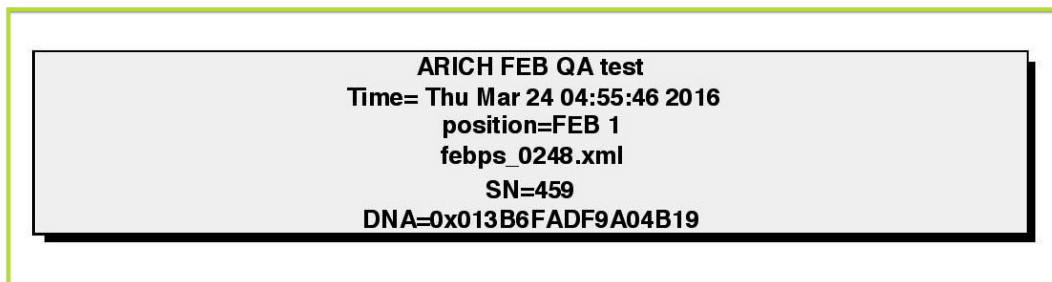
V prvem delu, ki je označen z zelenim okvirjem, je izpisan čas meritve. Zaradi morebitnih sistematskih odstopanj meritev na različnih pozicijah ter napak s konektorji ali napajanjem, sem izpisal, na katerem mestu sem tiskano vezje testiral. Če bi se iste napake ponavljale vedno na istem mestu, bi to pomenilo, da imamo težave z eksperimentalnimi napravami, ne pa s samim tiskanim vezjem. Temu sledi podatek, v katero datoteko so se naši podatki shranili. Na koncu sta izpisani serijski številki tiskanega vezja in čipa FPGA.

Drugi del, ki je označen z modrim okvirjem, je namenjen analizi tokov pri nizki napetosti. Kot sem že omenil, tiskano vezje napajamo s tremi napetostmi, in sicer +3.8 V, -2.1 V in +2.0 V. Narisan je potek toka v odvisnosti od časa za vse tri napetosti. Predhodno smo izmerili, koliko časa potrebuje tiskano vezje, da se vzpostavijo stacionarne razmere, torej da so tokovi konstantni. Tok najprej steče skozi sistem kondenzatorjev in upornikov. Temu smo potem prilagodili celotno meritev. Ugotovili smo, da je v približno 10 s tem pogojem zadoščeno, vendar smo raje merili 14 s. V tem času se tudi naložijo vsi parametri na čip FPGA, ki nam omogoči pravilno delovanje. Pri meritvah smo dopustili približno 10 mA odstopanje od pričakovane vrednosti. Večje odstopanje je pomenilo napako tiskanega vezja.

Zadnji del, ki je označen z rdečim okvirjem, je namenjen analizi toka pri visoki napetosti. Pri tej meritvi smo preverili pravilno delovanje vezja, ki je predstavljen na Sliki B.4 v Dodatku B. Tudi tukaj smo predhodno izmerili, koliko časa je po-

Poglavje 5. Analiza meritev

trebno, da se vzpostavijo stacionarne razmere. Stacionarni tok doseže vrednost $16.6 \mu\text{A}$. Odstopanja reda velikosti $0.1 \mu\text{A}$ so še znotraj dopustne meje, vse, kar je več, nakazuje na napako. S tem testom preverimo, če so napajalne linije za visoko napetost pravilno priključene. To napetost potrebujemo za dodatno ojačanje senzorja HAPD.



Slika 5.1: Analiza tokov.

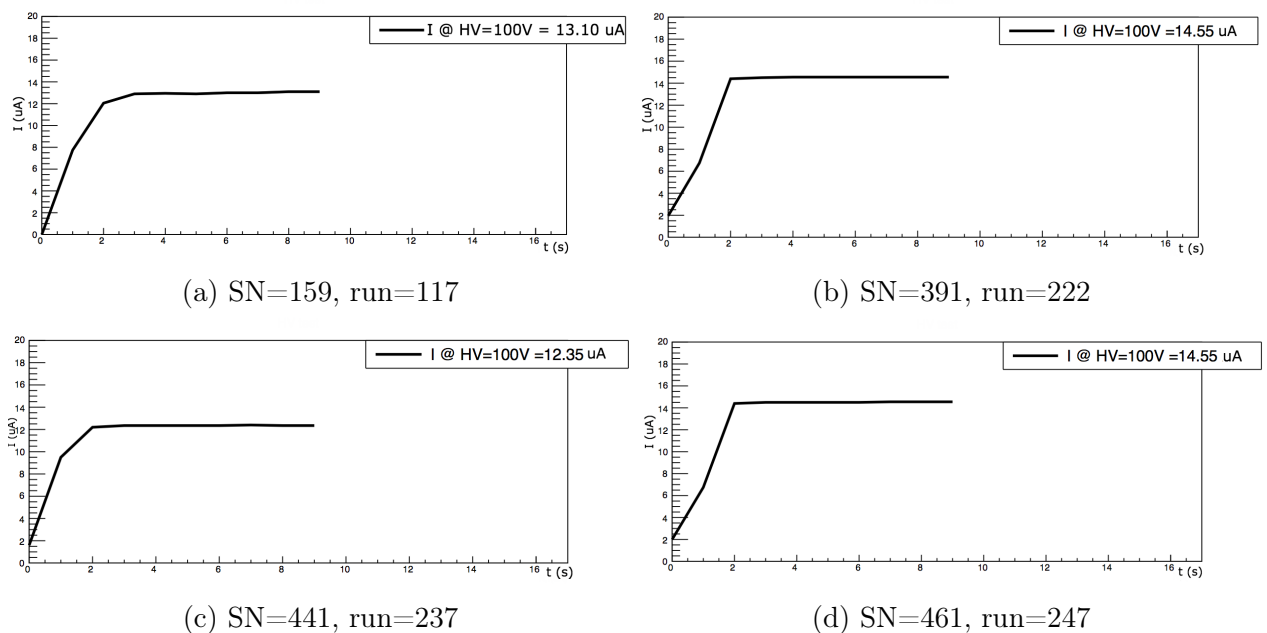
5.1.1 Primeri napak

Ker se pri vsakem eksperimentu ne moremo izogniti napakam, bom v tem podglavju predstavil nekaj tipičnih, s katerimi smo se srečevali pri meritvah. Nekatere so bile mehanske narave, druge pa so bile povezane z napakami na elektroniki.

Sistematske napake, s katerimi sem se srečeval pri meritvi tokov z visoko napetostjo, so bile:

1. dotrajanost napajalnih kablov. Pri veliko ponovitvah so se začele žičke na konektorju za visoko napetost trgati in
2. napajalne linije za visoko napetost niso bile pravilno priključene.

Prvo napako je bilo lahko odpraviti, saj sem preprosto popravil žico, ki se je pretrgala in nadaljeval z meritvami. Dva takšna primera prikazujeta Sliki 5.2b in 5.2d. Večjo težavo je povzročala druga napaka, saj po teh napajalnih linijah privedemo napetost za dodatno ojačanje na senzor HAPD. Zaradi te nepake bi senzorji HAPD nepravilno delovali. Takšna tiskana vezja izločim iz nadaljnjih testiranj in jih pošljem na popravilo. Dva takšna primera prikazujeta Sliki 5.2a in 5.2c.



Slika 5.2: Primeri napak pri meritvi z visoko napetostjo.

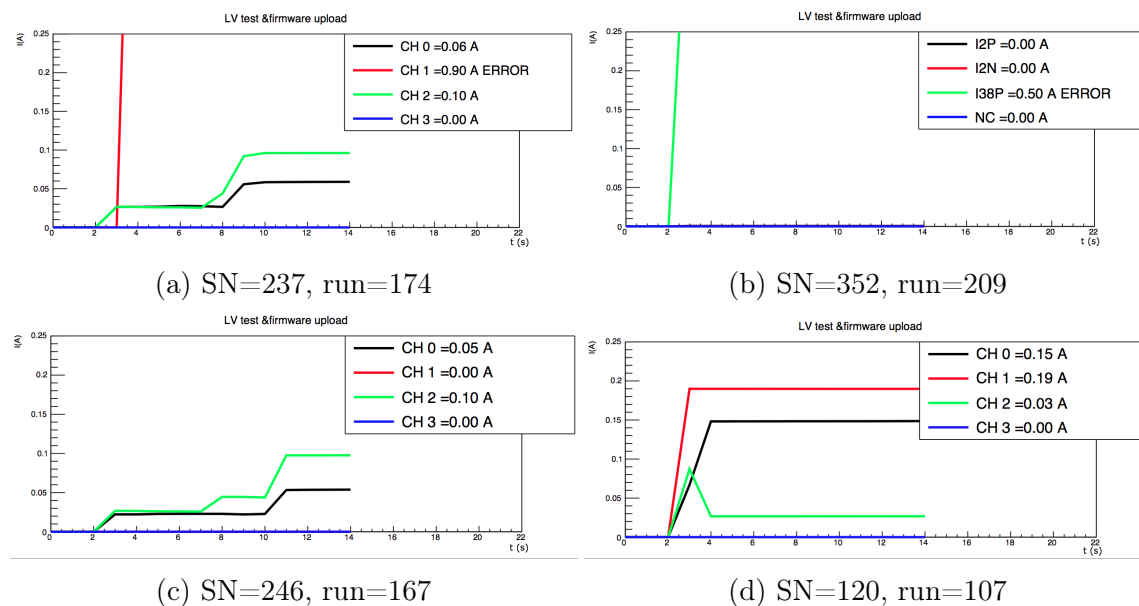
Tudi pri meritvi z nizko napetostjo je prišlo do napak med meritvijo. Te napake so bile:

1. dotrajanost konektorja za nizko napetost in
2. nedelujoči čip FPGA.

Prvi primer napake prikazujeta Sliki 5.3a in 5.3c. Zaradi večkratnih ponovitev istaga giba, ko sem nataknil in iztaknil napajalni kabel, so se napajalne žice začele trgati in prišlo je do kratkega stika med njimi. V tem primeru je bilo potrebno zamenjati celoten napajalni kabel in konektor. V drugem primeru, ki ga prikazujeta Sliki 5.3b in 5.3d, ne deloval celoten čip FPGA. Prvi znak napake je nakazovalo že

Poglavje 5. Analiza meritev

to, da nisem mogel prebrati njegove serijske številke. Ta tiskana vezja niso primerna za nadaljnje meritve, zato sem jih izločili in poslal na popravilo. Takšnih primerov ni bilo veliko, samo pet.



Slika 5.3: Primeri napak pri meritvi z nizko napetostjo.

5.1.2 Porazdelitve tokov

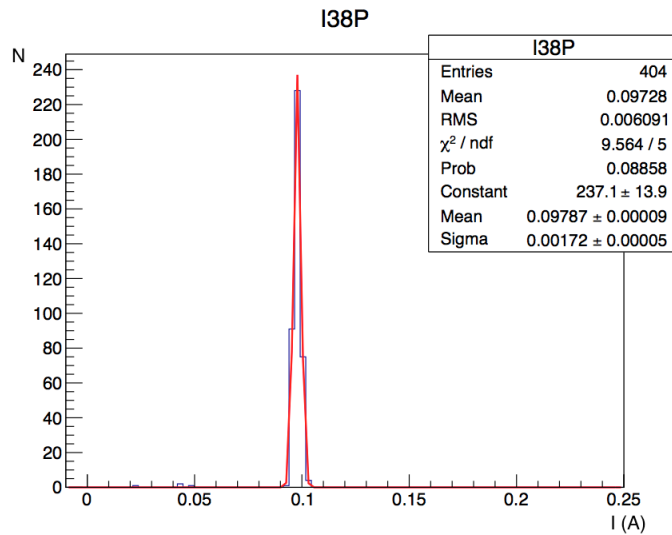
Na koncu sem naredil porazdelitev tokov za vsako napajalno napetost posebej. Te porazdelitve vključujejo le tiskana vezja, ki so bila izmerjena z dodatnim tiskanim vezjem, ki sem ga predstavil v podpoglavju 4.2.1. Vsem trem porazdelitvam tokov za nizko napetost sem določil razpon med 0 in 0.25 A, da lahko primerjamo širine porazdelitev.

Najprej si pogledimo porazdelitev izmerjenih tokov pri napetosti +3.8 V, ki nam jo prikazuje Slika 5.4a. Vidimo normalno porazdelitev okoli vrednosti 0.1 A in nekaj odstopanj okoli 0.05 A. Ta odstopanja so napake, ki sem jih opisal v prejšnjem podpoglavju. Širina porazdelitve na polovični višini znaša $1.72 \mu\text{A}$, kar nakazuje na majhno odstopanje tokov od srednje vrednosti. To širino lahko primerjamo z ostalima dvema. Iz slike lahko vidimo, da naša analiza zajema 404 tiskanih vezij. V resnici jih nismo izmerili toliko, ampak 370. Teh dodatnih 34 je posledica, da smo nekatere izmerili dvakrat, zaradi kakšne napake, kot so sneta dodatna tiskana vezja.

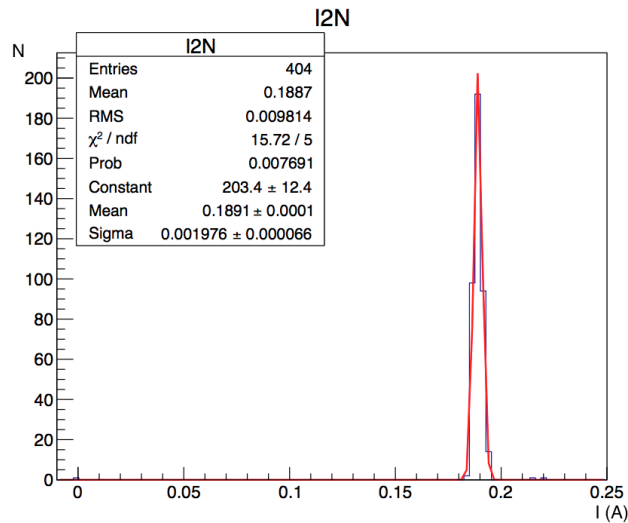
Naslednja porazdelitev, ki jo prikazuje Slika 5.4b, je porazdelitev tokov pri napetosti -2.1 V. Povprečna vrednost je okoli 0.19 A. Širina porazdelitve na polovični višini znaša $1.98 \mu\text{A}$. Ta širina je primerljiva s širino na polovični višini pri napetosti +3.8 V. Tudi tukaj imamo majhno odstopanje od srednje vrednosti.

Slika 5.4c predstavlja porazdelitev tokov pri napetosti + 2.0 V. Povprečna vrednost je približno 0.17 A. Vrednost širine na polovični višini znaša $3.85 \mu\text{A}$. Ta je približno dvakrat večja kot ostali dve.

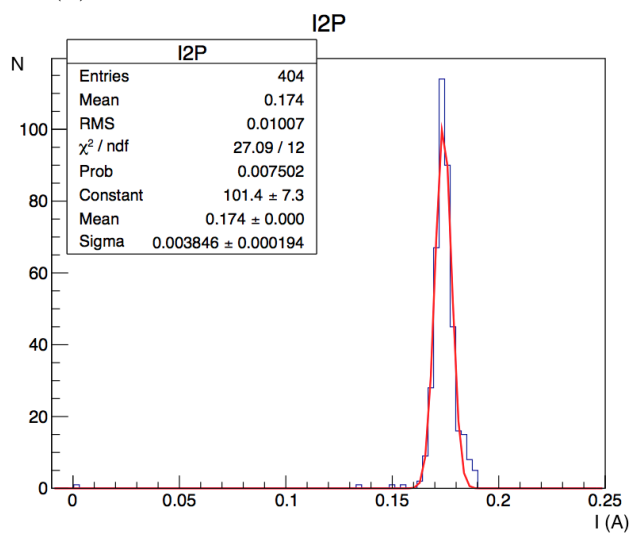
Iz gornjih podatkov lahko izračunamo še moč, ki jo potrebujemo za delovanje tiskanega vezja. Ta znaša okoli 1 W, natančneje 1.12 W.



(a) Porazdelitev tokov pri napetosti + 3.8 V.



(b) Porazdelitev tokov pri napetosti -2.1 V.

