

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Vid Oblak

Simulator elektrostatične raztelevtritve

Zaključno poročilo

Visokošolski strokovni študijski program
prve stopnje Aplikativna elektrotehnika

Mentor: Naziv ter ime in priimek mentorja

Ljubljana, 2021

Zahvala

V zahvali se kandidat lahko zahvali mentorju in poimensko tudi vsem sodelavcem in prijateljem, ki so pomagali in prispevali pri delu v laboratoriju, na računalniku, v delavnici, pri tehnični izdelavi dela ali drugje.

Povzetek

V tej diplomski nalogi je opisan razvoj simulatorja elektrostatične razelektritve za integrirana vezja. Simulator je sestavljen iz treh glavnih modulov in sicer kontrolne ploščice, nastavljivega visokonapetostnega napajalnika in visokonapetostnega stikala. Zaradi situacije smo se tekom razvoja projekta odločili da bomo dali povdarek na ugodni ceni. Ta zahteva je pomenila razvoj in izdealvo nastavljivega visokonapetostnega napajalnika in visokonapetostnega stikala, namesto nakupa le teh. Vsi moduli projekta so bili načrtovani z modularnostjo v mislih, da v primeru kasnejše nadgradnje ali zamenjave ta poteka čim bolj ne moteno.

Ključne besede: ESD, Elektrostatika, Simulator elektrostatične razelektritve

Abstract

The thesis addresses...

Key words: ESD, Electrostatic, ESD Simulator

Vsebina

1	Uvod	1
2	Simulator elektrostatične razelektritve	5
2.1	Praktično uposabljanje	5
2.2	Zasnova simulatorja elektrostatične razelektritve	6
2.2.1	Moduli simulatorja	7
2.2.2	Nastavljivi visokonapetostni napajalnik	8
2.2.3	Regulacija napetosti	10
2.2.3.1	UCC28740-Q1	10
2.2.3.2	LM5155	10
2.2.3.3	LM3748	10
2.2.4	LM3757	11
2.2.5	LM8304	12
3	Zahteve	13
4	Blok shema projekta	15

4.1	Nastavljivi visokonapetostni napajalnik	16
5	Visokonapetostno stikalo	23

Seznam slik

1.1	Osnovna shema ESD simulatorja.	3
2.1	Osnovna shema ESD simulatorja.	6
2.2	Shema blok diagrama.	7
2.3	Shema vezja v LTSpice.	11
4.1	Shema blok diagrama.	15
4.2	Shema MOSFET krmilnika narejena z bipolarnimi tranzistorji. . .	16
4.3	Shema krmilnika z UCC27517.	17
5.1	Shema vezja za merjenje relejev.	23
5.2	Skakanje kontaktov pri releju proizvajalca Medler electronics. . . .	24
5.3	Shema idejne zasnove krmiljenja tranzistorja preko "Switched Cap".	26
5.4	Shema stikala s solenoidom verzija 1.	26
5.5	Shema stikala s solenoidom verzija 2.	27
5.6	Shema stikala s servo motorjem verzija 1.	27
5.7	Shema stikala s servo motorjem verzija 2.	28

5.8	Potek napetosti po sklenitvi kontaktov pri servo stikalu verzija 1.	29
5.9	Potek napetosti po sklenitvi kontaktov pri servo stikalu verzija 1 povecano.	30

Seznam tabel

2.1	Ožji izbor regulatorjev	10
-----	-----------------------------------	----

Seznam uporabljenih simbolov

V pričujočem zaključnem delu so uporabljene naslednje veličine in simboli:

Veličina / oznaka		Enota	
Ime	Simbol	Ime	Simbol
čas	t	sekunda	s
frekvenca	f	Hertz	Hz
tlak	p	Pascal	Pa
sila vzgona	\mathbf{F}_{vz}	Newton	N
gostota	ρ	-	kg/m ³
masa	m	kilogram	kg
vhodna napestost	U_{vh}	volt	V
Jacobijeva matrika	\mathbf{J}	-	-

Pri čimer so vektorji in matrike zapisani s poudarjeno pisavo. Natančnejši pomen simbolov ter njihovih indeksov je razviden iz ustreznih slik ali pa je pojasnjen v spremljajočem besedilu, kjer je simbol uporabljen.

1 Uvod

Praktično usposabljanje sem opravljal v podjetju Renishaw d.o.o., podjetje se ukvarja z integriranimi vezji za specifično uporabo (ASIC). Podjetje je bilo ustanovljeno leta kot hčerinsko podjetje Britanskega podjetja Renisahw p.l.c. Zaposleni so razdeljeni na tri skupine:

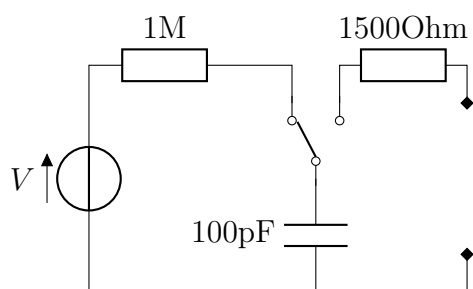
- načrtovalci: načrtujejo posamezne sklope integriranega vezja in karakterizirajo vezje s pomočjo simulacij.
- postavljalci: postavijo posamezne komponente na površino integriranega vezja (podobno kot risanje tiskanih vezij).
- testni inženjerji: karakterizirajo narejena integrirana vezja, načrtujejo testna vezja in skrbijo za testiranje vezij za proizvodnjo.

Jaz sem izvajal praktično usposabljanje v skupini testnih inženjerjev. Zadana mi je bila naloga izdelave simulatorja elektrostatične razelektritve, kateri se uporablja pri verifikaciji integriranih vezij. Zahteve so bile po maksimalni napetosti vsaj 15 kV, nastavljenost izhodne napetosti med 250 V in 15 kV, natančnost izhodne napetosti vsaj 3% ter ustrežanje CE zakonodaji.

Za potrebe testiranja integriranih vezij smo v podjetju potrebovali simulator elektrostatične razelektritve. Na začetku snovanja so bile zastavljene specifikacije maksimalne napetosti 15kV in uporaba že narejenih modulov za nastavljivi visokonapetostni napajalnik ter visokonapetostno stikalo. Tekom projekta se je to spremenilo in prišlo do odločitve o lastnem načrtovanju nastavljivega visokonapetostnega napajalnika. Pri tem modulu smo imeli kar nekaj tehničnih ovir za prebrosti. Največji sta bili ustrežanje regulacijam CE ter zagotavljanje 15kV

izolacije med primarno in sekundarno stranjo. Prvotni načrti so bili lastno navijanje primernege step-up transformatorja. Po kar nekaj mertivah in izračunih se je to pokazalo za neprimerno, saj nismo uspeli zagotoviti željene napetosti in izolacije. Rezervni načrt je bil razdredi televizor s katodno cevjo in iz tam vzeti ven transformator. Tega smo se želeli kar se da izogniti saj se že trenutno težko najde televizorje s katodno cevjo, čez leta se bo pa še težje. Motilo me je pa tudi razlikovanje transformatorjev tako v podnožju kot v karakterisitkah in vgrajene diode v sekundarnem navitju zagotovo ne pomagajo pri karakterizaciji transformatorja. Regulacija napetosti nam je povzročala probleme zaradi zagotavljanja željene izolacije. S pomočjo simulacij smo preizkusili kateri tipi krmilnikov bi nam ustrezali. Izločili smo vse neizolirane krmilnike, krmilnik s povratno vezavo preko optičnega spojnika, zaradi nelinearnosti le tega ni bil zmožen pokrivati celotne izhodne napetosti od 250 V do 15 kV, krmilnik s povratno vezavo preko pomožnega navitja je v simulacijah izgledal obetavno vendar se je na koncu izkazal za neprimernege. Kot primeren se je izkazal samo regulator ima povratno vezavo preko primarnege navitja in sicer z merjenjem zrcaljene napetosti z sekundarnege navitja na primarno. Po standardih MIL-STD-883K in JS-001-2007 mora biti visokonapetostno stikalo, katero prazni kondenzator skozi napravo pod testom t.i. "bounce-lessšepavi ko sklene kontakt ga mora zadržati namesto, da ga na krato razklene. Standarda pa tudi predpisujeta obliko signala toka skozi napravo pod testom zato šnubber" vezje čez kontakte stikala ne bi ustrezalo. Za nižje napetosti obstajajo releji kateri vsebujejo živo srebro, katerega naloga je zadržati kontakt, ko se kontakta odbijeta. Vendar takšnega releja za 15 kV je okoli €2000. Kompromis je bil izdelava svojega stikala, katero bo ustrezalo zahtevam.