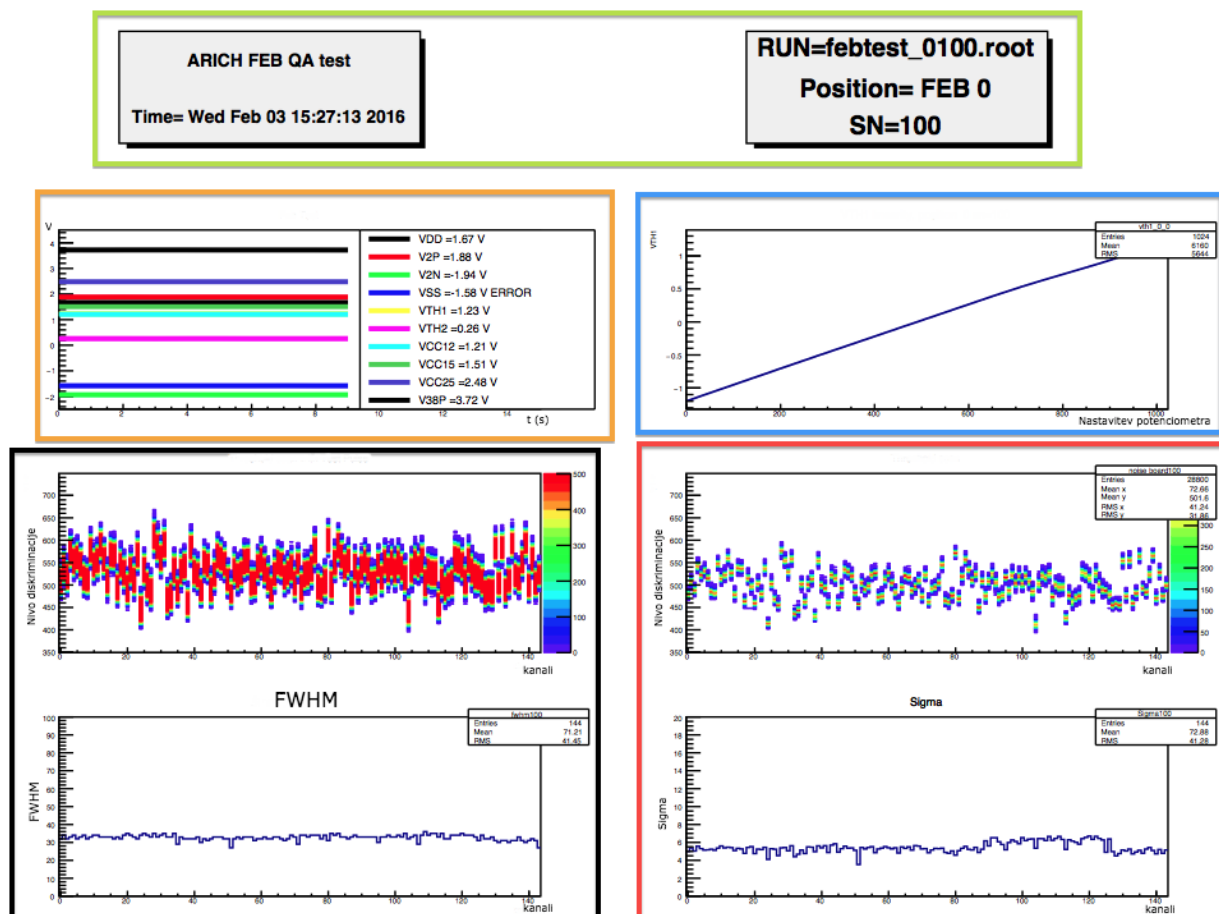


(c) Porazdelitev tokov pri napetosti + 2.0 V.

Slika 5.4: Tokovi pri napajalnih napetostih.

5.2 Analiza testa tiskanih vezij

V drugem delu smo testirali posamezne dele tiskanega vezja in odziv vseh kanalov. Prav tako kot v prvem delu sem tudi tukaj napisal program, ki nam združi vse rezultate v *pdf* formatu. Ta dokument obsega več strani. Prvo stran nam prikazuje Slika 5.5. V zelenem okvirju so podatki, ki nam predstavljajo čas začetka meritve, datoteko, v kateri so shranjeni podatki, položaj tiskanega vezja in njegovo serijsko številko. V oranžnem okvirju so predstavljeni podatki, ki ustrezajo vsem napetostim, ki jih merimo v elektroniki. Na osi x je označen čas, na osi y pa so napetosti. Zraven, v modrem okvirju, je test linearnosti vezja za nivo proženja. Narisani so izmerjeni podatki za napetost proženja V_{th1} od nastavitve digitalnega potenciometra. Spodaj, v črnem okvirju, je prikazan odziv vseh 144 kanalov na testni signal, v rdečem okvirju pa njihov šum. Pri testen signalu sem izračunal še širino odziva za vsak kanal, pri šumu pa širino porazdelitve σ , kar je podrobneje predstavljeno v podpoglavju 5.2.4 in 5.2.5.



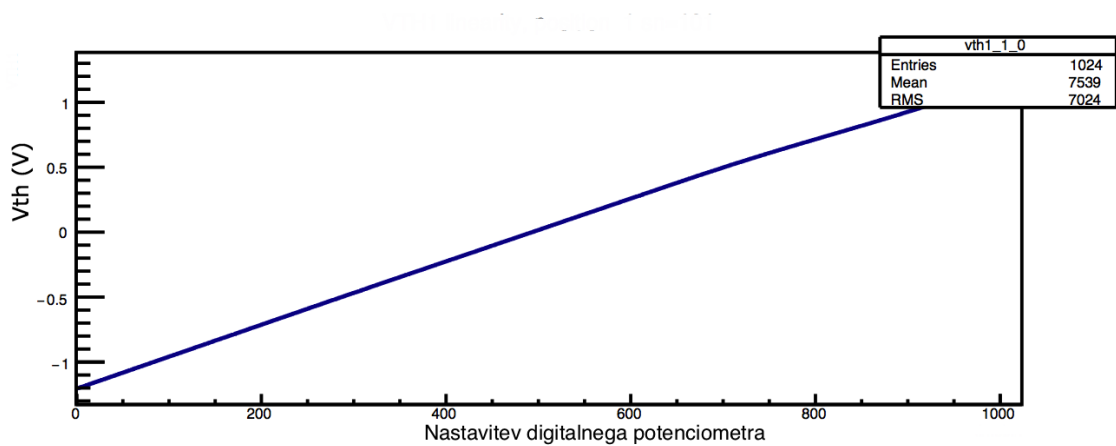
Slika 5.5: Rezultati drugega dela meritev.

5.2.1 Analiza testa linearnosti vezja za nivo proženja

Kot prvi test smo naredili test linearnosti, kjer smo preverili veljavnost enačbe 3.7. Spreminjamo nastavitve digitalnega potenciometra in gledamo, ali je odziv linearen. Razpon napetosti je med -1.25 V in +1.25 V in je razdeljen na 1024 korakov. Odziv

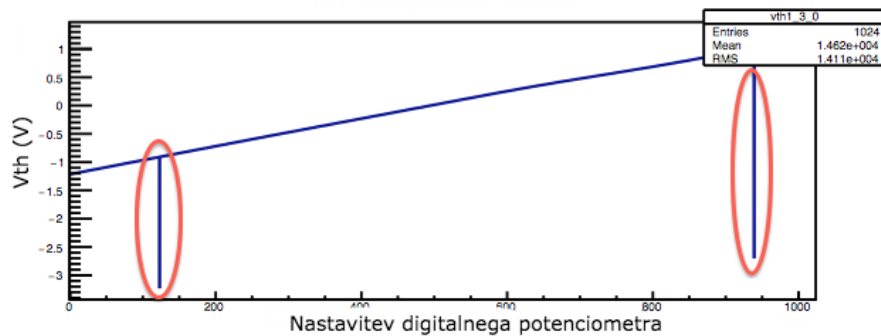
5.2. Analiza testa tiskanih vezij

vezja je prikazan na Sliki 5.6. Vidimo, da se napetost proženja V_{th} linearno spreminja v odvisnosti od nastavitve digitalnega potenciometra in popolnoma sledi enačbi 3.7.

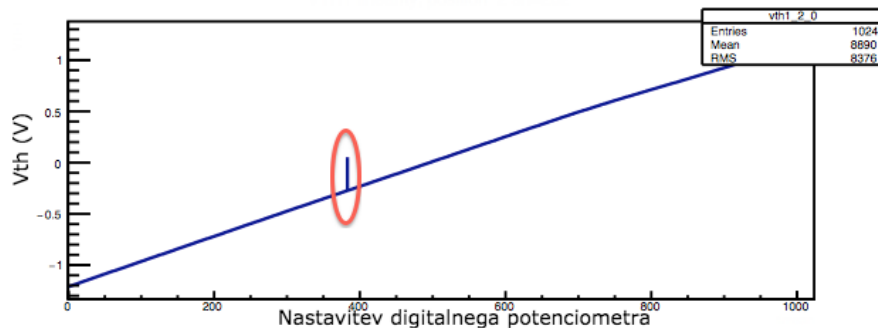


Slika 5.6: Meritev odziva linearnosti vezja za nivo proženja pri tiskanem vezju s serijsko številko 101.

Vendar so se tudi pri tem testu pojavile manjše napake. Pri nekaterih tiskanih vezjih ima ta odvisnost manjši skok, ki ga prikazujejo rdeče elipse na Sliki 5.7. Do



(a) SN=175, run=121



(b) SN=202, run=138

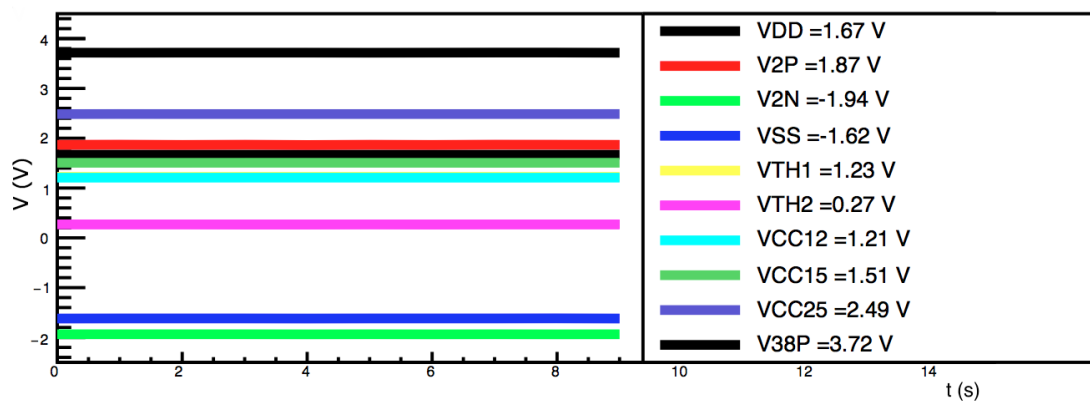
Slika 5.7: Primeri napak pri testu linearnosti.

odstopanj pride zaradi napake pri komunikaciji s tiskanim vezjem. V večini takšnih

primerov sta napačno prebrani le ena oz. dve vrednosti. Vse ostale so pravilne in pri 1024 merilnih točk to skorajda nima nikakršnega vpliva. Ta napaka ima lahko večje posledice med samim eksperimentov, saj bo tam nastavljena fiksna vrednost in še pri tej lahko pride do napake. V našem primeru je prišlo do takšne vrste napak pri 20 tiskanih vezij. To pomeni, da lahko ima 5 % tiskanih vezij probleme pri delovanju.

5.2.2 Analiza napetosti in temperature

V drugem delu meritev smo merili napetosti na elektroniki in temperaturo. Mednje sodijo vse tri napajalne napetosti: +3.8 V, -2.1 V in +2.0 V. Zraven sodijo tudi dve napetosti za nivo proženja V_{th} . Poleg teh merimo še dodatne napetosti, ki so potrebne za delovanje tiskanega vezja. Te so tako negativne kot pozitivne. Dodatne napetosti dobimo iz napajalnih napetosti preko komponent LDO. Shema tega vezja je predstavljena v dodatku B. Na koncu pa iz dveh temperaturnih senzorjev dobimo še podatke o temperaturi. Tipičen primer teh meritev prikazuje Slika 5.8. Merili smo vse te napetosti v odvisnosti od časa in gledali, ali so konstantne. Nato sem vzel zadnjo meritev in narisal porazdelitve za te napetosti.

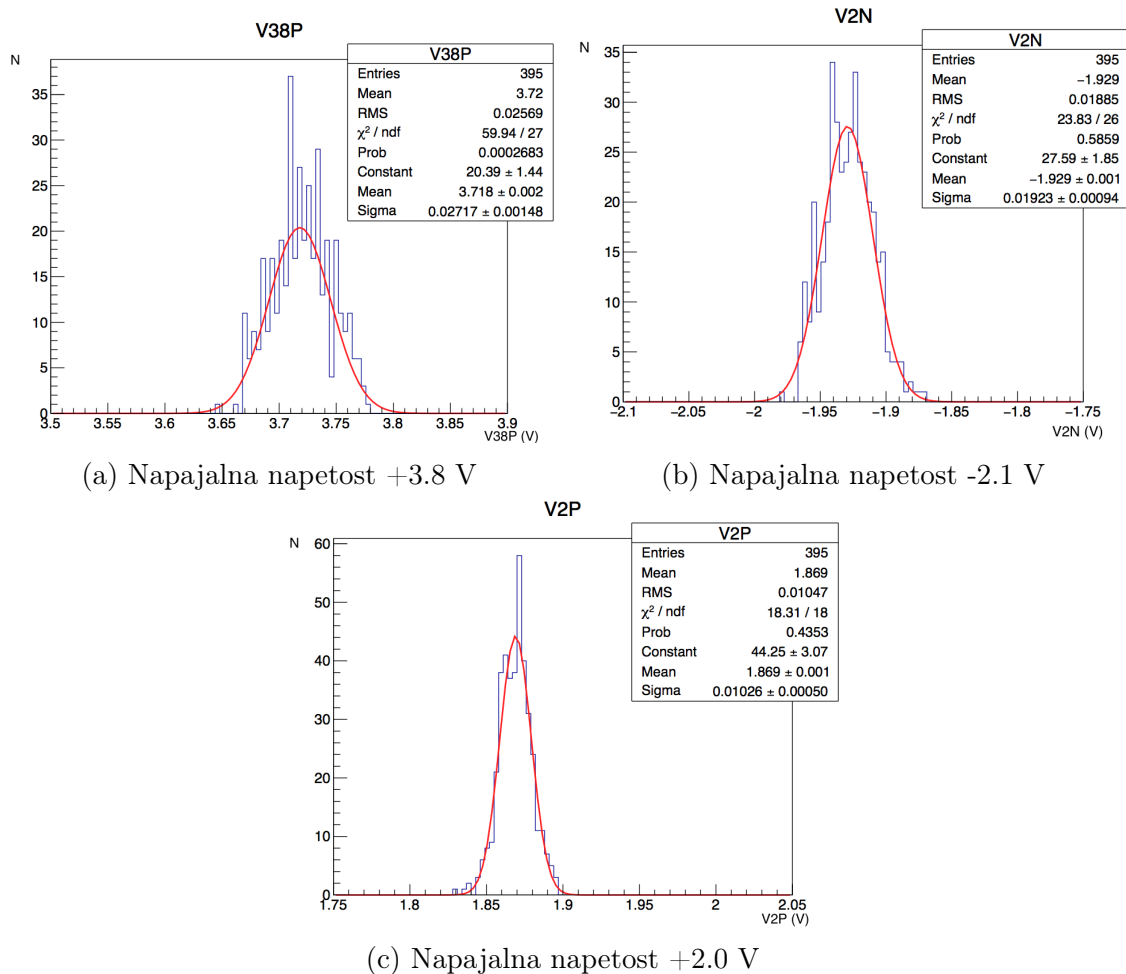


Slika 5.8: Meritev napetosti v odvisnosti od časa pri tiskanem vezju s serijsko številko 116.

Najprej si pogledajmo porazdelitve napajalnih napetosti, ki nam jih prikazuje Slika 5.9a, 5.9b in 5.9c. Te napetosti poznamo, saj smo jih nastavili z napajalnikom. Pri teh meritvah se samo prepričamo, če se vrednosti ujema. Pri napetosti +3.8 V vidimo, da je ujemanje kar dobro, saj je povprečna vrednost + 3.72 V. Sicer je porazdelitev malce širša, vendar še vedno zelo dobro sovпада z našimi podatki. Ena od možnih razlag odstopanj od pravih vrednosti je ta, da prihaja do padca napetosti zaradi notranje upornosti napajalnega kabla. Njegova dolžina od napajalnika do tiskanega vezja znaša približno 1.5 m, debelina žice pa je 0.25 mm. Žica je iz aluminija s specifično upornostjo $\zeta = 0.028 \Omega mm^2/m$. Upornost takšnega kabla izračunamo po enačbi

$$R = \zeta \frac{d}{S}, \quad (5.1)$$

kjer sta d dolžina in S prečni presek žice. Z zgoraj navedenimi podatki je upornost izračunana na 0.86Ω . Če izračunamo padec napetosti po žici pri napetosti +3.8 V, kjer teče tok ~ 0.098 A, znaša ta vrednost ~ 0.084 V. Če to sedaj odštejemo od

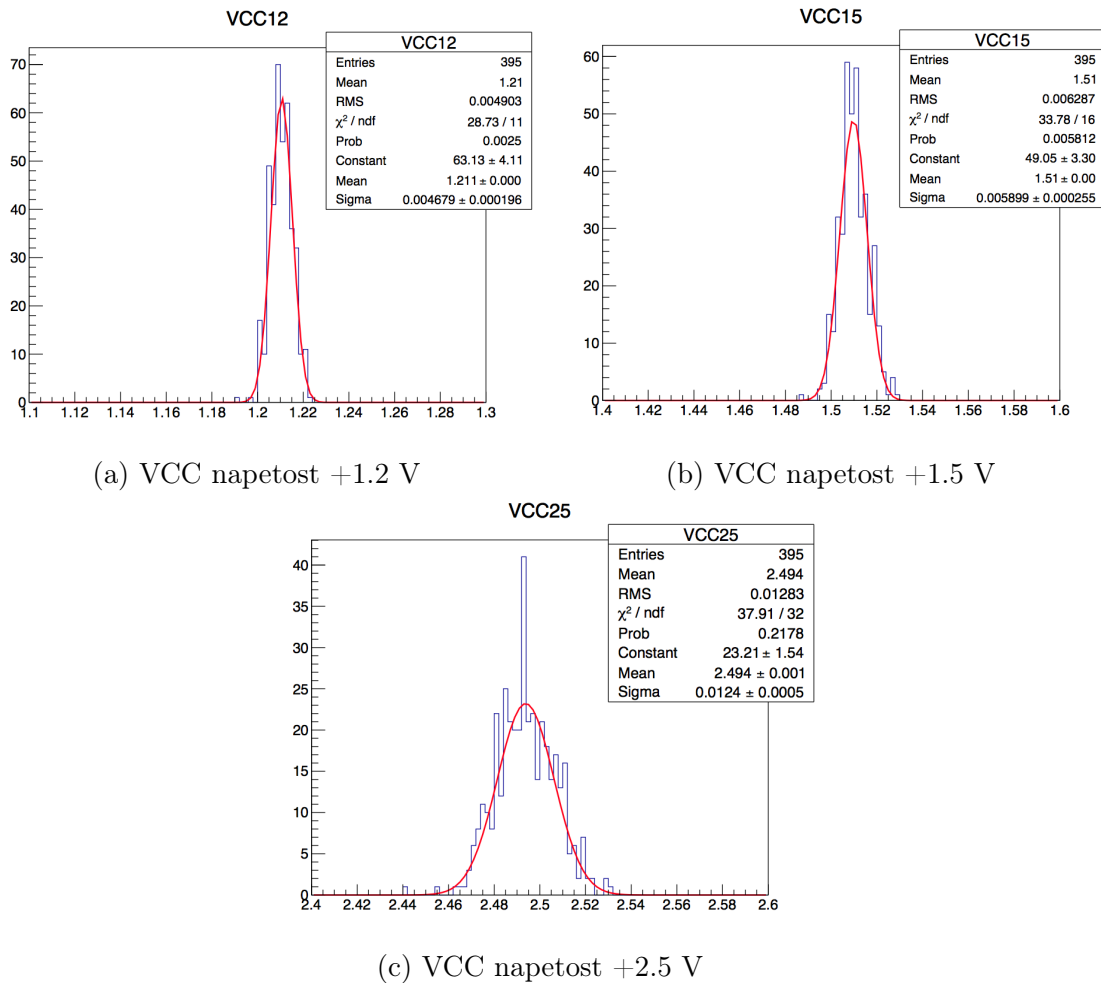


Slika 5.9: Porazdelitve napajalnih napetosti.

napajalne napetosti, dobimo napetost, ki jo izmerimo na elektroniki + 3.716 V, kar je približno 3.72, ki jo kaže naša porazdelitev. Padec napetosti pri napetosti -2.1 V znaša -0.16 V in pri +2.0 V malce manj, in sicer 0.15 V. To pomeni, da bi morali izmeriti negativno napetost -1.94 V in pozitivno napetost +1.85 V, kar se povsem ujema z našimi porazdelitvami. Zaključimo lahko, da je izmerjena napetost na tiskanem vezju manjša zaradi padca napetosti po napajalnih kabljih.

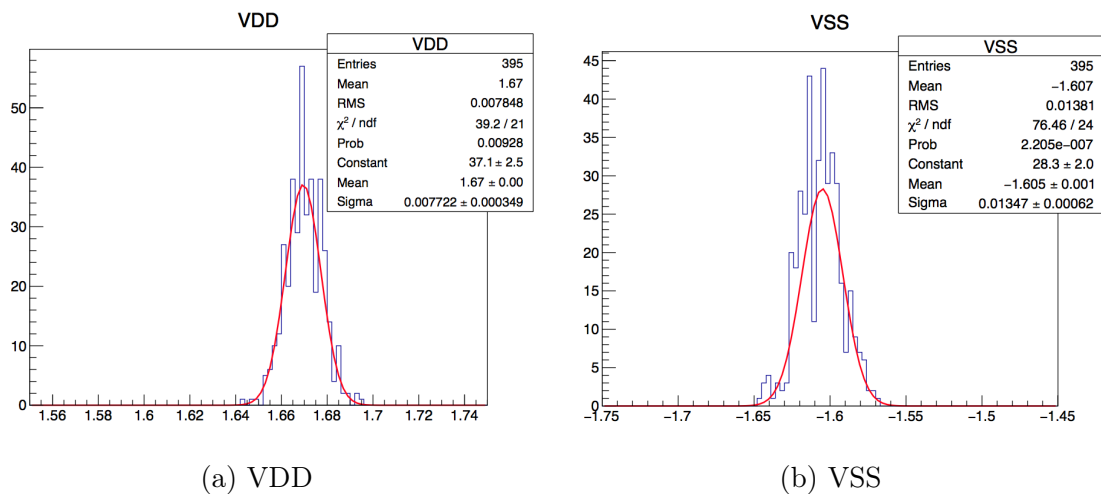
Napajalne napetosti nato preko komponent LDO spremenimo v manjše napetosti, ki jih potrebujemo za brezhibno delovanje elektronike. Uporabljamo jih v vezju za nivo proženja, za testni signal in tudi za delovanje temperaturnih senzorjev. Glavno nalogo pa imajo pri napajanju čipa FPGA. Na Sliki 5.10 so predstavljene porazdelitve za te napetosti, ki jih poimenujemo VCC. Vrednosti teh napetosti morajo znašati +1.2 V, +1.5 V in +2.5 V. Napetosti +1.2 V in +1.5 V dobimo preko dveh komponent LDO iz napajalne napetosti +2.0 V, napetost +2.5 V pa iz tretje komponente LDO in napajalne napetosti +3.8 V. Če zdaj pogledamo rezultate na slikah 5.10a, 5.10b in 5.10c vidimo, da se naši podatki zelo dobro ujemajo s pričakovanimi.

Sliki 5.11a in 5.11b prikazujeta porazdelitvi za napetosti VDD in VSS. Gre za napajalne napetosti za čipe ASIC. Vrednost VDD mora biti +1.65 V, VSS pa -1.65 V. Prav tako kot napetosti VCC tudi ti dve napetosti dobimo preko komponente LDO. VDD iz napajalne napetosti +2.0 V in VSS iz napajalne napetosti -2.1 V. Po-



Slika 5.10: Porazdelitve VCC napetosti.

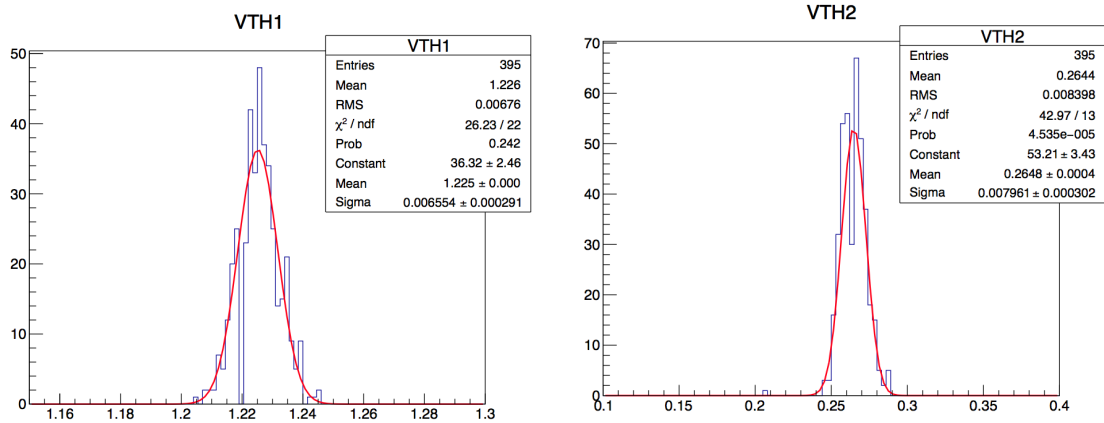
razdelitvi se zelo dobro približata tema vrednostma, le pri VSS je manjše odstopanje, pa še to le za 0.04 V.



Slika 5.11: Porazdelitev VDD (a) in VSS (b) napetosti.

Zadnji dve napetosti pripadata napetostima, ki ju uporabimo za nivo proženja. Njuni porazdelitvi sta predstavljeni na Sliki 5.12a in 5.12b. Uporabljamo samo en

nivo proženja, in sicer VTH2, ki ima nivo proženja okoli 0 V. Spreminjamo ga lahko tako, kot nam prikazuje enačba 3.7. V eksperimentu lahko sicer uporabimo oba nivoja proženja, mi pa smo se odločili, da bomo uporabljali samo enega. Prvi nivo proženja smo nastavili približno na zgornjo mejo, drugega v bližini ničle.

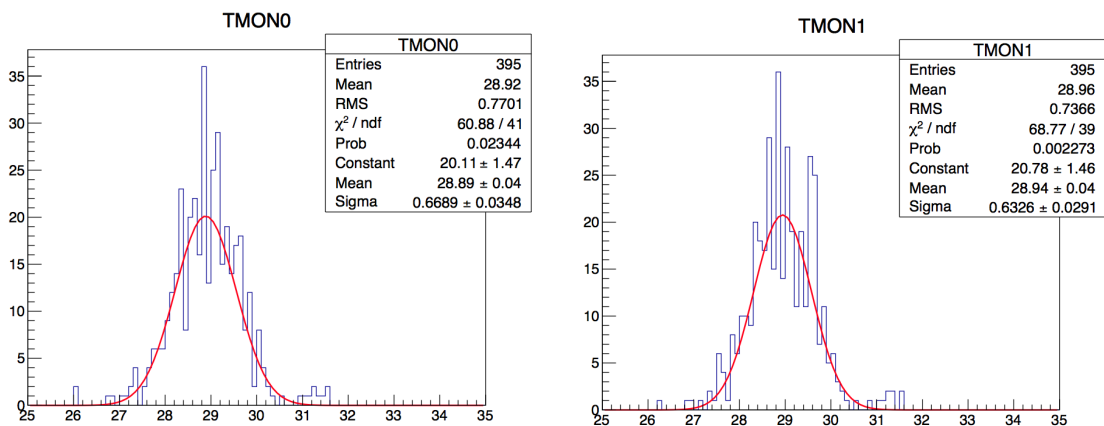


(a) Napetost za nivo proženja 1

(b) Napetost za nivo proženja 2

Slika 5.12: Porazdelitev dveh napetosti za nivo proženja.

Na koncu bom predstavil še porazdelitve za temperaturo. Meritve so potekale več dni, v razmaku dveh mesecev. Ne pričakujemo neke konstantne temperature. Ker imamo tiskano vezje pritrjeno na aluminijasto ohišje, ki dobro odvaža toploto, ne pričakujemo, da se bo pregrevalo. Bistveno v tem primeru je to, da nam oba temperaturna sensorja izmerita enako temperaturo. V našem primeru, ki ga prikazuje Slika 5.13, se temperaturi zelo dobro ujemata, saj je razlika le 0.04 °C. Prav tako vidimo, da so temperature v intervalu med 27 °C in 30 °C, kar je manj od zgornje meje, ki jo ocenjujemo na 60°C. Ko bo tiskano vezje vgrajeno v spektrometer, bo celoten sistem hlajen, da preprečimo pregrevanje.



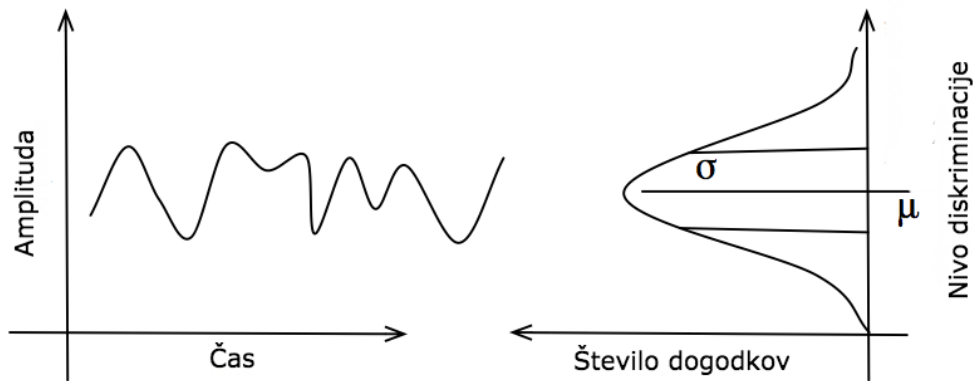
(a) Temperatura zgoraj

(b) Temperatura spodaj

Slika 5.13: Porazdelitev temperature.

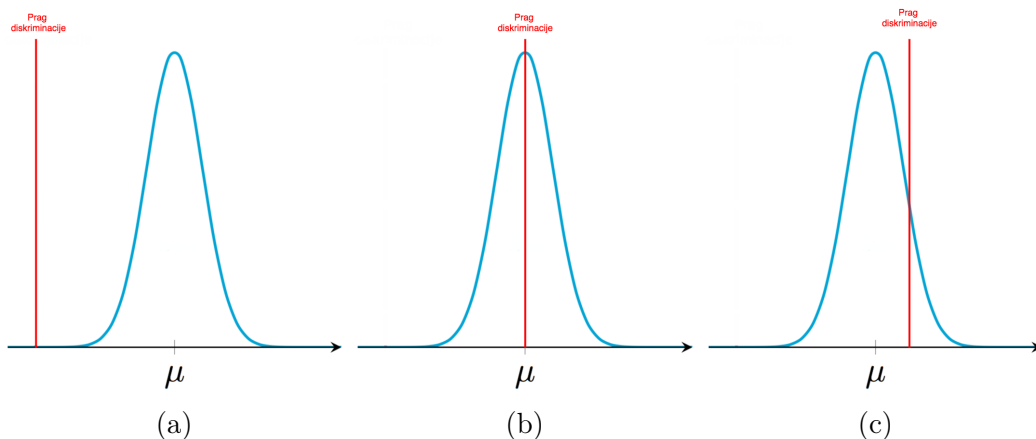
5.2.3 Odziv kanalov

V drugem delu meritev nas je zanimal odziv kanalov in kako šum vpliva na obliko signala. Šum ima normalno porazdelitev okoli srednje vrednosti μ in standardno deviacijo σ , Slika 5.14 (desno). Leva stran slike nam prikazuje signal šuma. Ker se posamezni kanali med seboj razlikujejo, imajo zaradi tega različne srednje vrednosti.



Slika 5.14: Shematski prikaz signala enega kanala (levo) in njegove porazdelitve (desno).

Pri meritvi beležimo število prehodov čez prag diskriminacije. Če je prag diskriminacije daleč stran od srednje vrednosti, ne beležimo nobenih prehodov, Slika 5.15a. Ko pridemo do signala, zabeležimo prve prehode. Maksimalno število prehodov zabeležimo takrat, ko prag diskriminacije in srednja vrednost sovpadata, Slika 5.15b. Ko se oddaljujemo od srednje vrednosti, število dogodkov ponovno prične padati, Slika 5.15c.

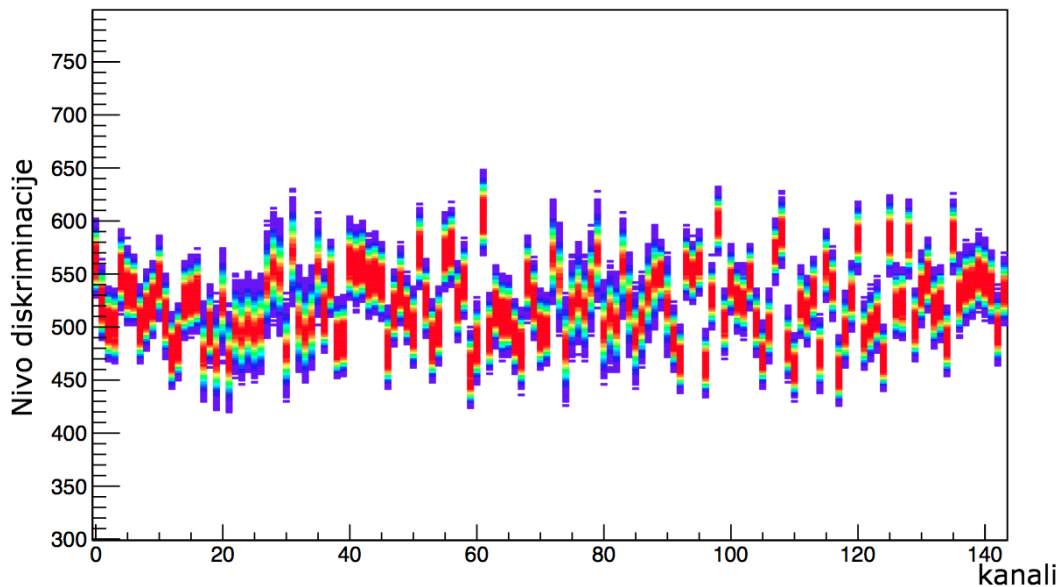


Slika 5.15: Primer beleženja števila dogodkov čez prag diskriminacije.