Princip delovanja simulatorja elektrostaticne razelektritve je dokaj enostaven. Nastavljivi visokonapetostni vir polni kondenzator, katerega se nato preko upora prazni skozi napravo pod testom.



Slika 1.1: Osnovna shema ESD simulatorja.

2 Simulator elektrostatične razelektritve

2.1 Praktično uposabljanje

Načrtovalski del projekta, sem delal na svojem računalniškem delovnem mestu, kjer sem uporabljal:

- Altium Designer: risanje električnih shem in načrtovanje tiskanih vezij
- Visio: risanje blok diagramov in konceptnih shem
- LTSpice: simulacija analognih vezij
- STM32Cube: programiranje mikrokontrolerov ARM STM32
- Python: komunikacija med mikrokontrolerom in računalnikom

Na mizi sem imel antistatično podlogo, vendar to delovno mesto ni bilo namenjeno meritvam, kvečjem hitrim meritvam, s katerimi sem potrdil koncept. Za obsežnejše meritve sem imel na voljo merilno mesto, kjer je bilo tudi na voljo več merilnih instrumentov. Pri svojem delu sem največ uporabljal:

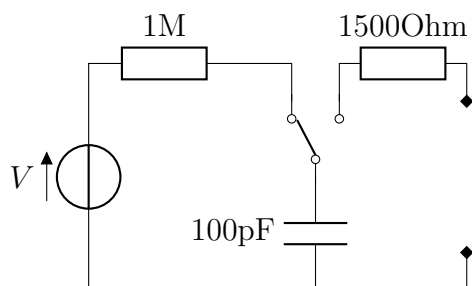
- Rigol DS1054Z: digitalni osciloskop
- neki neki : visokonapetostna diferencialna sonda
- Rigol DP832: 3 kanalni laboratorijski napajalnik

- PeackTech 3450: multimeter z vgrajeno termalno kamero

Pred delom z visoko napetostjo, sem moral opraviti interni tečaj varstva pri delu. Po posvetu z mentorjem sva sklenila razdeliti nalogo po posameznih modulih. Za vsak modul sem naprej pripravil blokovno shemo, ter opis možnih rešitev, po pregledu le teh je sledilo nadaljno simuliranje v LTSpice in ko smo bili zadovoljni z rezultati še načrtovanje v Altium Designer.

2.2 Zasnova simulatorja elektrostatične razelektritve

Poleg že omenjenih specifikacij je veljalo tudi, da mora simulator ustrezati standardoma MIL-STD-883K in JS-001-2007. Osnovna shema simulatorja je sledeča:



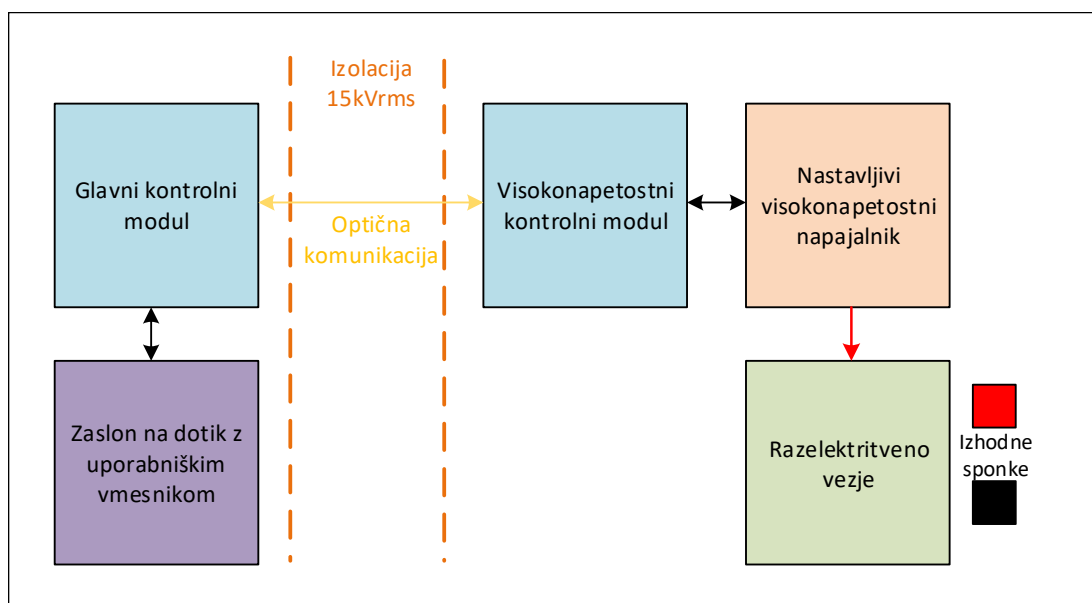
Slika 2.1: Osnovna shema ESD simulatorja.

Sestavljajo ga nastavljivi visokonapetostni izvir, polnilni upor, praznilni kondenzator, praznilni upor ter ne-preskakovalno (t.i. bounce-less) stikalo. Preko polnilnega upora se napolni praznilni kondenzator na željeno vrednost, katerega se v željenem trenutku preko praznilnega upora sprazni skozi napravo pod testom. Izhodni tok mora vstrezati limitam katere so podane v standardih: dvizni čas mora biti manjši kot 10 ns ter nominalni čas praznjenja kondenzatorja skozi kratki stik mora biti 150 ns z maksimalno deviacijo ± 20 ns. Slednja zahteva pomeni, da z stikalom, povezovalnimi žicami in konektorji smemo dodati maksimalno 20 pF, saj drugače bo čas spraznitve skozi kratki stik odstopal zahtevanemu. Pri načrtovanju visokonapetostnega izvira je prav tako potrebno biti

previden, saj mora zagotavljati 15 kV izolacije med primarno in sekundarno stranjo.

2.2.1 Moduli simulatorja

Simulator je sestavljen in 4 modulov, od katerih vsak opravlja posebno nalogo.



Slika 2.2: Shema blok diagrama.