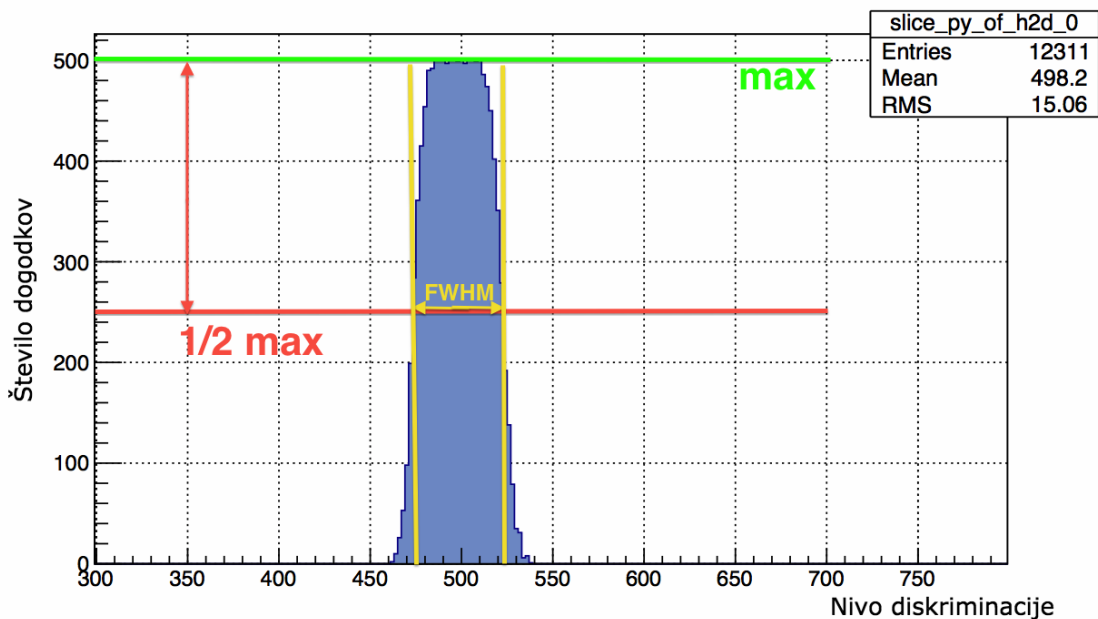
S prilagajanjem Gaussovih funkcij lahko dobimo srednje vrednosti μ in standardne deviacije σ za signal posameznega kanala. Z nastavitvami ustreznih parametrov tiskanega vezja jih lahko zamaknemo na želeno vrednost.

5.2.4 Analiza odziva kanalov na testni signal

S pomočjo testnega signala smo testirali, če so bili stiki med dodatnim tiskanim vezjem in čitalno elektroniko dobri in če vsi kanali delujejo pravilno. Na vhode vseh kanalov smo poslali testni signal. Tipično porazdelitev odziva prikazuje Slika 5.16a. Meritev poteka tako, da za vsak kanala preštejemo število signalov, večjih od praga diskriminacije. Za bolj nazorno predstavitev sem izrisal odziv samo enega izmed 144 kanalov. To nam prikazuje Slika 5.16b. Namen tega testa je bil odkriti nedelujoče



(a)



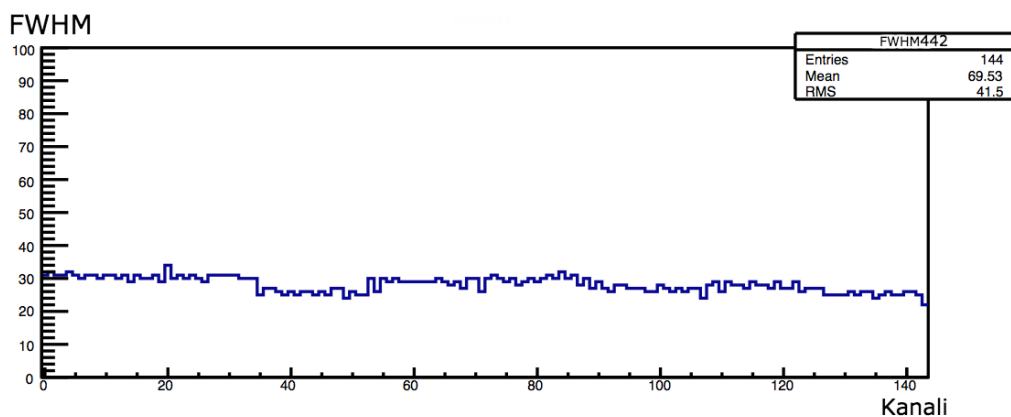
(b)

Slika 5.16: a) Odziv vseh 144 kanalov tiskanega vezja s serijsko številko 442 na testni signal, b) odziv kanala 51 na testni signal in prikaz določevanja parametra FWHM.

kanale oz. kanale, ki delujejo nepravilno in jih poimenujemo *vroči kanali*. To so kanali, ki niso pravilno priključeni na tiskano vezje. Njihov odziv na testni signal ima izrazito obliko, saj ima njihov odziv zelo veliko širino. Da bi ločili delujoče kanale od vročih, sem za vsak kanal določili parameter *FWHM*. To je razdalja med minimalno in maksimalno točko na polovični višini signala. Grafični prikaz določevanja parametra *FWHM* je prikazan na Sliki 5.16b.

V spektrometru bo dodatno tiskano vezje zamenjal konektor za HAPD, ki bo pritrdil fotonski senzor na tiskano vezje. S tem testom bodo ugotovili, če je stik med konektorjem in tiskanim vezjem dober. Če stik ni dober, je parameter *FWHM* majhen.

Nato sem parameter *FWHM* narisal za vse kanale in jih primerjal med sabo, kar nam prikazuje Slika 5.17. Vidimo, da je pri vseh kanalih približno enak, odstopanja



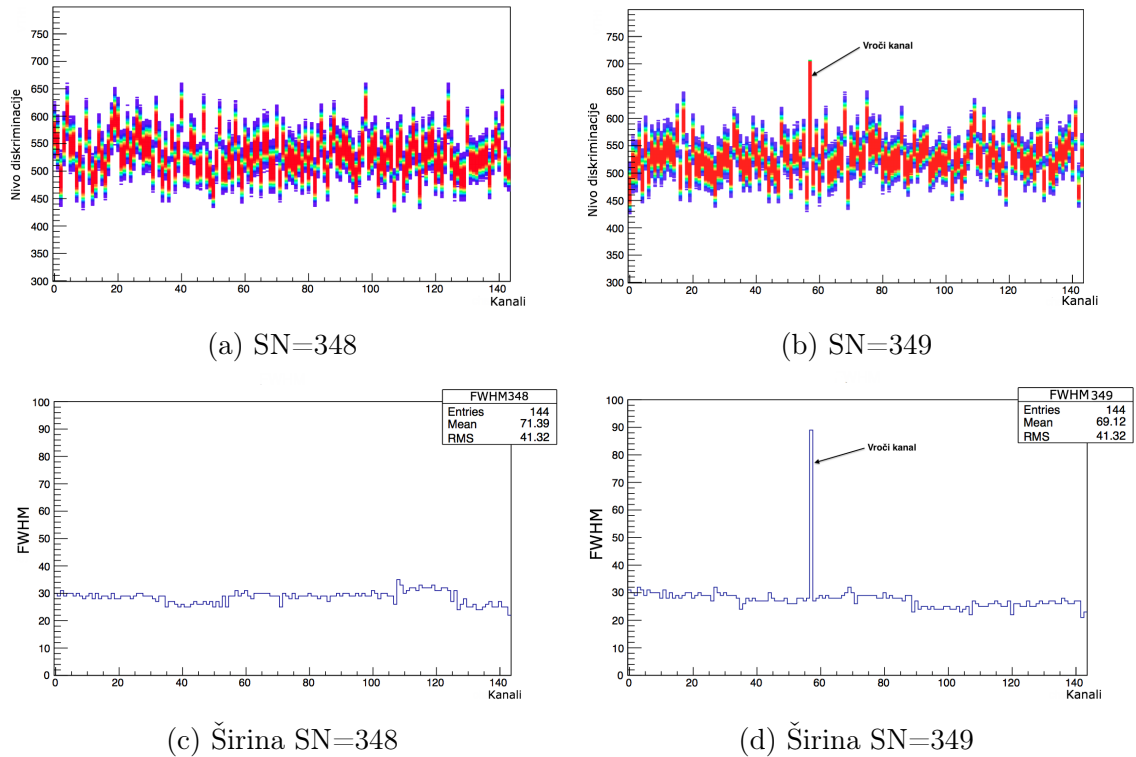
Slika 5.17: Porazdelitev parametra FWHM za vse kanale tiskanega vezja s serijsko številko 442.

so majhna. Kadar so odstopanja velika, to pomeni, da takšno tiskano vezje ni primerno za vgradnjo v spektrometer. Če odstopa 36 kanalov, se je najverjetneje dodatno tiskano vezje snelo, ali pa se je snela žica za ozemljitev. V tem primeru je potrebno zamenjati dodatno tiskano vezje. Če odstopa samo en kanal, je to nedelujoči kanal, ki ga je potrebno popraviti.

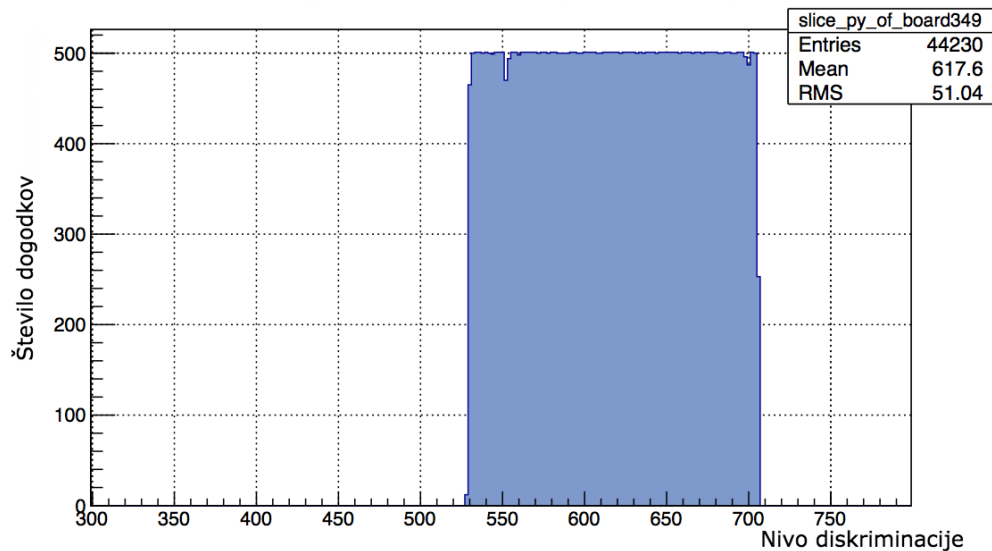
Zdaj naredimo primerjavo dveh tiskanih vezij. Prvo deluje normalno; vsi kanali imajo enak odziv. To bomo primerjali z drugim, pri katerem je eden od kanalov nedelujoč. To nam prikazuje Slika 5.18. Vidimo zelo velik odziv vročega kanala, ki zelo odstopa od povprečja. V programu, ki sem ga napisal, mi je izpisalo pozicijo takega kanala. V našem primeru, pri tiskanem vezju s serijsko številko 349, je tak kanal številka 58. Če se sedaj vrnemo na Sliko 4.4, vidimo, da kanal pripada čipu ASIC 1. Pod mikroskopom smo pregledali stik takšnega kanala in videli, da stika preprosto ni bilo, ali pa je bil zelo slab. Nato smo vzeli spajkalnik in z žico za spajkanje popravili stik. Takšno tiskano vezje smo ponovno testirali, da smo se prepričali o odpravi težave.

Poglejmo si še odziv tega kanala na testni signal, ki nam ga prikazuje Slika 5.19. Vidimo, da je ta dosti večji kot tisti na Sliki 5.16b. Ker kanal ni pravilno priključen, nam daje signal na celotnem intervalu diskriminacije.

S testom smo tudi ugotovili, ali pravilno delujejo vsi čipi ASIC. Preverjali smo, ali so vsi signali enaki. Če ima celoten čip ASIC večji ali manjši signal od ostalih, pomeni okvaro, kar se je bolje videlo pri analizi šuma tiskanega vezja.



Slika 5.18: Primerjava odziva kanalov in porazdelitve parametra FWHM za dva tiskana vezja.



Slika 5.19: Odziv kanala 58 tiskanega vezja s serijsko številko 349 na testni signal.

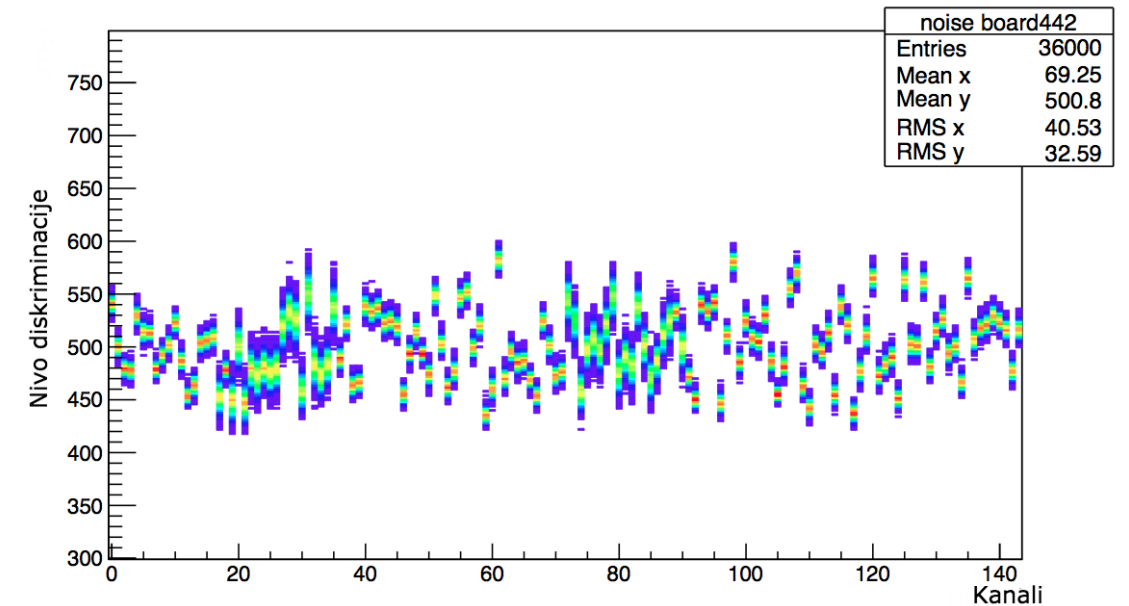
5.2.5 Analiza šuma

Po meritvi s testnim signalom nas je zanimal šum naše elektronike. Meritev šuma tiskanega vezja smo opravili zaradi pravilne nastavitve elektronike in zaradi primerjave z meritvami čipov ASIC. Šum smo izmerili z meritvijo odziva elektronike z naključnim proženjem in spreminjanjem napetosti praga diskriminacije. Spomnimo,

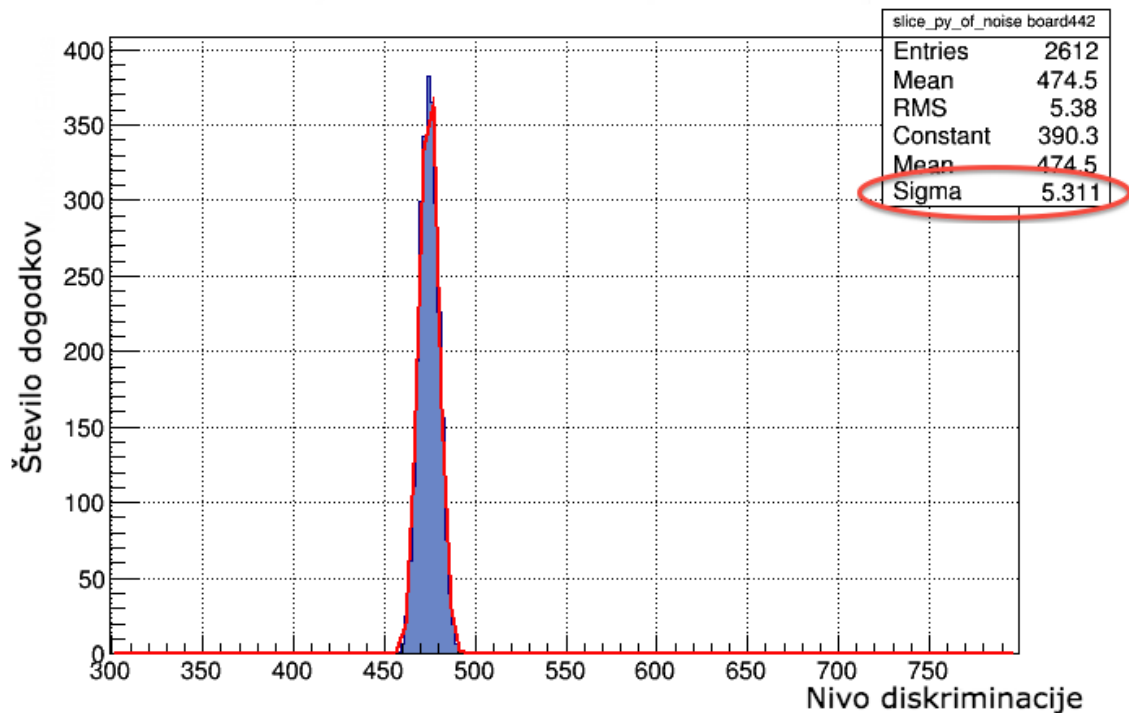
Poglavje 5. Analiza meritev

nivo proženja lahko spreminjamo v intervalu med -1.25 V in $+1.25\text{ V}$.

Za analizo šuma sem izbral nivo proženja malo nad 0 V , ki nam ga prikazuje Slika 5.20. V primeru (a) vidimo porazdelitev šuma vseh 144 kanalov, v (b) pa samo kanala številka 51. Vidimo, da je odziv manjši kot na Sliki 5.16a.



(a)

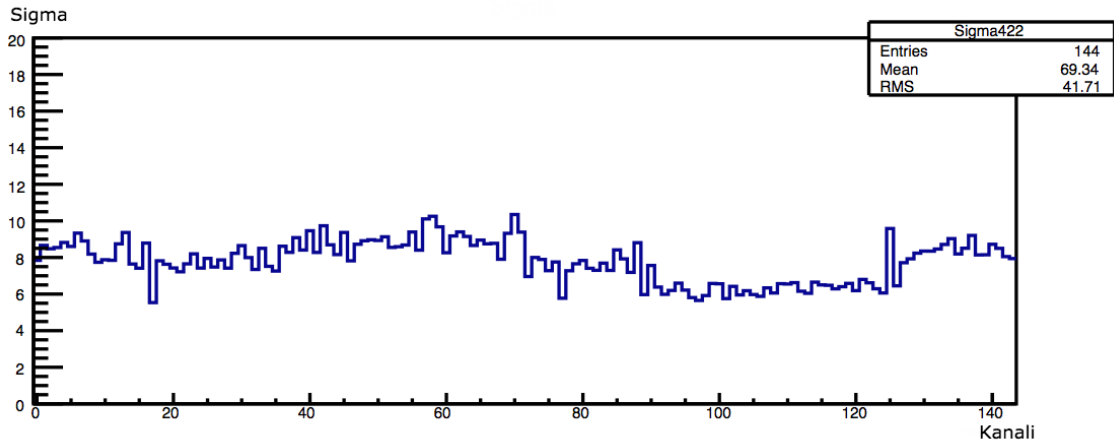


(b)

Slika 5.20: a) Porazdelitev meritve signala elektronskega šuma tiskanega vezja s serijsko številko 442 in b) meritev signala elektronskega šuma kanala 51.

Signalu vsakega kanala priredim Gaussovo krivuljo in iz nje razberem parameter

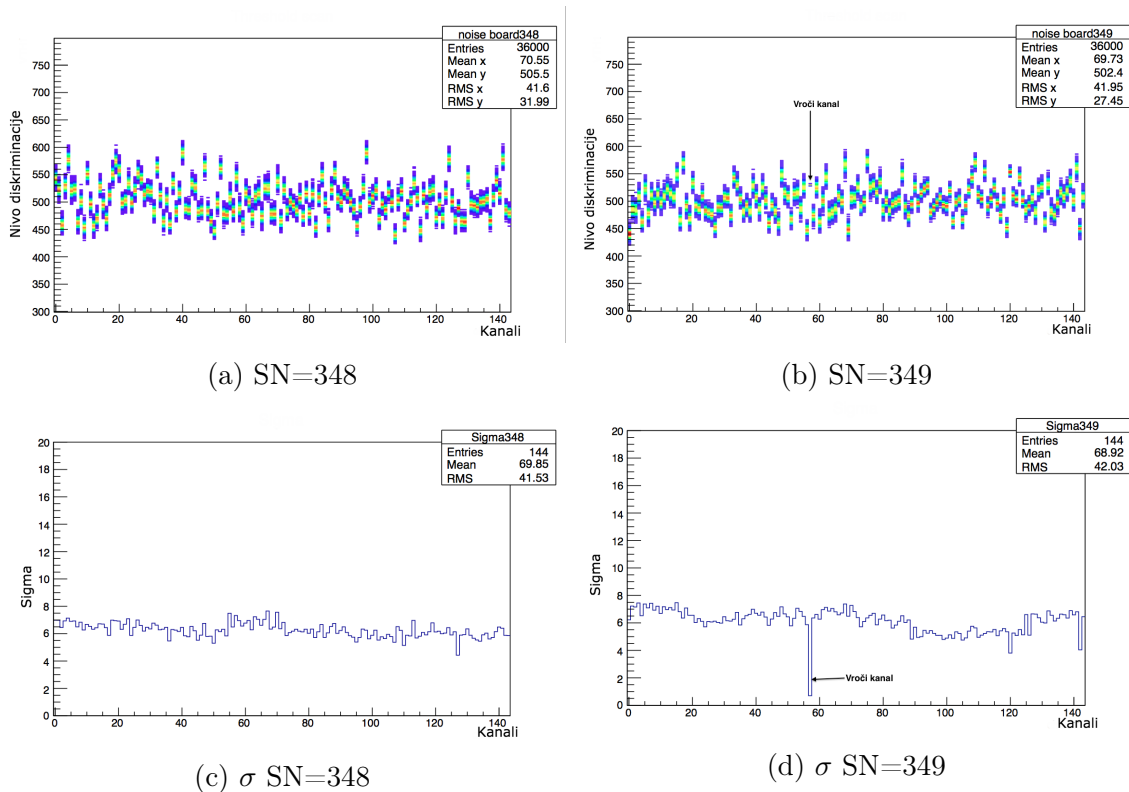
σ , ki je prikazan na Sliki 5.20b. Nato narišem porazdelitev σ za vsak kanal tiskanega vezja. Ta je prikazana na Sliki 5.21. Nekateri kanali malce bolj šumiyo, drugi spet



Slika 5.21: Porazdelitev parametra σ za vse kanale tiskanega vezja s serijsko številko 442.

manj. To se v primeru testnega signala dosti manj pozna. Iz primerjave med parametroma *sigma* pri šumu in *širine* pri testnem signalu lahko vidimo, da je odziv kanala na testni signal približno trikrat večji.

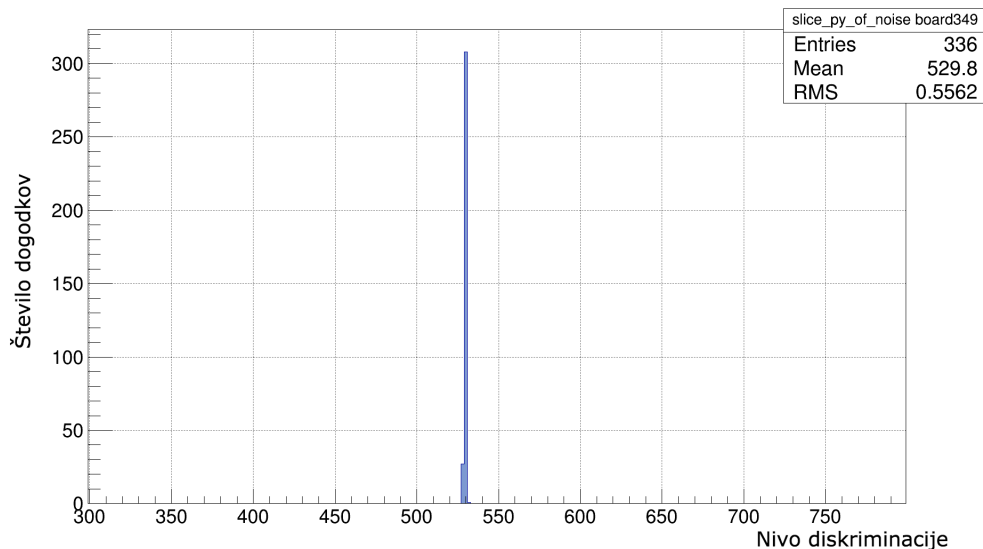
Podobno kot pri testnem signalu naredimo zdaj primerjavo med tiskanimi vezjema s serijskima številka 348 in 349. Spomnimo, tiskano vezje s serijsko številko



Slika 5.22: Primerjava šuma kanalov in porazdelitve σ za dve čitalni elektroni.

349 ima vroči kanal številka 58. Rekli smo, da pri takšnem kanalu ni povezave med priključnim kontaktom in tiskanem vezjem. Signal šuma se še dodatno ojača na dodatnem tiskanem vezju. Ker pa je v tem primeru slaba povezava, lahko pričakujemo, da bo signal elektronskega šuma takšnega kanala majhen, kar nam potrjuje Slika 5.22d.

Sedaj si še podrobno pogledimo porazdelitev za kanal 58, ki nam ga prikazuje Slika 5.23. Vidimo, da je signal zaradi elektronskega šuma majhen. Mi si sicer želimo majhen elektronski šum, ampak je v tem primeru to posledica tega, ker kanal ni bil pravilno priključen.



Slika 5.23: Šum kanala 58 pri čitalni elektroniki s serjsko številko 349.

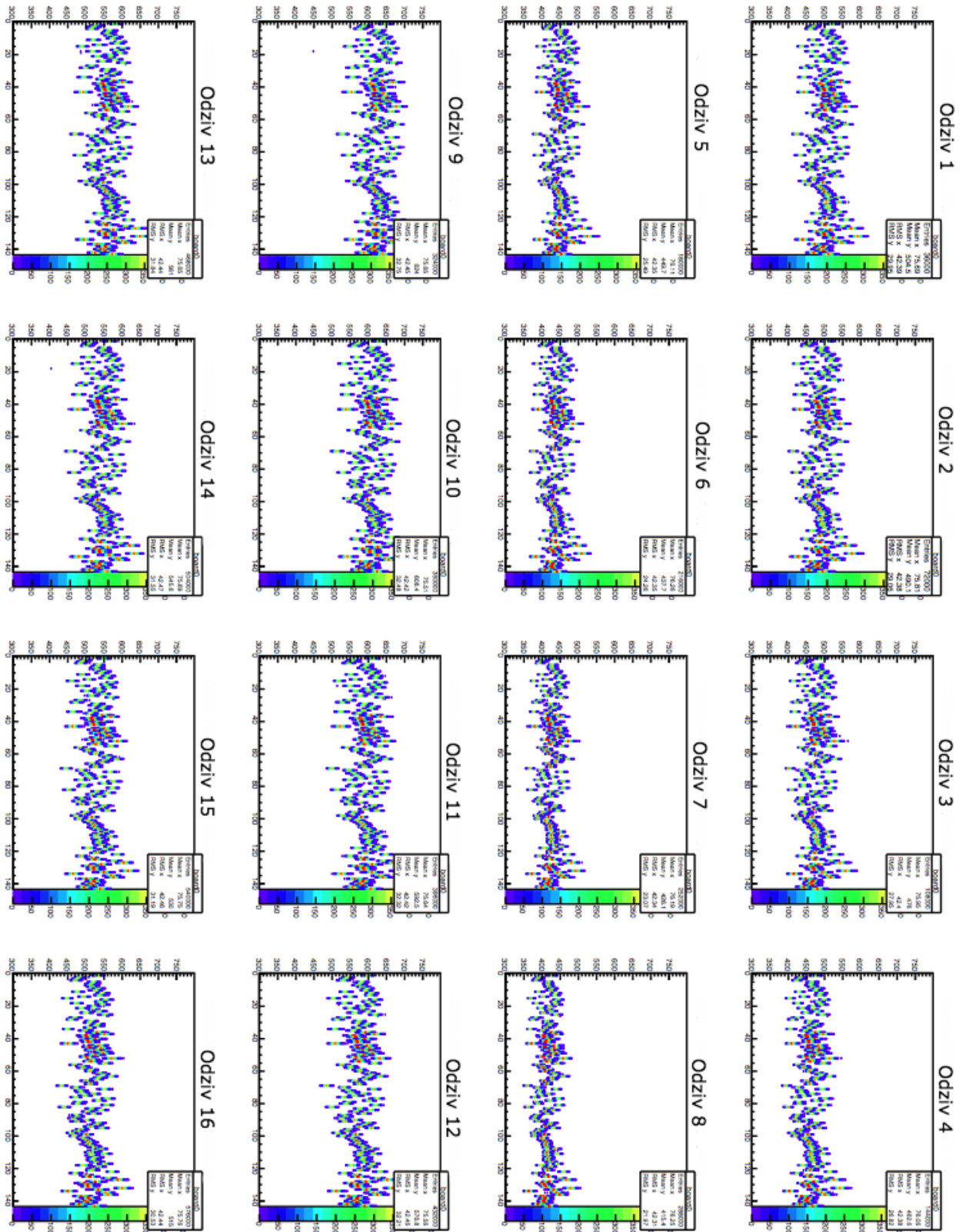
Če se sedaj vrnemo na Sliko 5.20a, lahko vidimo, da nekateri kanali malce bolj šumijo. Točno se vidi, da je polovica kanalov čipov ASIC 0 in ASIC 2 šumečih. To je posledica tega, da je dodatno tiskano vezje že obrabljeno in ga je potrebno zamenjati. V primeru, da bi bili vsi kanali kateregakoli od čipov ASIC šumeči, bi to pomenilo, da je napaka na čipu in ne na dodatnem tiskanem vezju.

5.2.6 Odziv kanalov na spreminjanje odmika od nivoja proženja

Najdaljši del in hkrati zadnji del je bila meritev, kjer smo spreminjali odmik od nivoja proženja in merili signal elektronskega šuma. Nivo proženja je za vse kanale enak, dodatno pa lahko spreminjamo odmik od nivoja za vsak kanal posebej. Zanimalo nas je, kako se srednja vrednost spreminja v odvisnosti od odmika. Izvedli smo dve meritvi. Pri prvi smo spreminjali vrednost registrov za grobo nastavitvev odmikov (Tabela 3.3), pri drugi pa registrov za fino nastavitvev. Za vsako meritev smo v 4-bitne registre vseh kanalov zapisali enako vrednost. Korak pri grobi nastavitvi je bil 40 mV, pri fini pa 4 mV. Vseh 16 meritev za grobo nastavitvev odmika je predstavljeno na Sliki 5.24, za fino nastavitvev odmika pa na Sliki 5.25. Odzivi si sledijo po vrsti, kot je označeno z naslovom vsakega grafa.

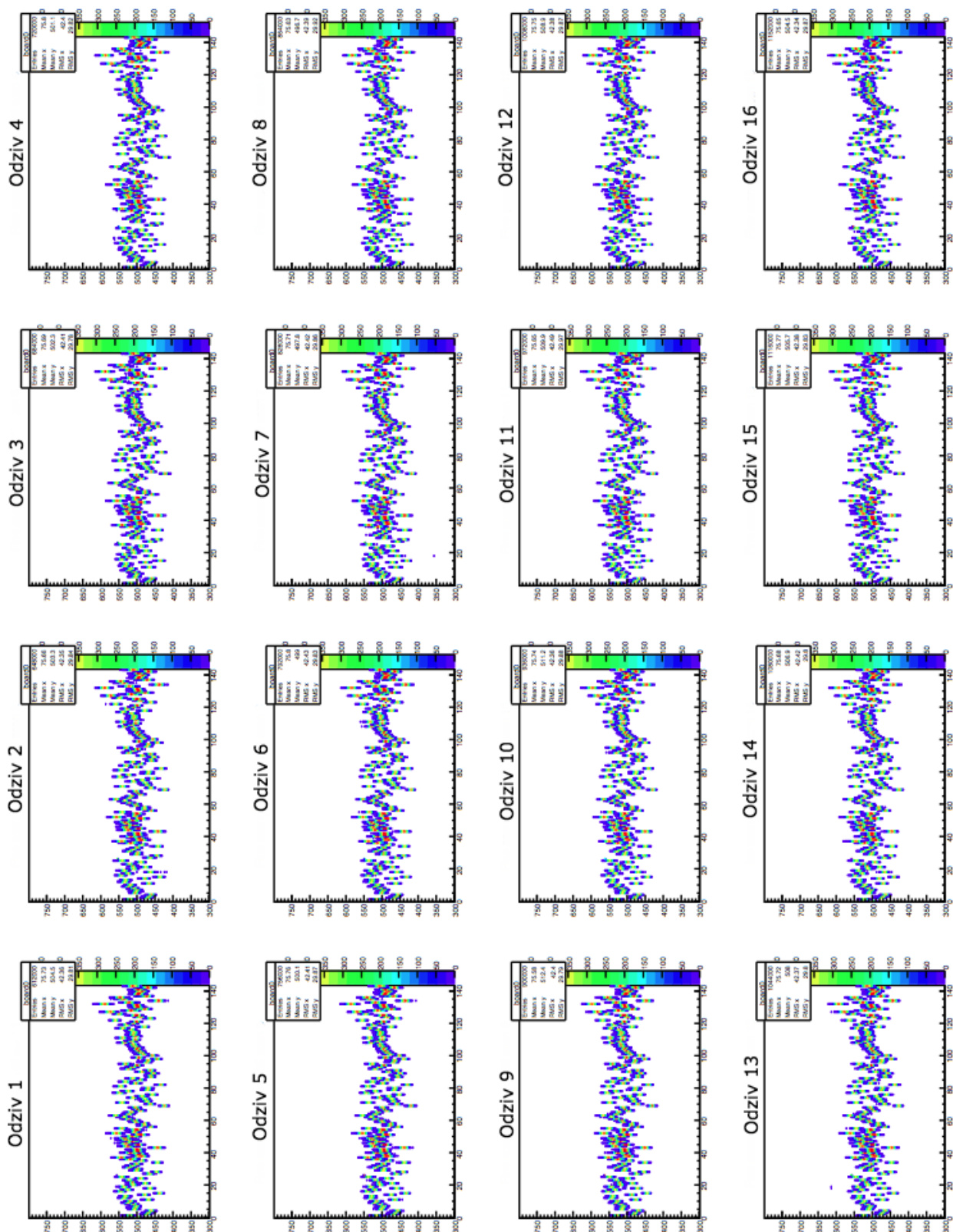
S programom, ki sem ga napisal, sem za vsak odmik prebral srednjo vrednost za vsak kanal. Teh vrednosti je bilo 16 za grobo in 16 za fino nastavitvev. Ker