- Glavni kontrolni modul: krmili visokonapetostni modul, prejema uporabnikove ukaze preko zaslona na dotik, pošilja podatke po LAN ali USB
- Visokonapetostni kontrolni modul: krmili nastavljivi visokonapetostni napajalnik in razelektritveno vezje po ukazih glavnega kontrolnega modula, varnostno odklaplja napajanje nastavljivega napajalnika, ko le ta ni v uporabi
- Nastavljivi visokonapetostni napajalnik: po zahtevah regulira napetost od 250 V do 15 kV

- Razelektritveno vezje: sprazne naboj iz praznilnega kondenzatorja prek naprave pod testom

2.2.2 Nastavljivi visokonapetostni napajalnik

Začel sem z nastavljivim visokonapetostnim napajalnikom, saj sem pričakoval, da bo z njim največ dela in na koncu je tudi bilo tako. Z visokimi napetostmi nisem imel nobenih izkušenj, imel sem pa nekaj izkušenj z Cockcroft-Walton-ovim množilnikom napetosti. Hotel sem narediti stikalni napajalnik, kateri bi pretvarjal 24 V v 250 V za njim pa 60 stopenj množilnika. Regulaciji napetosti na transformatorju bi sledila tudi izhodna napetost množilnika. Po simulacijah, sem hitro ugotovil, da to ne bo delovalo po pričakovanjih, saj so kapacitivne izgube previsoke. Računi, simulacije koliko dodatnih stopenj blab alblablal. Našel sem pa članek, kjer so se soočali s podobnim problemom [?], po simulacijah je rešitev izgledala obetavno. Zaradi navdušenja nad rezultati sem se lotil risanja sheme in tiskanega vezja v Altium Designerju. Na srečo smo mojo napako ugotovili, preden smo dali tiskano vezje v izdelavo. Za povratno zanko regulacije sem uporabil analogno-digitalni pretvornik s primerno dimenzinernem preduporom in s tem sem prekinil izolacijo med primarjem in sekundarjem. Sklenili smo, da bo verjetno najboljša možnost za dvigovanje napetosti samo z transformatorjem. Po povpraševanjih pri večjih ponudnikih elektronskih komponent sem prišel do zaključka, da primerne transformatorja ne bo možno kupiti vendar ga bo potrebno narediti. V preteklosti sem že navijal omrežne transformatorje, z načrtovanjem flyback transformatorjev, se pa še nisem srečal. Za začetek sem uporabil jedra RM10 iz materiala N87, katera sem našel v laboratoriju, izračunal sem le koliko obratov rabim na primarni strani, preden preide v nasišenje pri 3 A. Navil sem enega z razmerjem 1:10 in enega z 1:20.

Preden sem opravil meritve sem moral narediti še napetostni delilnik za visokonapetostno sondo, saj je le ta narjena samo za 1.8 kV. Po specifikacijah ima vhodno vpornost $2\text{ M}\Omega$, kar pomeni z $18\text{ M}\Omega$ preduporom, dosežemo razmerje 1:10 in posledično maksimalno napetost 18 kV. Pri tem je potrebno poudariti, da nisem dodal kapacitivne kompenzacije in sonda je bolj uporabna za indikacijo kot pa meritve. Tuljavo sem krmilnik s pomočjo MOSFETa in namenskega krmilnika UCC27517 proizvajalca Texas Instruments. Zaradi izredno kratkega časa

vzpona in padca nam omogoča opravljanje meritve tudi pri višjih frekvencah. Maksimalni izhodni tok 4 A nam omogoča hitro odpiranje/zapiranje MOSFETov z višjim U_{DS} . Z signalnim generatorjem sem lahko natančno kontroliral krmilnik. Meritve sem opravljal od 1 % do 10 % delovnega cikla, pri napetostih 5 V, 10 V in 15 V. Omejitev toka sem nastavil na 3 A, vendar ta ni bila tako pomembna, saj sem imel paralelno iznodnim sponkam vezan še 4700 μ F elektrolitski kondenzator. Pri meritvah sem ugotovil, da napetost U_{pp} lahko brez problema doseže zahtevanih 15 kV, vendar se sliši prebijanje napetosti med navitji transformatorja. Odločil sem se narediti meritve še z tremi različnimi jedri. Pri iskanju jedra, sem si pomagal z skripto katero sem napisal v Matlabu, katera mi glede na A_L in l_e parametre izračuna potrebno razmerje navojev in maksimalni magnetilni tok. Odločili smo se za nekinekimalitrafo, nekinekiorgormizrežo in nekavelikapizdarija. Večja transformatorja sta izgledala zelo obetavno, saj bi na tuljavniku lažje zagotavljal primerno izolacijo ter visoka A_L vrednost pomeni manjše število ovojev. Iz radovednosti sem pomeril tudi dva flyback transformatorja, katera sem naročil kot vzorca od proizvajalca CoilCraft in sicer GA3459 in GA3460, sta pa namenjena za 500 V. Po meritvah sem prišel do ugotovitev, da transformatorja z velikim jedrom delujeta pod pričakovanji, transformatorja od proizvajalca CoilCraft delujeta izredno dobro in skoraj dosejata željene napetosti najbolje se je izkazal mali transformator z EFD jedrom.

Ime	L_{pri}	L_{sec}	Razmerje	U_{ppMAX}	Jedro	Reža
GA3460	2.6 μ H	253 μ H	1:10	3.9 kV	EFD 25/13/9	0.5 mm
GA3459	5 μ H	505 μ H	1:10	13.8 kV	EFD 25/13/9	0.5 mm
Mali z EFD	76 μ H	13.21 mH	1:13	7.84 kV	EFD 30/15/9	0 mm

Z rezultati meritev nisem bil najbolj zadovoljen, vendar sem se odločil najprej ugotoviti način regulacije izhodne napetosti in se kasneje po potrebni prilagoditi parametre transformatorja.

2.2.3 Regulacija napetosti

Prvotno sem si želel skrajšati čas načrtovanja in vzeti že narejeni regulator in po potrebi prilagoditi vezje okoli njega - vezje povratne zanke. Glede na obstoj številnik krmilnikov namenjenih za Flyback topologijo, sem tam začel iskanje primernih, sledeče sem izbral v ožji izbor:

Ime	Proizvajalec	Način povratne zanke
UCC28740-Q1	Texas Instruments	Optoizolator
LM5155	Texas Instruments	Optoizolator
LT3748	Linear Technology	Zaznavnje na primarnem navitju
LT3757	Linear Technology	Napetostni delilnik na izhodu
LT8304	Linear Technology	Zaznavanje na primarnem navitju
LTNEKINEKI	Linear Technology	Pomožno navitje

Tabela 2.1: Ožji izbor regulatorjev

2.2.3.1 UCC28740-Q1

Krmilnik ima avtomatsko regulacijo frekvence v območju od 170 Hz do 100 kHz. Povratna vezava je izolirana preko optičnega spojnika, kateri je prožen na izhodni strani preko napetostnega delilnika in Zennerjeve diode. Z spreminjanjem vrednosti upora povratne vezave se spreminja točka, pri kateri se proži optični spojnik. lalalalalal neki meritve simulacije izračuni kar kol sam da neki je lalalalal

2.2.3.2 LM5155

LM5155 deluje po enakem principu kot že omenjeni UCC28740-Q1.

2.2.3.3 LM3748

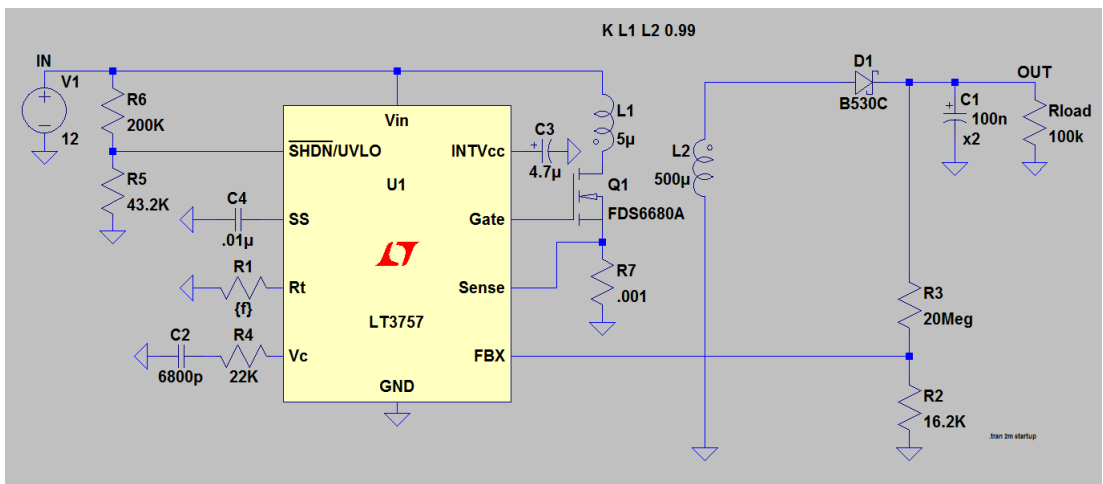
Krmilnik je zelo zanimiv, saj ne potrebuje dodatne povratne vezave, informacijo o izhodni napetosti namreč dobi preko zrcaljene napetosti na primarnem navitju.