5.2. Analiza testa tiskanih vezij



Slika 5.24: Odziv kanalov na grobo nastavitvev parametra odmika nivoja proženja

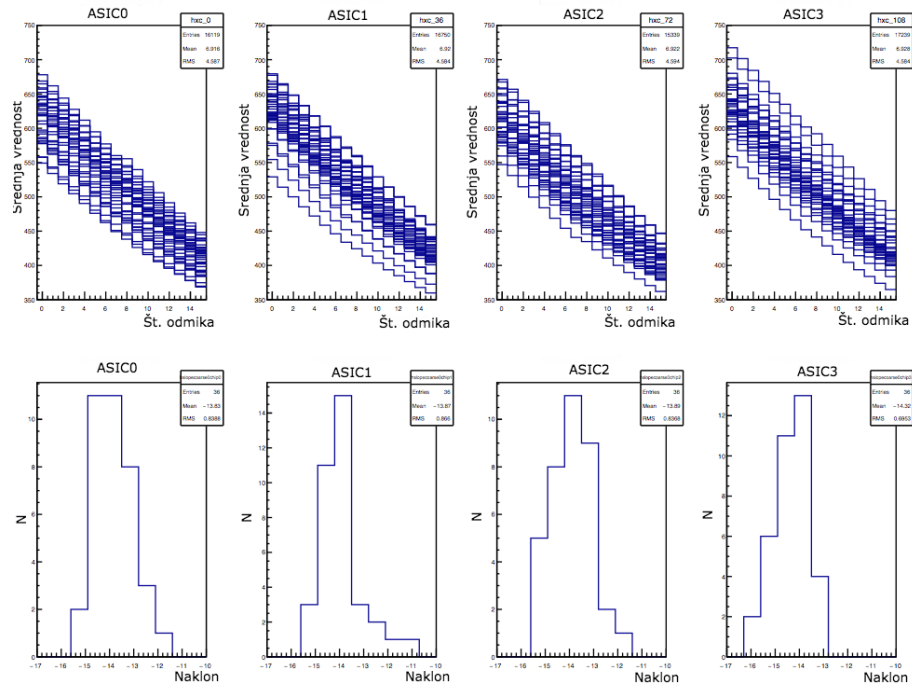
odmik od nivoja proženja spreminjamo linearno, pričakujemo da se bodo tudi srednje vrednosti kanalov spreminjale linearno. Da bi se prepričali, sem narisal odvisnost srednje vrednosti kanala od odmika nivoja proženja. Kanale sem združil po čipih



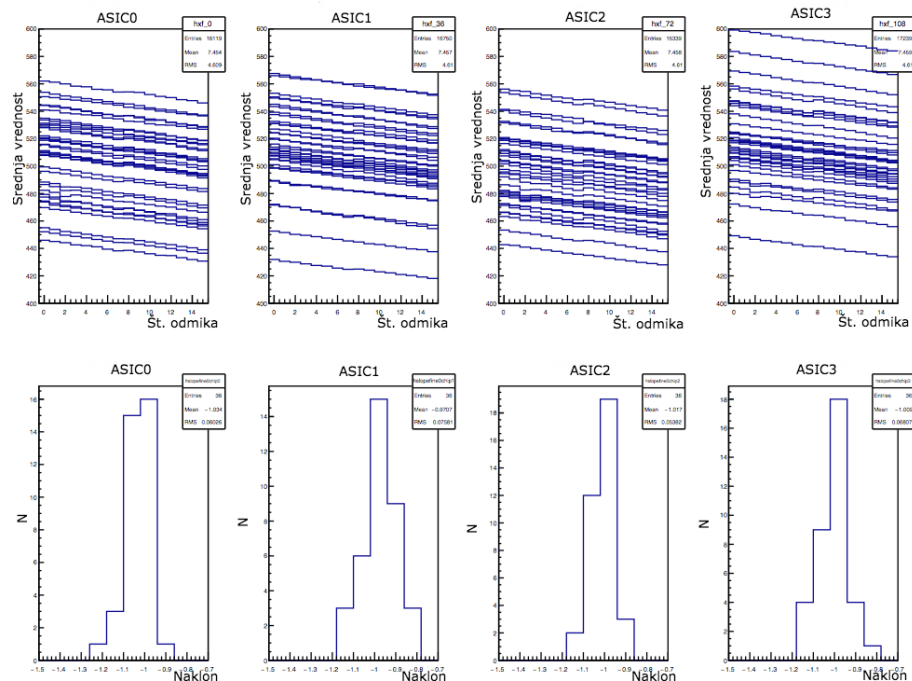
Slika 5.25: Odziv kanalov na fino nastavitvev parametra odmika nivoja proženja.

ASIC, torej po 36 kanalov skupaj. Za vsak kanal sem narisal srednjo vrednost od maksimalne vrednosti do minimalne.

Najprej si pogledjmo spreminjanje parametra za grobo nastavitvev. Odvisnost srednje vrednosti kanala od nivoja proženja prikazuje Slika 5.26a zgoraj. Iz grafov



(a) Odvisnost srednje vrednosti kanala od grobe nastavitve odmika nivoja proženja (zgoraj) in porazdelitev naklona srednje vrednosti (spodaj).



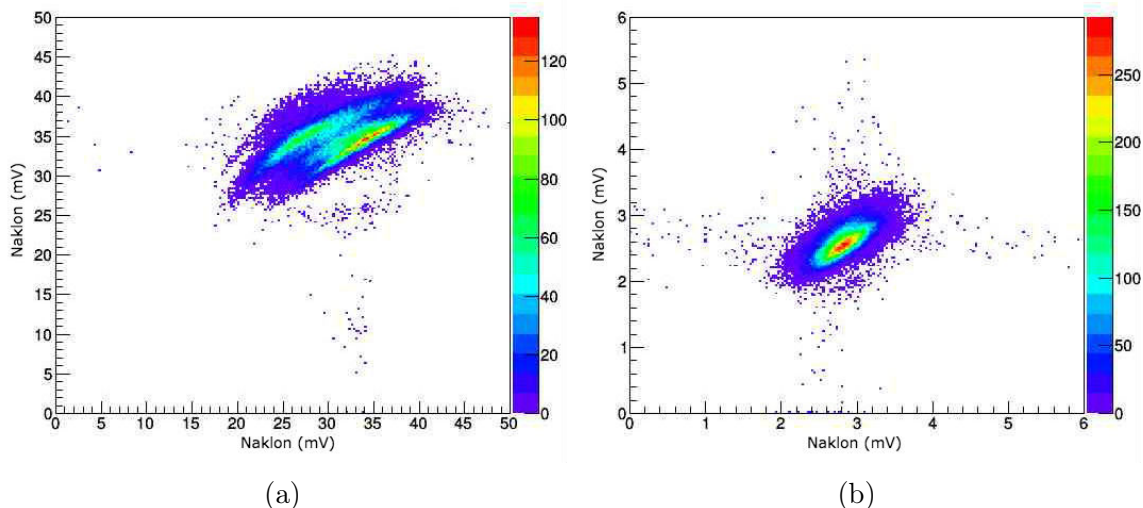
(b) Odvisnost srednje vrednosti kanala od fine nastavitve odmika nivoja proženja (zgoraj) in porazdelitev naklona srednje vrednosti (spodaj).

Slika 5.26: Odvisnost srednje vrednosti kanalov od odmika nivoja proženja in porazdelitev naklonov.

se vidi, da je ta odvisnost približno linearna, zato sem za vsak kanal priredil linearno

funkcijo, ki se prilega točkam srednje vrednosti. Iz te funkcije sem odčital naklon in nato narisal porazdelitev naklonov za vsak kanal, kar prikazuje Slika 5.26a spodaj. Naklon od vsakega kanala sem zapisal tudi v *xml* datoteko, ker sem ga potreboval še za nadaljnjo analizo. Povsem enako sem storil pri fini nastavitvi, ki nam jo prikazuje Slika 5.26b. Iz slik vidimo, da pri grobi nastavitvi odmika odvisnost srednje vrednosti ni povsem linearna. Zaradi tega je tudi porazdelitev naklonov malce širša. Pri tej nastavitvi pride tudi do večje variacije naklonov med samimi čipi ASIC, tako da za grobo nastavitvev ne moramo vzeti skupnega naklona za vse kanale. Na manjšem območju je odziv vezja linearen. Tudi tukaj ugotovimo, da prihaja do prevelike variacije naklonov, zato ne moremo uporabiti enega naklona za vse kanale.

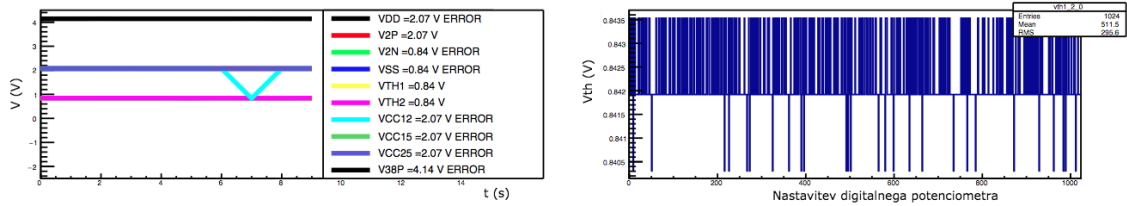
Omenil sem že, da so vse čipe ASIC predhodno izmerili na inštitutu KEK na Japonskem. Poglejmo si sedaj korelacijo naklonov za grobo in fino nastavitvev odmika. Slika 5.27a prikazuje korelacijo za grobo nastavitvev. Na osi x so nanesen podatki japonskih meritev, na osi y pa naših. Vidimo lahko, da prihaja do odstopanj pri nekaterih kanalih. Do dveh pasov v grobi korelaciji pride zaradi uporabe več merilnih postaj za uporabo čipov. Ta korelacija ni tako dobra kot korelacija naklonov za fino nastavitvev, ki jo prikazuje Slika 5.27b. Težava pri slednji je ta, da tu odstopa več kanalov od povprečne vrednosti; tako pri japonskih meritvah kot pri naših.



Slika 5.27: Korelacija naklonov iz meritev čipov in iz meritev tiskanih vezij za (a) grobo in (b) fino nastavitvev odmika od nivoja proženja. Na osi x so podatki meritev čipov, ki so jih izvedli na Japonskem, na osi y pa so naše meritve.

5.2.7 Primeri napak

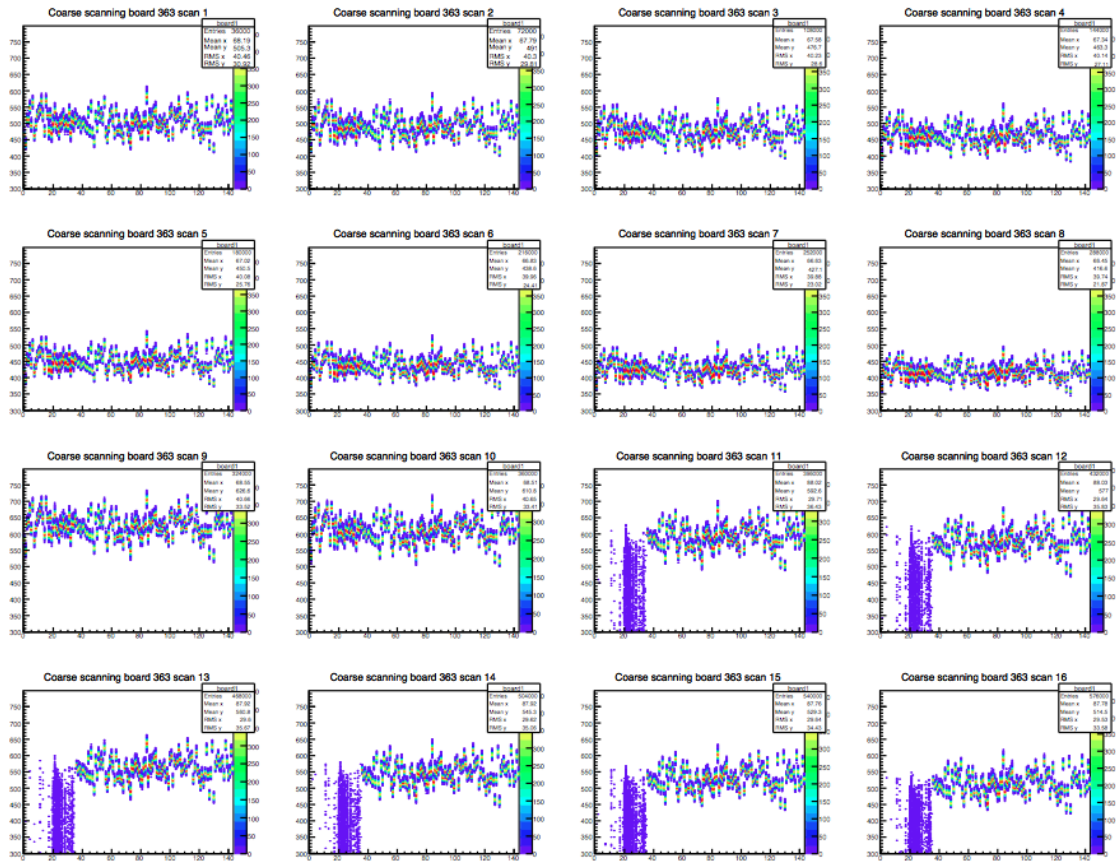
Do napak je v tem delu meritev prišlo la v dveh primerih. V prvem primeru je prišlo do napake na komponenti ADC. Ta ni bila dobro prispajkana na tiskano vezje in ni delovala pravilno. Posledica tega je bila ta, da nismo mogli pravilno prebrati napetosti, zato je bil test linearnosti povsem napačen. To se je zgodilo s tiskanim vezjem s serijsko številko 433, ki nam jo prikazuje Slika 5.28. Vidimo lahko, da nekatere napetosti, kot so napajalna napetost $+2.0$ V in obe napetosti za nivo proženja V_{th} , sicer prebere pravilno, vendar jih je večina narobe. Takšno tiskano vezje ni primerno za vgradnjo v spektrometer, zato smo jo poslali na popravilo, kjer



Slika 5.28: Primer napake na tiskanem vezju s serijsko številko 433.

so zamenjali ADC. Nato smo jo še enkrat izmerili in pri ponovni meritvi ni prišlo do napak.

Drugi napaki je botrovala slaba povezava med čipom ASIC in tiskanim vezjem. Med meritvijo je prišlo do napake na enem od čipov ASIC. To nam prikazuje Slika 5.29. Vidimo, da je pri meritvi št. 11 prišlo do odpovedi čipa ASIC0. To tiskano vezje smo poslali na popravilo. Kasneje, ko smo ga testirali še enkrat, je deloval brez težav.



Slika 5.29: Primer napake na tiskanem vezju s serijsko številko 363.

Poglavje 6

Zaključek

V eksperimentu Belle II, ki ga sestavljata pospeševalnik SuperKEKB in spektrometer Belle II, so se odločili za študijo redkih procesov pri razpadih mezonov B, D in leptonov τ . Pri tej študiji je ključnega pomena identifikacija delcev. Celoten spektrometer je sestavljen iz več sistemov. Eden izmed njih je ARICH. Njegova glavna naloga je ločevanje med kaoni in pioni. Sestavljajo ga sevalec iz aerogela, prazen prostor za razširjanje obročev, fotonski detektor HAPD in čitalna elektronika. Ta mora ustrezati kar nekaj zahtevam, preden jo lahko vgradimo v spektrometer. Zavzemati mora malo prostora, saj moramo celoten detektor ARICH spraviti v majhen prostor med osrednjo potovalno komoro in elektromagnetnim kalorimetrom. Delovati mora v močnem magnetnem polju in ojačati šibek signal iz ftonskega detektorja, ki mora biti sposoben detekcije posameznih fotonov.

Moja naloga je bila, da po izdelavi testiram vseh 420 tiskanih vezij, ki bodo vgrajena v spektrometer. Sodeloval sem pri sestavi merilne aparature. Napisal sem dva programa za analizo podatkov, ki s pomočjo programa *ROOT* obdelata podatke in jih predstavita v elektronskih dokumentih *pdf* in *xml*. Napravili smo več meritev. Prvi test je vseboval analizo tokov skozi čitalno elektroniko. Drugi je bil obsežnejši, saj je vseboval več testov, kot so test linearnosti vezja za nivo proženja, meritve vseh napetosti, ki jih potrebujemo za delovanje tiskanega vezja, odziv kanalov na testni signal, merjenje nivoja šuma in odziv kanalov na spreminjanje nivoja proženja. V kolikor je prišlo do napake, jo je program za analizo podatkov javil, da smo jo lahko nato popravili in takšno tiskano vezje ponovno testirali.

Najprej smo čitalno elektroniko testirali skupaj s HAPD-jem. Že po nekaj meritvah smo ugotovili, da zaradi krhkosti ftonskega detektorja ne bomo uspeli zmeriti vseh 400 elektronik. Naredili smo dodatna tiskana vezja, ki so posnemala delovanje ftonskega detektorja in nam omogočila lažje opravljanje. Rokovanje z njimi je bilo lažje in meritve so bile hitrejše.

Testiranje je potekalo v dveh delih. V prvem smo merili tokove, ki tečejo skozi elektroniko, v drugem delu pa smo merili napetosti, odziv vezja za nivo proženja, odziv kanalov na testni signal in meritve šuma za vse kanale. Iz analize podatkov se vidi, da je večina tiskanih vezij delovala brezhibno. Le nekaj je bilo takšnih, ki so imeli nedelujoči kanal, ki smo ga lahko takoj popravili. Pri nekaterih pa so bile težave večje. Med te spadajo nedelovanje čipa FPGA, zaradi česar takšne elektronike sploh nismo mogli testirati. Enkrat se je zgodilo, da ni delovala komponenta ADC. Prav tako se nam je enkrat zgodilo, da je med testiranjem prenehal delovati čip ASIC. Takšna tiskana vezja smo vrnili proizvajalcu v popravilo.