Ko se izključi N Kanalni MOSFET, napetost na ponoru zraste nad vhodno napetost, katera je enaka $V_{FLBK} = (V_{OUT} + V_F + I_{SEC} * ESR) * N_{PS}$, ta napetost steče proti masi preko R_{FB} in interno zaporedno vezanim R_{REF} , točka med uporoma je vezana na invertirajoči vhod ojačevalnika napake z referenco 1.223 V [?]. Izhodna napetost je enaka $V_{OUT} = V_{BG}(R_{FB}/R_{REF})(1/N_{PS}) - V_F - I_{SEC}(ESR)$, kjer lahko pri naših napetostih zanemarimo V_F in $I_{SEC}(ESR)$, upoštevati pa moramo tudi zahteve za minimalno induktivnost primarnega navitja:

$$L_{PRI} \geq$$

2.2.3.4 LM3757

Krmilnik LM3757 proizvajalca Linear Technology je krmilnik pri kateremu se nastavlja obratovalno frekvenco z enim uporom v razponu med 100 kHz in 1 MHz. Napetost se nastavlja z napetostnim delilnikom na sekundarni strani, da pri željeni izhodni napetosti je izhod napetostnega delilnika enak 1.6 V. Na spletni strani od produkta je bilo možno dobiti vezje regulatorja, kateremu sem spremenil vrednosti določenih elementov po mojih potrebah. Po nekaj simulacijah je hitro postalo jasno, da je omenjeni krmilnik primeren za projekt, saj sem uspel nastavljati izhodno napetost med 300 V in 5 kV.



Slika 2.3: Shema vezja v LTSpice.

Vendar je problem iz vidika varnosti, sekundarno navitje visokonapetostnega transformatorja je električno povezan z nizkonapetostno stranjo. Za zagotavljanje primerne izolacije bi moral napajalnik modula zdržati 15 kV, kar zopet pomeni načrtovanje takega napajalnika saj napajalniki z najvišjo prebojno trdnostjo so takšni pod certifikatom IEC 60601-1 po katerem je najvišja prebojna trdnost 4000 VAC.

2.2.3.5 LM8304

LM8304 proizvajalca Linear Technology deluje po podobnem principu kot LM3748 z razliko, da ima vgrajen MOSFET in posledično manjšo izhodno moč. Simulacije so bile obetavne vendar sem jih vzel z rezervo zaradi netočnosti modela transformatorja. Vseeno sem se odločil naspajkati krmilnik in pripadajoče komponente na prototipno ploščico. Vezje je delovalo po pričakovanjih, vendar po približno 20 sekundah se je pokadilo iz krmilnika. Mislil sem, da je to bil samo problem z dotičnim krmilnikom in sem uporabil novega. Tudi pri temu se je pokadilo. Dotični krmilnik ima maksimalno moč 24 W vendar pri meritvah moč ni presegla 10 W. Potrebno se je pa zavedati, da je bil na izhodu napajalnika kondenzator z 4700 μ F, zaradi katerega napajalnik ni pokazal visokih tokovnih špic. Drugi del, ker bi lahko prihajalo do napake je na pinu SW, kateri je ponor internega MOSFETA in lahko, da inducirana napetost na primarnem navitju je višja od U_{DSMAX} in posledično poškoduje čip. Podatkovni list narekuje uporabo shotky in zener diodo s pragovno napetostjo $V_{Zener(MAX)} \leq 145V - V_{IN(MAX)}$ proti napajalni liniji za odvajanje prenapetostnih špic. V mojem primeru sem uporabil zener diodo z pragovno napetostjo 100 V vendar očitno ni bila dovolj. Imel sem še en krmilnik pri katerem sem namesto priporočene prenapetostne zaščite uporabil TVS diodo z nominalno napetostjo 70 V in maksimalnim tokom 26.5 A. Toda rezultat je bil še vedno isti.

3 Zahteve

Pred začetnom snovanja simulatorja elektrostatične razelektritve so bila podane sledeče zahteve:

- Maksimalna napeost vsaj 15 kV.
- Nastavljanje napetosti od 250 V do 15 kV.
- Natačnost izhodne napetosti vsaj 3%.
- Avtomatsko preklapanje med pozitivno in negativno izhodno napetostjo.
- Možnost spremembe modela razelektritve.
- Modularna zasnova.
- Možnost nadgradnje na avtomatični tester.
- Možnost povezave na LAN.
- Ustrezanje CE zakonodaji.
- Ustrezanje standardoma MIL-STD-883K in ESDA JS-001-2017.

Tekom projekta so se spremenile sledeče zahteve:

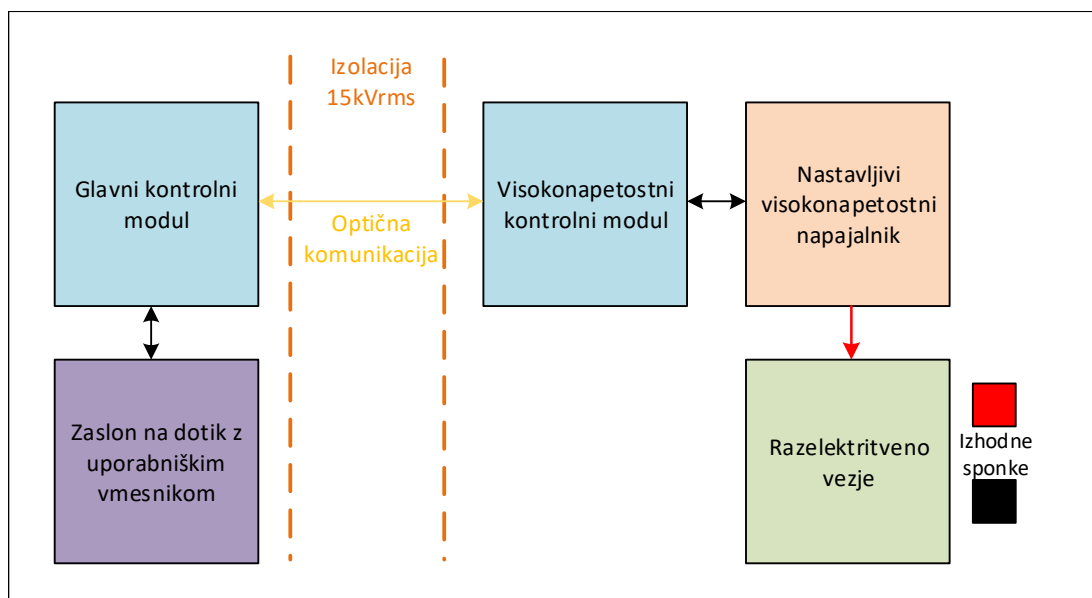
- Maksimalna napetost vsaj 4 kV.

Ter ni več potrebe po avtomatskem preklapljanju polaritete izhodne napetosti.

4 Blok shema projekta

Glavni bloki, kateri sestavljajo simulator elektrostatične razelektritve so:

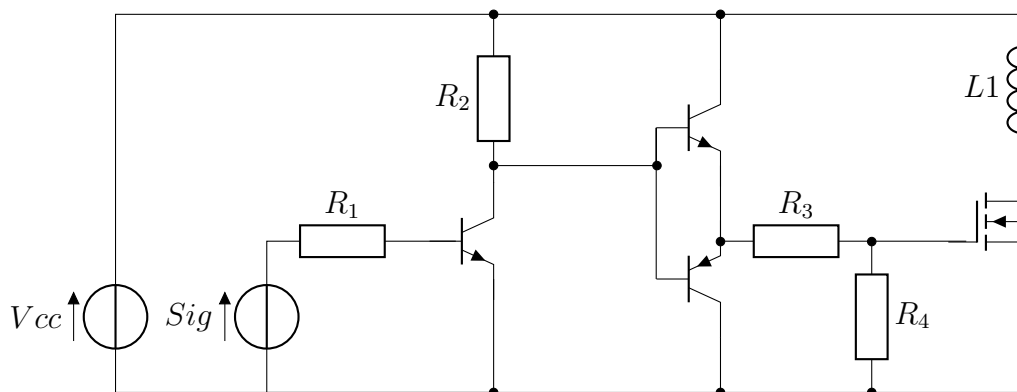
- Glavni kontrolni blok,
- Visokonapetostni kontrolni blok,
- Nastavljivi visokonapetostni napajalnik ter
- Visokonapetostno stikalo.



Slika 4.1: Shema blok diagrama.

4.1 Nastavljivi visokonapetostni napajalnik

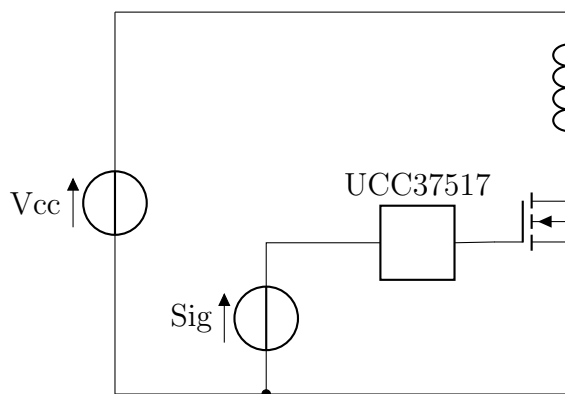
Nastavljivi visokonapetostni napajalnik, je modul, kateri je verjetno povročal največ komplikacij. Prvotno je bil plan uporabiti že narjeni modul HP015Z proizvajalca Applied Kilovolts. Omenjeni modul ima maksimalno izhodno napetost 15 kV in maksimalni tok 400 μ A. Ima možnost nastavitve napetosti glede na napetost na kontrolnem vhodu in možnost izbire pozitivne ali negativne izhodne napetosti. Z uporabo 10 bitnega digitalno-analognega pretvornika (ADC) bi lahko dosegli napetostno resolucijo približno 14.65 V. Vendar zaradi takratne situacije je bil zmanjšan proračun za projekt, posledično smo se odločili sami izdelati modul. Specifikacije so ostale enake pri načrtovanju smo se poskušali držati načela, da uporabljamo komponente katere se dobijo pri več različnih virih. Najpomembnejša komponenta je bila transformator. Glede na specifikacij napajalnika je bil najbolj primeren t.i. "flyback" transformator. Želeli smo uporabiti že naviti transformator vendar se je to izkazalo kot nemogoče, saj praktično ne obstajajo takšni, ki imajo nazivno izolacijsko trdnost večjo kot pa 4 kV. Edina možnost katera nam je še ostala je bila lastno navijanje transformatorja. Za prve poizkuse sem uporabil RM10 jedro iz materiala N87, pri prvem primeru sem na primar navil 2 ovoja in na sekundar 20, pri drugem pa na sekundar ovil 40 ovojov. Za krmiljenje MOSFETA sem prvotno uporabljal vezje sestavljeno iz menjalnika nivoja ter "push-pull" komplementarnega para tranzistorjev, katera sta krmilila vrata MOSFETA.



Slika 4.2: Shema MOSFET krmilnika narejena z bipolarnimi tranzistorji.

Pri meritvah se je pokazalo, da vezje prepočasi odpira MOSFET. Rešitev

je bila krmilnik vrat z namenskim čipom UCC27517 proizvajalca Texas Instruments. Zaradi izredno majhnega časa vzpona in padca nam omogoča opravljanje meritev tudi pri višjih frekvencah. Maksimalni izhodni tok 4 A nam omogoča hitro odpiranje/zapiranje MOSFETov, kateri so namenjeni za višje moči in napetosti.



Slika 4.3: Shema krmilnika z UCC27517.

Testi so bili narejeni na sledečih transformatorjih:

- GA3459 proizvajalca CoilCraft
- GA3460 proizvajalca CoilCraft
- Z jedrom RM10 in prestavnim razmerjem 1:10
- Z jedrom RM10 in prestavnim razmerjem 1:20
- Z jedrom EFD 30/15/9 in prestavnim razmerjem 1:13
- in še kr neki drugih trafotov bla bla bla bla

GA3459 in GA3460 Transformatorja sta namenjena za uporabo z krmilnikom za polnenje kondenzatorjev LT3751 proizvajalca Linear Technology. Nazivno napetostno območje je 5 V - 24 V in nazivna izhodna napetost je 500 V. Prvotni načrt je bil regulacija izhodne napetosti v območju od 10 V do 500 V ter 30 stopenjski paralelni množilnik [?]. Kasneje sem spremenil mnenje in se odločil uporabiti samo transformator za doseganje končne izhodne napetosti. Glede na

relativno visoko izhodno moč transformatorja sem se odločil opraviti meritve maksimalne izhodne napetosti, čeprav je nazivna izolacija samo eno minuto pri $1500 V_{\text{rms}}$. Čeprav so specificirane maksimalne tokovne špice 20 A, sem se pri meritvah omejil na 3.2 A. Pri vhodni napetosti 10 V ter duty cycle 6% sem dosegel $13.8 kV_{\text{max}}$ in $9920 V_{\text{pp}}$. Vendar se je pri tej napetosti že slišalo šumenje in vohalo po ozonu. Z seciranjem enega transformatorja sem prišel do uporabnih podatkov. Po meritvah jedro ustreza EFD 25/13/9 proizvajalca TDK in je iz materiala N87 z 0,55mm zračne reže ali N97 z 0.5 mm zračne reže. V obeh primerih to pomeni vrednost $A_L = 160 \text{ nH}$. Z GA3460 pa rezultati niso spodbujojoči, saj ima induktivnost primarnega navitja za pol manjšo in sicer 2,5uH. Zaradi tega tudi magnetilni tok hitreje naraste do omejitve in posledično je bila najvišja izmerjena napetost $4800 V_{\text{max}}$ in $3120 V_{\text{pp}}$.

Transoformatorja z jedrom RM10 sta bila načrtovana glede na tok nasičenja na primarju in razmerja 1:10 ter 1:20 izbrana poljubno. Potrebno je poudariti, da sta bila načrtovana kot navadna transformatorja in ne kot flyback.....

Z jedrom EFD 30/15/9 smo opravljali meritve, saj je zelo podoben temu jedru, ki je v transformatorjih od Coilcrafta. Edina razlika je, da je naše jedro brez zračne reže.