Na podlagi analize podatkov lahko zaključimo, da tiskana vezja delujejo in so sposobna delovanja v detektorju ARICH eksperimenta Belle II. Skozi elektroniko tečejo zelene napetosti in tokovi. Znamo meriti vitalne znake elektronike, kot je npr. temperatura. Vsi kanali se pravilno odzivajo na testni signal, ki je podoben signalu iz fotonskega detektorja. Signal zaradi elektronskega šuma na kanalu je znotraj pričakovanih vrednosti in ga je mogoče ločiti od signala fotona. Ta testirana tiskana vezja bodo vgrajena v spektrometer Belle II na Japonskem.

Literatura

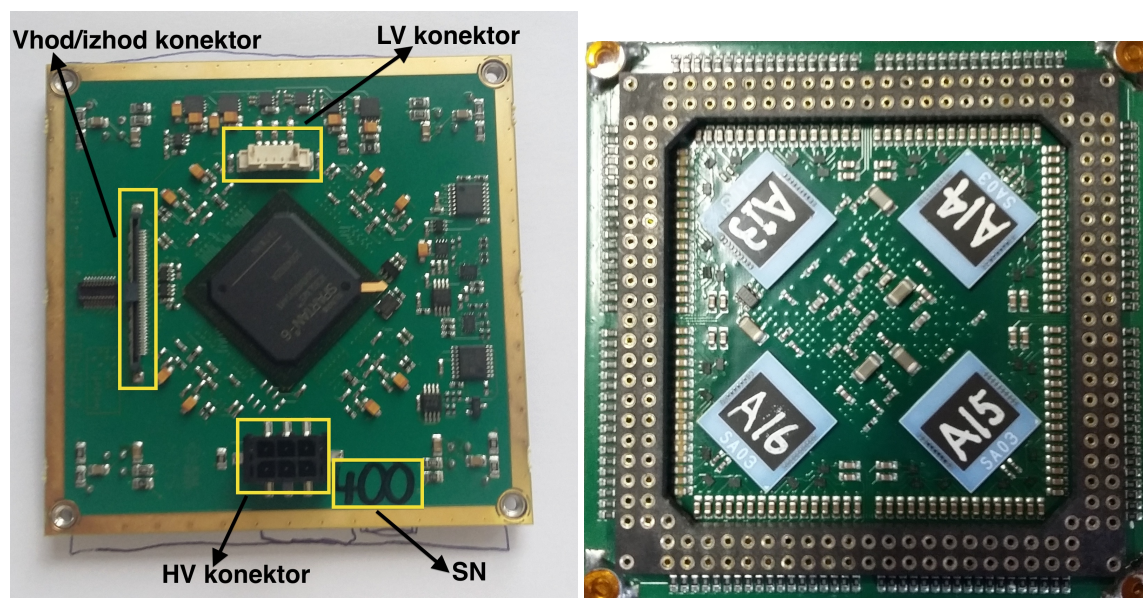
- [1] *Standard Model*, [ogled 20. 1. 2016], dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model.
- [2] *The Nobel Prize in Physics 2008*, [ogled 7. 6. 2016], dostopno na: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/.
- [3] T. Abe, et al. *Belle II Technical Design Report*, Tsukuba, 2010
- [4] J.W. Flanagan in Y. Ohnishi, (2004), *Letter of Intent for KEK Super B Factory, Part III: Accelerator Design*, [ogled 7. 6. 2016], dostopno na: http://superb.kek.jp/documents/loi/img/LoI_accelerator.pdf.
- [5] A. Seljak, *Proximity focusing RICH with aerogel as radiator*, doktorska disertacija, 2013, Ljubljana.
- [6] K. Olive et al., *SUMMARY TABLES OF PARTICLE PROPERTIES*, Chin. Phys. C38, 090001 (2014), stran 149.
- [7] Slika povzeta po: <http://belle2.kek.jp>.
- [8] *Pavel Cherenkov*, [ogled 20. 1. 2016], dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Pavel_Cherenkov.
- [9] *Cherenkov radiation*, [ogled 20. 1. 2016], dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_radiation.
- [10] C. Grupen in B. Shwartz, *Particle detector*, Cambridge University Press, Cambridge, 2008.
- [11] Podgornik, R., Vilfan, A. (2012) *Elektromagnetno polje*; DMFA-založništvo, Ljubljana; str.: 210 - 212.
- [12] Jelley, J.V., *Cerenkov radiation and its applications*, 1955, Br. J. Appl. Phys. 6 227.
- [13] Week, W., *Particle Identification*, predavanja, [ogled 15.5.2016], dostopno na: https://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/physics/staff/academic/gershon/gradteaching/warwickweek/material/detectors/Warwick_week_Pid_Lecture_2011_pdf.
- [14] M. Predikaka, *Karakterizacija modulov za detektor obročev Čerenkova pri spektrometru Belle II*, 2015, magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko.

- [15] M. Tabata, et al. *Development of transparent silica aerogel over a wide range of densities*, Nucl. Instr. and Meth. A 623 (2010) 339, DOI: 10.1016/j.nima.2010.02.241.
- [16] *Aerogel*, [ogled 20.4.2016], dostopno na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aerogel>.
- [17] S. Korpar in P. Križan, *Photodetectors in Particle Physics Experiments*, Review in Advance, Nucl. Part. Sci. 2013. 63:329–49, 2013.
- [18] S. Shiizuka, et al. *Study of 144-channel Hybrid Avalanche Photo-Detector for Belle II RICH Counter*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 639 (2011) 103–106, 2010.
- [19] A. Seljak, et al. *Readout electronics for an HAPD detector*, Journal of Instrumentation, Volume 6, Aachen, IOP Publishing Ltd and SISSA, 2011, DOI:10.1088/1748-0221/6/01/C01083, str.: 1-6.
- [20] *Field programmable gate array (FPGA)*, [ogled 3. 6. 2016], dostopno na: <http://www.xilinx.com/training/fpga/fpga-field-programmable-gate-array.htm>.
- [21] *Spartan-6 XC6SLX45*, [ogled 30. 6. 2016], dostopno na: <http://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/spartan-6.html#productTable>.
- [22] *VMEbus*, [ogled 10.6.2016], dostopno na: <https://en.wikipedia.org/wiki/VMEbus>.
- [23] *Technical Information Manual Mod. V262*, [ogled 10. 6. 2016], dostopno na: http://www.tunl.duke.edu/documents/public/electronics/CAEN/caen_v262.pdf.
- [24] *Platform Cable USB II*, [ogled 10. 6. 2016], dostopno na: <http://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/hw-usb-ii-g.html#overview>.
- [25] *N1470*, [ogled 10. 6. 2016], dostopno na: <http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?parent=21&idmod=599>.
- [26] *PW-A Series- Multi-output Regulated DC Power Supply*, [ogled 10. 6. 2016], dostopno na: http://www.texio.co.jp/en/03prod_01_01_0101.html.
- [27] *LabWindowsTM/CVI*, [ogled 10. 6. 2016], dostopno na: <http://www.ni.com/lwcv/>.
- [28] R. Brun, F. Rademakers in S. Panacek, *ROOT, AN OBJECT ORIENTED DATA ANALYSIS FRAMEWORK*, [ogled 19. 6. 2016], dostopno na: <https://cds.cern.ch/record/491486/files/p11.pdf>.

Dodatek A

Protokol meritev

V tem dodatku bom predstavil potek meritev čitalne elektronike. Ko sem čitalno elektroniko prejel iz proizvodnje, sem najprej zapisal serijsko številko SN, kot prikazuje Slika A.1a. Nato sem tiskano vezje obrnil in popisal čipe ASIC, Slika A.1b.



(a) Zadnja stran čitalne elektronike.

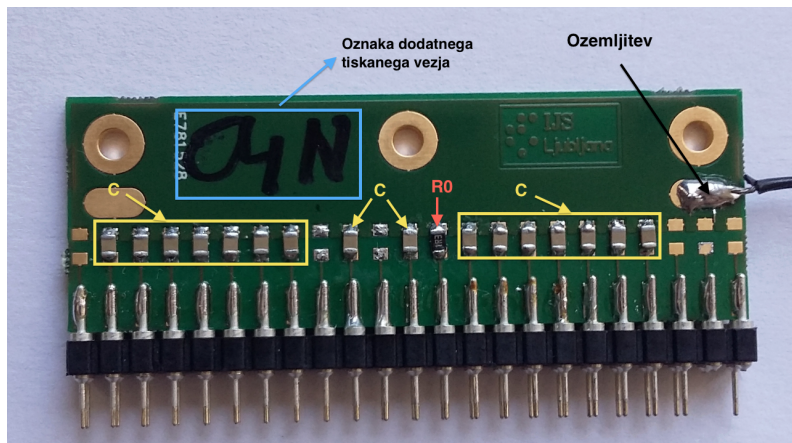
(b) Sprednja stran čitalne elektronike.

Slika A.1: Priprava na meritve. Vsaki čitalni elektroniki sem določil serijsko številko in popisal čipe ASIC.

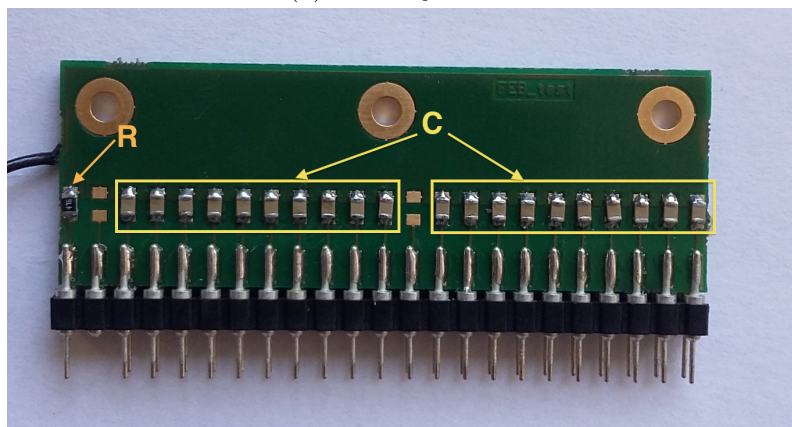
Sledi prva meritve. Tiskano vezje najprej pričvrstim v eksperimentalni škatli na ploščo, kjer so pozicije FEB0, FEB1, FEB2 in FEB3. V eksperimentalni dnevnik zapišem pozicijo, kamor sem pričvrstil čitalno elektroniko, datum in čas začetka meritve. Priključim konektorje za visoko in nizko napetost ter vhod/izhod konektor za čip FPGA, Slika A.1a. Obrnem ploščo in na sprednji strani na čitalno elektroniko pritrdim dodatna tiskana vezja, Slika A.2. Zaprem eksperimentalno škatlo in pričnem s prvo meritvijo.

Protokol prve meritve:

1. Najprej vpišemo serijske številke čitalne elektronike v okenca, ki so označena pod številko 1 na Sliki A.3. Pozicije so označene s FEB0, FEB1, FEB2 in



(a) Notranja stran



(b) Zunanja stran

Slika A.2: Dodatno tiskano vezje, ki smo ga uporabili za testiranje čitalne elektronike.

FEB3 in sovpadajo s pozicijami čitalnih elektronik v zabojniku.

2. Nato preverimo nastavitve za visoko napetost, kar je označeno pod številko 2. Tukaj imamo podatke, kolikšna je napetost in tok ter gumb, ki nam omogoča vklop in izklop napajalnika.
3. Pod številko 3 imamo nastavitve za napajalnik nizke napetosti. Postopek je enak kot pri številki 2.
4. Ko smo zadovoljni z nastavitvami, stisnemo gumb *Start Test*, ki je označen pod številko 4. To nam požene našo meritev. Program je napisan tako, da najprej začne meritev z visoko napetostjo in nato z nizko.
5. Pod številko 5 so prikazani grafi, ki predstavljajo tok pri visoki napetosti. Ta se meri 9 s za vsako posamezno elektroniko. Iz Slike A.3 se vidi, da se v tem času tok popolnoma ustali.
6. Po končani prvi meritvi program izklopi napajalnik za visoko in priključi napajalnik za nizko napetost. Postopek je enak kot pod točko 5, le da tukaj merimo 14 s.

- Pri številki 7 nam program izpiše serijsko številko čipa FPGA.
- Ko končamo z meritvijo, stisnemo gumb *Prepare for Operation*. To nam pripele napetost na vse štiri čitalne elektronike hkrati. Prej smo posebej vklapljali in izklapljali za vsako posamezno elektroniko. Sedaj pa želimo imeti priključene vse štiri hkrati, ker se bomo lotili drugega dela meritev.

Po končani meritvi zapišem številko meritve, ki je označena na Sliki A.3 kot *Run Number*. Za analizo podatkov moramo poiskati datoteko s to številko in narediti analizo.

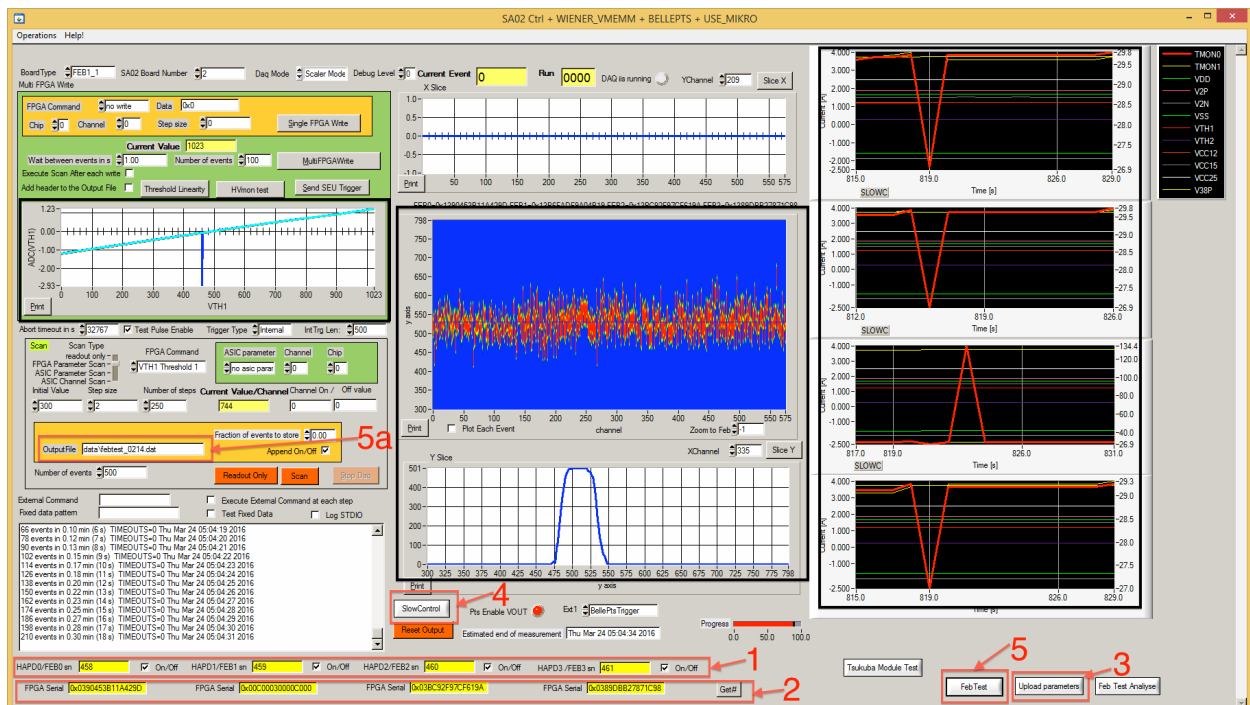


Slika A.3: Grafični vmesnik programa ARICH Feb Test.

Protokol druge meritve:

- Podobno kot v prvem programu najprej vpišemo serijske številke čitalne elektronike v prostor, ki je označen pod številko 1, Slika A.4.
- Pod številko 2 s pritiskom na gumb *Get#* preberemo serijske številke čipov FPGA. Najprej preverimo, ali se ujemajo s tistimi, ki smo jih dobili s prvem programom. V primeru da se ne, je to prvi pokazatelj, da nekaj ni v redu z elektroniko.

3. S pritiskom na gumb *Upload Parameter* naložimo izbrane parametre na čip FPGA. Nekaj teh parametrov je predstavljeno v Tabeli 3.2 in 3.3. Počakamo nekaj sekund, da se naložijo. V primeru da parametrov ne moremo naložiti, nam program javi napako. Takšno čitalno elektroniko moramo odstraniti in dodatno pregledati.
4. Preden začnemo z meritvijo, stisnemo gumb *SlowControl* pod številko 4. Ta nam izpiše vse vrednosti za napetosti in temperaturo. Tako se lahko prepričamo, ali so ti parametri znotraj sprejemljivih vrednosti. V primeru da niso, takšna elektronika ne bo delovala pravilno.
5. Ko smo se prepričali, da vse deluje pravilno, lahko začnemo z meritvijo. To naredimo s pritiskom na gumb *Feb Test* pod številko 5. Datoteka, v katero se bodo izpisovali podatki, je označena pod 5a.