Pomeril sem pa tudi že narejene flyback transformatorje, kateri so mi ostali od nekega drugega projekta. In sicer GA3459 in GA3460 proizvajalca Coilcraft. Z njima sem dosegal napetosti nekinekineki vendar sta imela nazivno izolacijo samo $1500 V_{\text{rms}}$, kar je v praksi pomenilo, da ko je transformator dosegel izhodno napetost približno 10 kV se je začelo slišati kako prihaja do preboja med navitji. Izkazalo se je, da bo potrebno prilagoditi prvotne zahteve in sicer potrebno bo uporabiti transformator, katerega se čedalje težje dobi - flyback transformator iz televizorja s katodno cevjo. Za barvne televizorje so običajno 35 kV in 40 W, poleg tega imajo tudi vgrajene visokonapetostne diode. Prvi testi so se izkazali za več kot odlični, saj pri napjalni napetosti 12 V z delovnim ciklom od 0 do 25% lahko pokrijemo celotno željeno napetostno območje. Poleg tega je pa tudi magnetilni tok na primarnem navitju precej nižji, kot pa pri alternativah. Nam pa seveda ta rešitev prinese druge probleme. Izredno težko bi bilo dobiti

nadomestni transformator kateri ima podobne karakteristike ter enako podnožje. Podatkovnega lista se pa tudi ne dobi, v simulacijah bi bilo v veliko pomoč, če bi imel podano induktivnost sekundarnega navitja. Le to je nemogoče pomeriti z navadnim RLC merilnikom, saj imajo takšni transformatorji med zaporedno vezanimi sekundarnimi navitji visokonapeotne diode. Razmerje med številoma ovojev na primarnem navitju in na sekundarnem navitju bi pa prišlo prav pri izračunih za določene napetostne regulatorje. Vendar vseeno prednosti odtehtajo te probleme. Regulacija nam je pa tudi povzročila kar nekaj problemov. Že samo območje regulacije od 250 V do 15 kV ni tako majhno, zraven je pa bila tudi želja po meritvi izhodne napetosti in shranjevanju vrednosti le te v povzetek tesiranja. Prvotno sem se zatekel proti že namenskim čipom za regulatorje napetosti, saj bi potreboval samo prilagoditi povratno vezavo. Prve simulacije, katere so obrodile sadove so bile s krmilnikom LT3757. S tem krmilnikom je povratna povezava narejena z napetostnim delilnikom, kateri ni izoliran. Potreben bi bil AC-DC napajalnik, kateri ima prebojno trdnost vsaj 15kV ali baterijsko napajanje za čas polnenja praznilnega kondenzatorja. Nobena od teh rešitev mi ni najbolj ustrezala, zato sem simuliral še druge flyback nametostne regulatorje, kateri imajo drugačne načine povratne vezave. Povratna vezava z optospojnikom ni primerna, saj je vseeno potrebno spreminjati vrednost napetostnega delilnika na visokonapetostni strani. Regulacija s pomožnim navitjem je po prvotnih simulacijah izgledala obetavno, ko sem pa popravil vrednosti induktivnosti na vrednosti našega transformatorja se je krmilnik nehal odzivati kot je bilo pričakovano. Zadnja rešitev je bila krmilnik, kateri za povratno vezavo meri zrcaljeno napetost iz sekundarnega navitja proti primarnemu. Simulacije so bile izredno obetavne z krmilnikom LT8304, prav tako meritve opravljene na vezju naspajkanem na prototipni ploščici. Žal je po nekaj časa krmilnik nehal delovati. Naredil sem še enega identičnega, kateri je doživel enako usodo. Predvidevam, da je kriv interni MOSFET, kateri nima načrtovane zaščite za tako visoke zrcalne napetosti kot so v mojem primeru. Na srečo ima proizvajalec Linear Technology v svojem programu tudi krmilnik LT3748 kateri ima povratno vezavo po enakem principu, le da tukaj je zunanji MOSFET, katerega lahko izberemo z primerno visoko maksimalno zaporno napetostjo. Izkazal se je za najboljšega kandidata po simlacijah, vendar je potrebno povadati da glede na meritve na transformatorju predvidevam, da ima ta v jedru režo, kar pa je dokaj zahtevno za modelirati zato sem delal simulacije z transformatorjem brez reže. Žal se je izkazalo, da z našim transfor-

matorjem regulacije ne deluje pravilno, saj je neodvisno od vrednostni upora v povarni vezavi krmilnik na vrata MOSFETA pošiljal signal širine približno 55 μ s, kar je po podatkovnem listu maksimalni čas odprtega MOSFETA. Enačba za izhodno napetost je

$$V_{OUT} = V_{BG} * \left(\frac{R_{FB}}{R_{REF}} \right) * \left(\frac{1}{N_{PS}} \right) - V_F - I_{SEC} * (ESR) \quad (4.1)$$

Pri tem lahko zanemarimo V_F in $I_{SEC} * (ESR)$ ter iz podatkovnega lista lahko izločimo, da je $V_{BG} = 1V$. In dobimo sledečo enačbo.

$$V_{OUT} = \left(\frac{R_{FB}}{R_{REF}} \right) * \left(\frac{1}{N_{PS}} \right) \quad (4.2)$$

Za minimalno vrednost primarnega navija je pa sledeča enačba.

$$L_{PRI(MIN)} = \frac{(V_{OUT} + V_{F(DIODE)}) * R_{SENSE} * t_{SETTLE(MIN)} * N_{PS}}{V_{SENSE(NIN)}} \quad (4.3)$$

Pri kateri so podani podatki $V_{SENSE(MIN)} = 15$ mV ter $t_{SETTLE(MIN)} = 400$ ns, $V_{F(DIODE)}$ pa lahko zanemarimo). Za R_{SENSE} bomo pa uporabili 10 m Ω . Druga enačba za minimalno induktivnost primarnega navitja je pa.

$$L_{PRI(MIN)} = \frac{(V_{IN(MAX)} * R_{SENSE} * t_{ON(MIN)} * N_{PS})}{V_{SENSE(NIN)}} \quad (4.4)$$

Pri kateri je podan $t_{ON(MIN)} = 250$ ns.

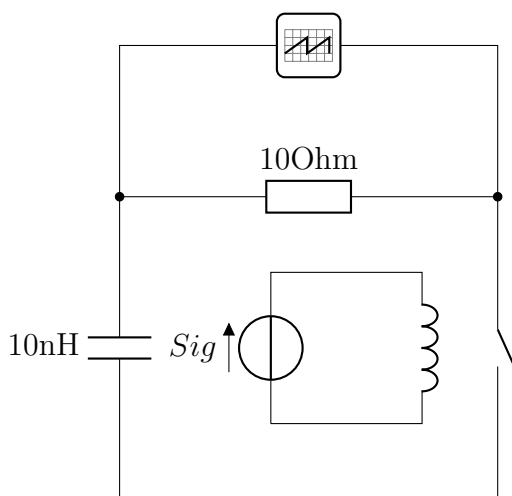
Razmerja ovojev primarnega in sekundarnega navitja nimamo podanega in zaradi diod v sekundarnem navitju ni ravno enostavno izmeriti sem to vrednost predpostavil. Podatki so $R_{REF} = 6.04$ k Ω , $V_{OUT(MAX)} = 15$ kV, $V_{OUT(MIN)} = 250$ V in $N_{PS} = 0.1$. Ko poračunamo enačbe dobimo sledeče rezultate za razpon upora za povratno vezavo $R_{FB(MAX)} = 9.04$ M Ω , $R_{FB(MIN)} = 151$ k Ω . Za minimalne induktivnosti primarnega navitja $L_{PRI(MIN)} = 400$ μ H in $L_{PRI(MIN)} = 2$ μ H, upoštevati moramo višjo vrednost sepravi 400 μ H. Naša transformatorja imata induktivnosti primarnih navitij 411 μ H in 330 μ H, kar pomeni, da s tem krmilnikom lahko uporabimo samo večji transformator.

Vendar po 3 poskusih je vedno krmilnik odpovedal. Po približno minuti delovanja

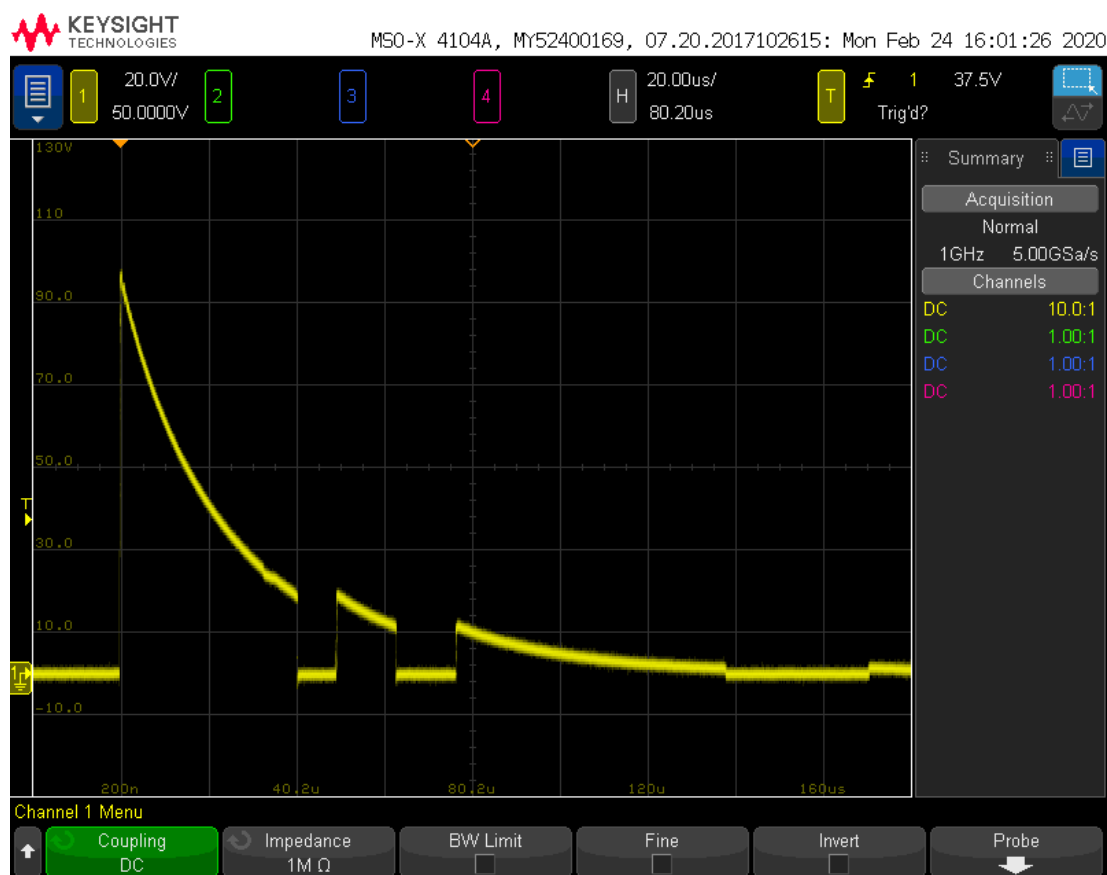
ni več kazal znakov življenja. Glede na izmerjenih 0 V na nogici številka 5, kjer deluje interni linearni regulator predvidevam, da je ta odpovedal in posledično celotni krmilnik ne deluje več. Edina rešitev, katera nam preostane je izdelava svojega krmilnika z mikrokrmilnikom, izoliranim ADCjem ter PID regulatorjem. V tem času so se spremenile zahteve na maksimalno napetost 4 kV kar nam olajša izbiro komponent. Za ADC sem prvotno hotel uporabiti takšnega, kateri ima že vgrajeno izolacijo naprimer AD7405 proizvajalca Analog Devices. Vendar se nam tu pojavi problem izoliranega napajanja, saj je vseeno potrebno načrtovati napajalnik z transformatorjem, kateri ima vsaj 4 kV prebojne trdnosti. Rešitev so digitalni izolatorji serije ISOW proizvajalca Texas Instruments. Slednji imajo 4 ali 6 izoliranih digitalnih kanalov ter izolator napetosti. Tako lahko uporabimo normalni ADC, kateri ustreza našim zahtevam in še vedno ustrezamo varnostnim zahtevam glede izolacije.

5 Visokonapetostno stikalo

Standard zahteva "Bounce-lessstikalo sepravi stikalo, katero ko sklence kontakt ga ne razklence več. Prvotna izbira je bil model G61A proizvajalca Gigavac, kateri se tudi nahaja v simulatorjih elektrostatične razelektritve, saj je v specifikacijah povdarjeno: Odličen za praznjenje kondenzatorjev ter efektivno operira brez "bo-uncinga". Vendar se cena takšenga releja giba okoli 2000€. Zaradi omejenega proračuna ni bilo mogoče odobriti nakup dotičnega releja. Dobra alternativa se je zdel rele serije H proizvajalca Medler electronics (sedaj Standex electronics) kateri ima v specifikacijah navedeno "Žamenjava za mokre releje z živim srebrom". Pri ceni okoli 50€ se je to zdelo predobro, da bi bilo res. Testi so pokazali točno to, kar smo pričakovali: skakanje kontaktov.



Slika 5.1: Shema vezja za merjenje relejev.



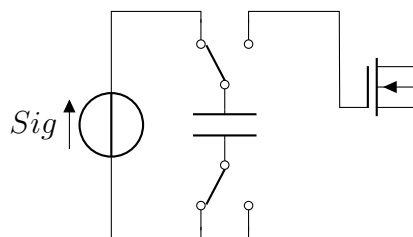
Slika 5.2: Skakanje kontaktov pri releju proizvajalca Medler electronics.

Po specifikacijah bo največji tok čez rele 10 A, saj imamo maksimalno napetost 15 kV in kondenzator praznimo z $1500\ \Omega$ uporom. Zaradi varnosti sem pri merjenju sem spremenil RC konstanto iz $1500\ \Omega$ in $100\ \text{pF}$ na $10\ \Omega$ in $10\ \text{nF}$ katero sem napajal iz 100 V. Na posnetku zaslona iz osciloskopa se lepo vidi razklenitev pri $40\ \mu\text{s}$ in $55\ \mu\text{s}$. Po ponovitvah sem ugotovil, da so razklenitve časovno zelo konstantne. Nastala je ideja o vezanju dveh ali več enakih relejev vzporedno in vzbujanje le teh s časovnim zamikom, saj bi tako premostili razklenitev. Vendar bi s tem dodali kapacitivnost v sistem na katero moramo biti zelo pozorni saj standard dovoljuje maksimalno 20 ns deviacije časovne konstante kar nanese na $13\ \text{pF}$. Iz radovednosti sem naredil meritve še pri višjih napajalnih napetostih vzbujevalne tuljave, kjer sem predpostavljajal, da bo magnetno polje dovolj močno,

da se kontakt ne bo uspel odbiti. Vendar temu ni bilo tako saj tudi pri trojni napajalni napetosti so se prekitivne še vedno dogajale.