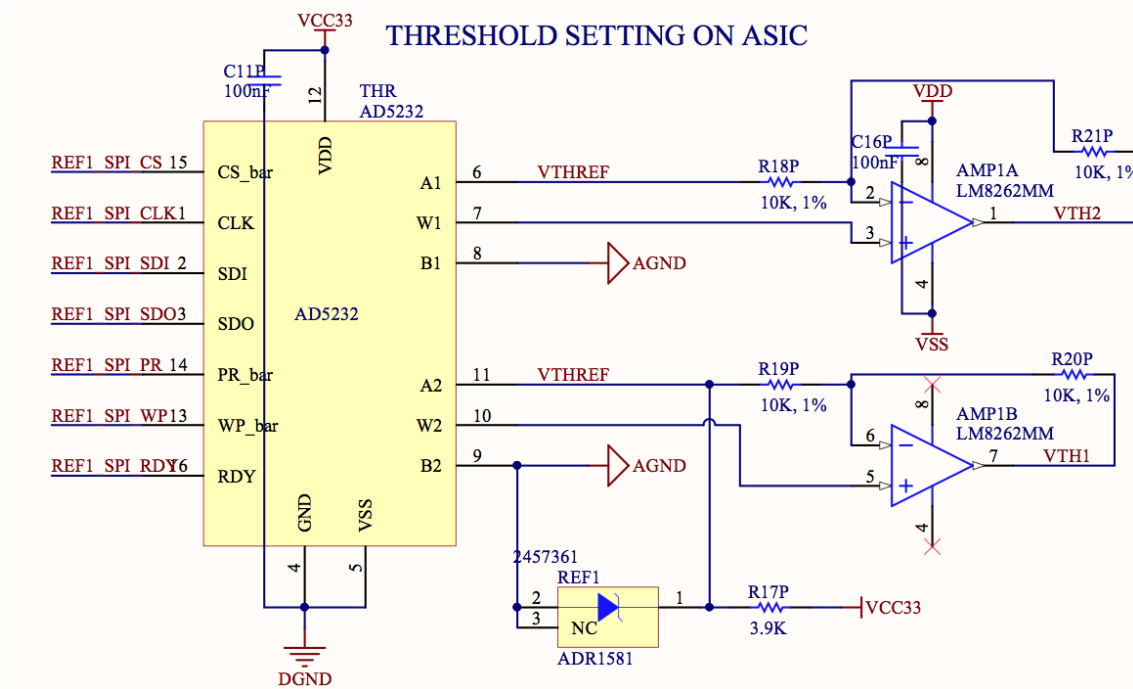
Slika A.4: Grafični vmesnik programa Sa02_daq.

Po končani meritvi, tako kot v prvem primeru, zapišemo številko meritve in datoteko, kamor so se podatki shranili, Slika A.4 okence 5a.

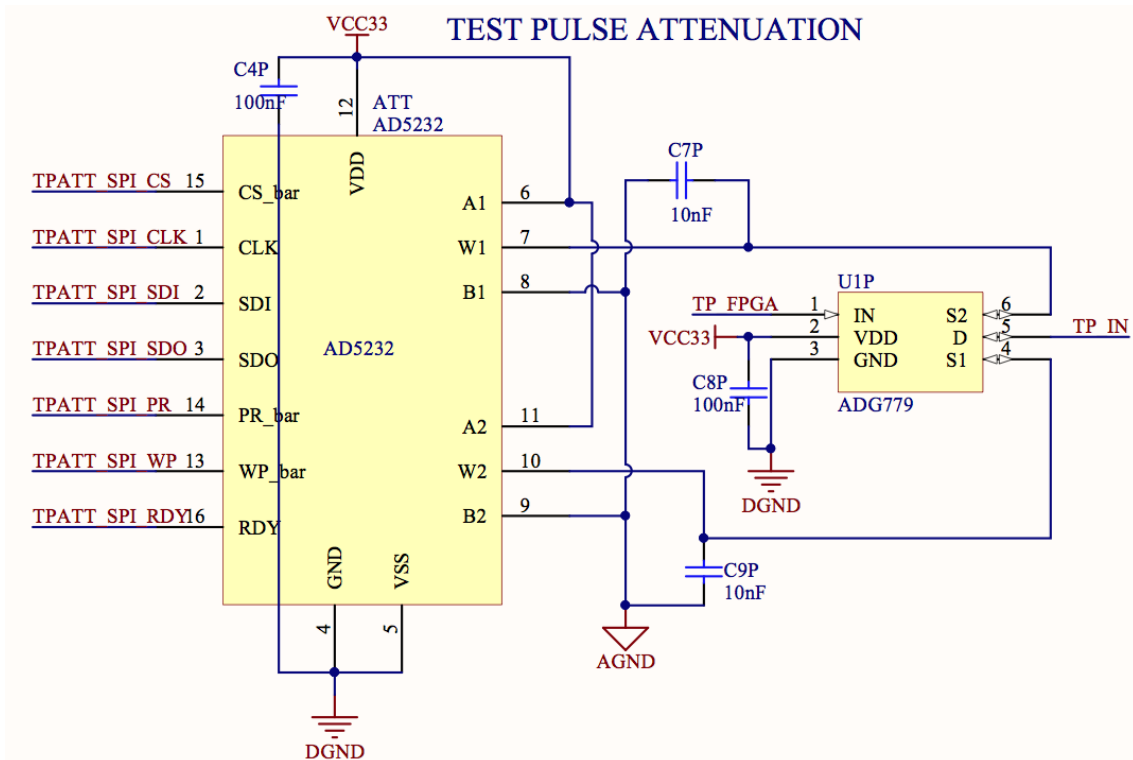
Na koncu še zapišem opombe ali opažanja, če je med meritvijo šlo kaj narobe. Zapišem, pri kateri čitalni elektroniki je prišlo do napake in vrsto napake. Nato naredim analizo podatkov, Poglavje 5.

Dodatek B. Shema testiranega vezja

Shema vezja za nivo proženja, Slika B.2a. S pomočjo tega vezja lahko generiramo dve napetosti za nivo proženja. Na Sliki B.2b je predstavljeno vezje za generacijo testnega signala.



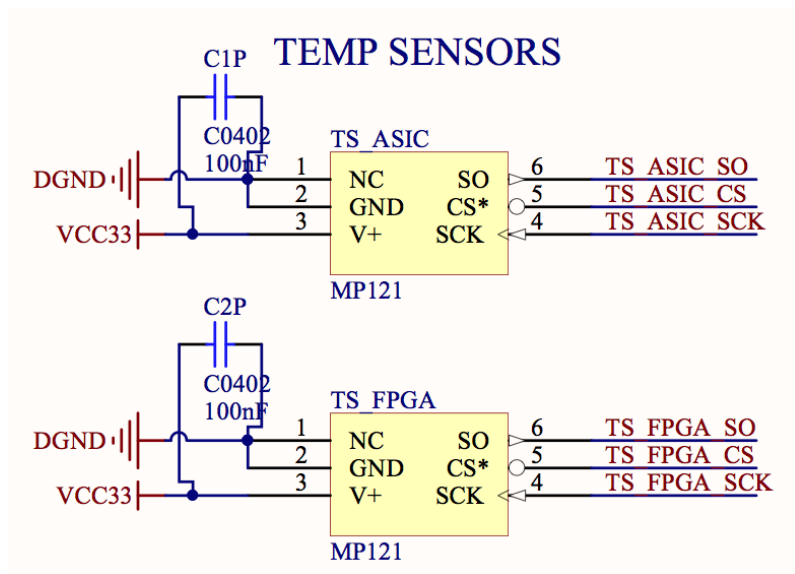
(a)



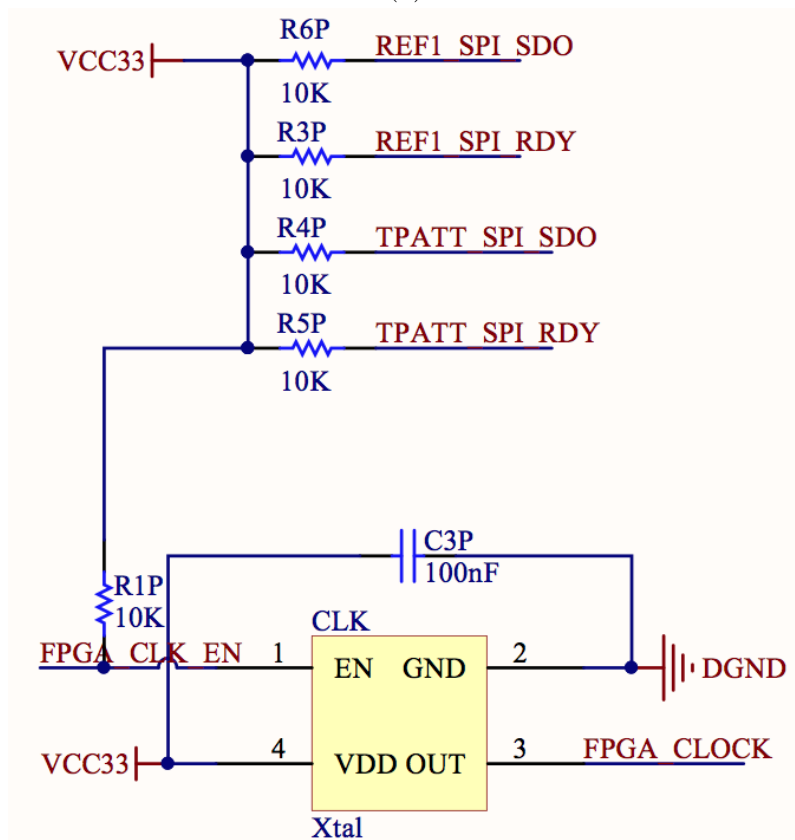
(b)

Slika B.2: a) Shema vezja za nivo proženja in b) shema vezja za generacijo testnega signala.

Shema vezja za merjenje temperatur, Slika B.3a. Imamo dva senzorja. Prvi je na sprednji strani poleg čipa ASIC, drugi pa je na zadnji strani poleg čipa FPGA. Na Sliki B.3b je predstavljeno vezje za uravnavanje urinega takta.



(a)

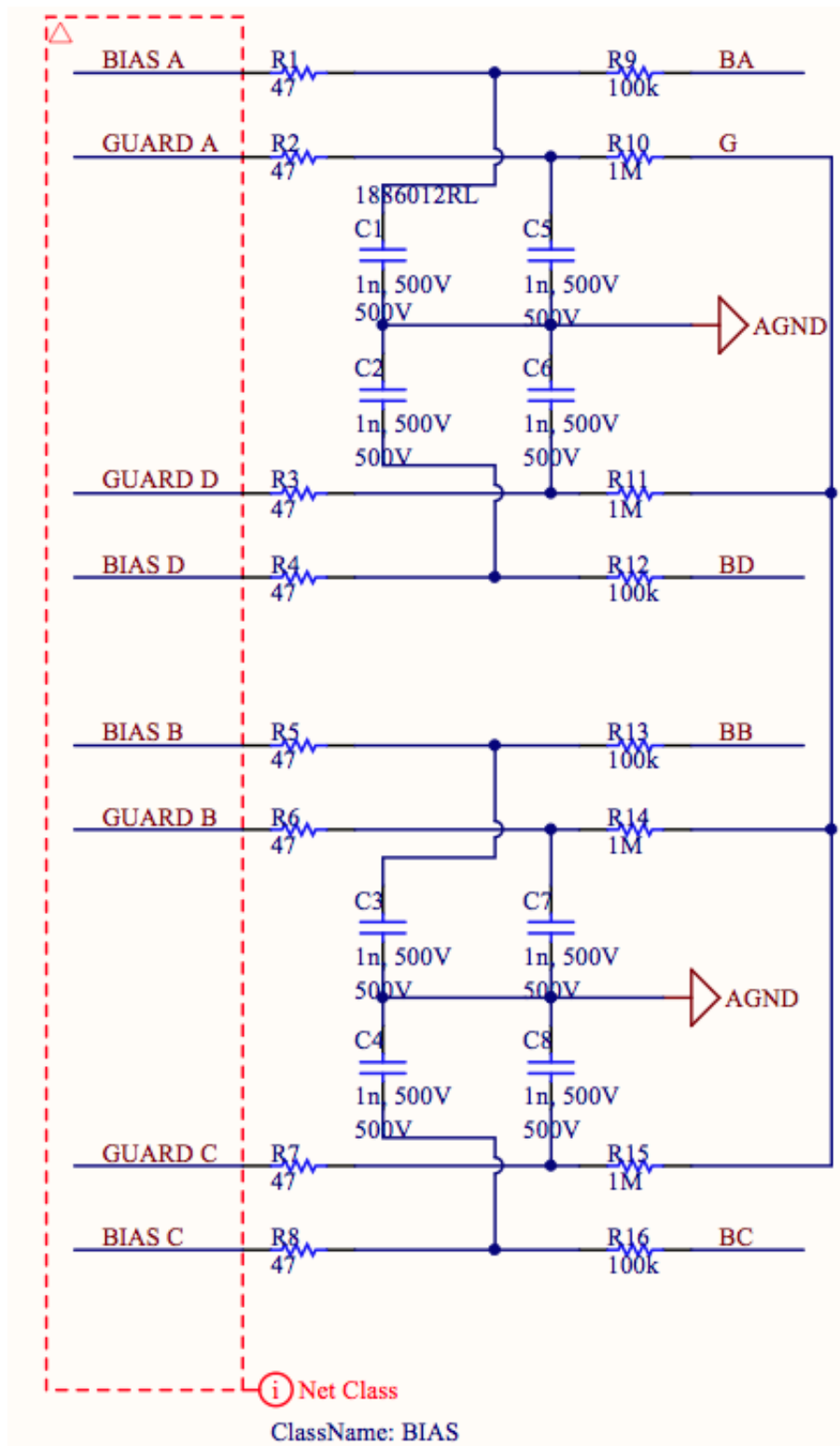


(b)

Slika B.3: a) Shema vezja za merjenje temperature in b) shema vezja za uravnavanje urinega takta.

Dodatek B. Sheme testiranega vezja

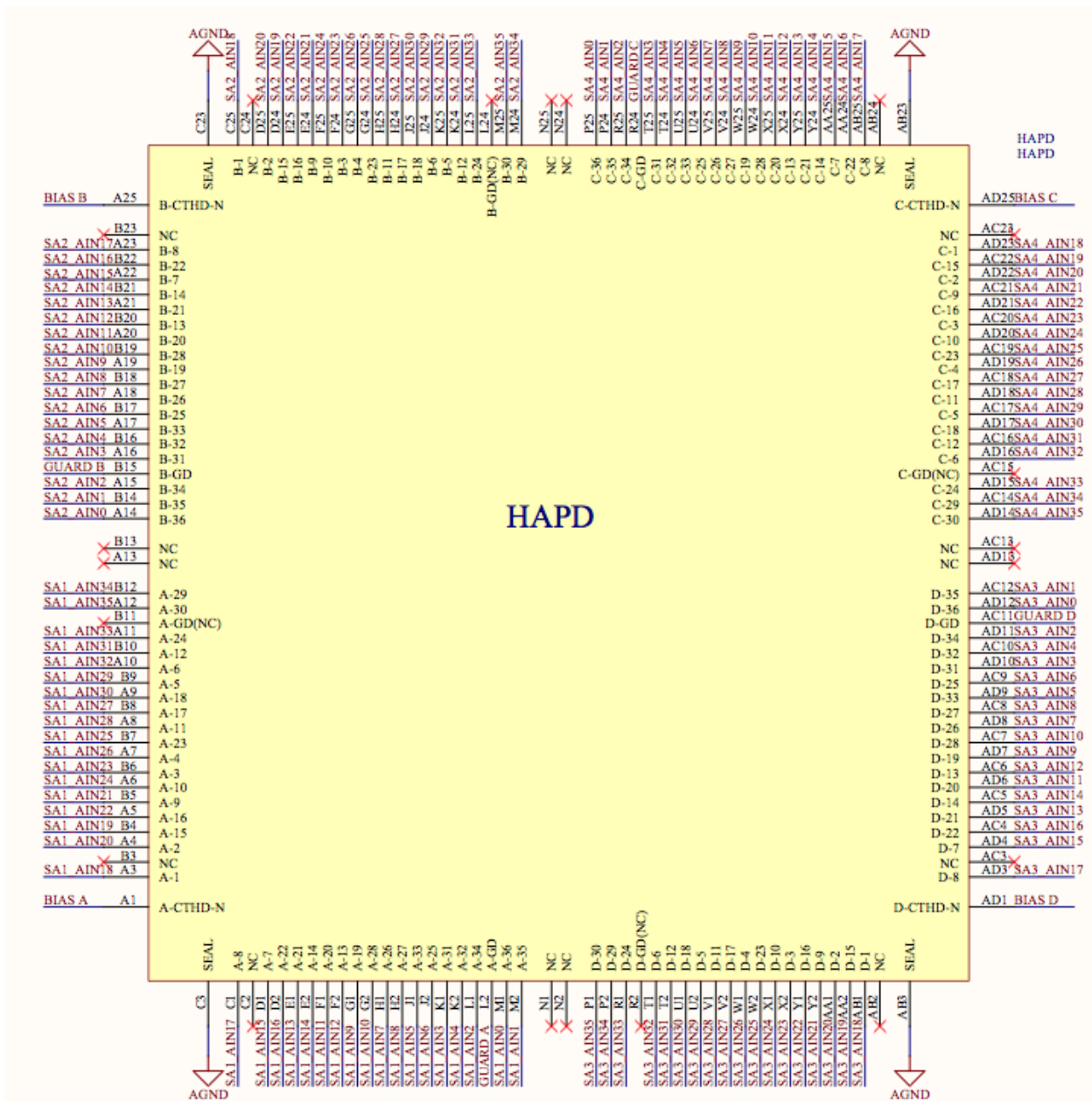
Pri testu z visoko napetostjo smo testirali pravilno delovanje vezja, ki je predstavljen na Sliki B.4.



Slika B.4: Shema povezav, ki smo jih testirali pri testu z visoko napetostjo.

Dodatek C. Povezava med HAPD in ASIC

Vse povezave na fotonskem detektorju HAPD s čipi ASIC prikazuje Slika C.2.



Slika C.2: Vse povezave na fotonskem detektorju HAPD.