Mojo pozornost je pritegnil tudi izdelek podjetja Behlke, katero se ukvarja z visokonapetostno in močnostno elektroniko. Izdelek je bil HTS 181-02-C hitro visokonapetostno tranzistorsko stikalo. Dotični model ima maskimalno napetost 18 kV ter maksimalno tokovno špico 12 A. Malo manj vzpodbudne so številke za čas naraščanja saj v naših primerih bi bile od 12 ns do 25 ns. Kar je precej več kot 10 ns kot jih zahteva standard. Cena takega stikala je okoli 1100€, tako da zopet presega naš proračun. Po pregledu fotografij tega stikala in podobnih sem našel sliko, kjer je bil brez pokrova. Najbolj me je zanimal kako je bil izveden visokonapetostni del. Izgleda da uporabljajo več zaporedno vezanih tranzistorjev. Porodila se je ideja o načrtovanju takšnega stikala z komercialno dobavljivimi komponentami. Prva ovira je bila izbirane polprevodnikov, kateri so primerni za nalogo. IGBTji IXYL60N450 proizvajalca LittleFuse so se na papirju izkazali za najboljše, saj imajo maksimalno VCES napetost 4.5 kV vendar imajo tipični odpiralni čas 55 ns kar je še vedno 5.5 krat preveč. Sem pa našel tranzistorje kateri so bili namenjeni za 10 kV z risetime okoli 10 ns. Tako bi lahko uporabili dva in ju zbondirali na tiskano vezje in s tem zmanjšali parazitne kapacitivnosti in induktivnosti. Vendar zaradi tako hitrega rise timea spadajo te tranzistorji pod Dual use in za nakup le teh potrebno podpisati NDA.

Vendar mi je dalo misliti, če se uporabi najbolj idealne komercialne tranzistorje, jih odstrani iz ohišja, zbondira na tiskano vezje. Kakšne čase bi potem dobili. Preden začnem risati tiskano vezje sem hotel v simulatorju zasnovati še krmilnik. Uporabljeni bi bili IGBTji zato je potrebno krmilno napetost pripeljati med vrata in emitor. V mojem primeru je potencial emitorja navijšega IGBTja proti masi 11.25 kV. S primernimi visokonapetostnimi stikali bi lahko krmilil na način "Switched Cap".

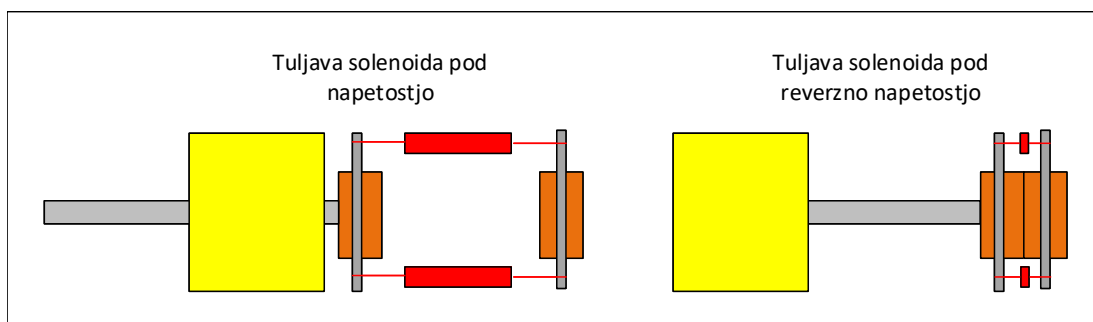


Slika 5.3: Shema idejne zasnove krmiljenja tranzistorja preko Šwitched Cap”.

Naletel sem pa na članek [?] kjer so potrebovali podobno rešitev, ki so jo reševali z transformatorji kateri so imeli 1:1 razmerje in primerno prebojno trdnost. V simulacijah se je rešitev obnesla. V resničnem svetu bi me pa skrbelo, če bi kakšen krmilnik ali tranzistor le malo zakasnil, saj bi takrat prisala celotna napetost na njemu kar bi seveda pomenilo preobremenitev le tega.

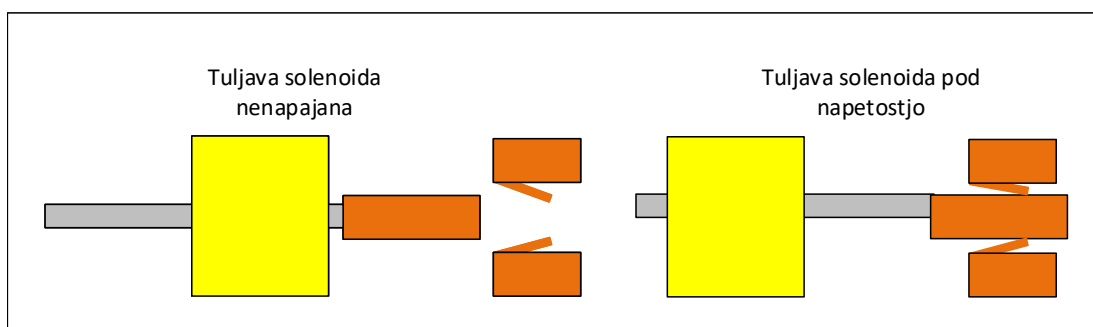
V iskanju nadaljnjih rešitev to pomeni mehanično rešitev in samo eno stikalo ne zaporene ali vzporedne vezave stikal. Lotili smo se hitrih prototipov štirih stikal:

1. Solenoid, kateri drži razklenjena kontakta, skupaj ju vleče vzmet. Ob prožitvi se obrne polariteta napajanja tuljave solenoida, kateri poleg vzmeti tišči kontakta skupaj.



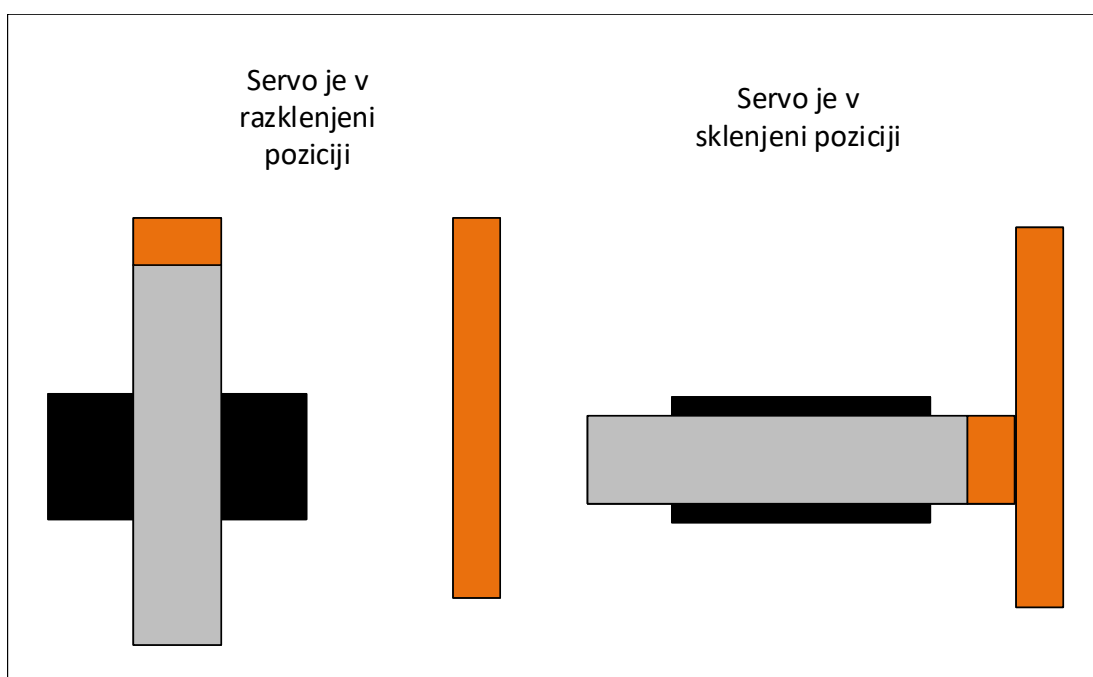
Slika 5.4: Shema stikala s solenoidom verzija 1.

2. Solenoid kateri, porine kontakt in jezička ga ujameta.



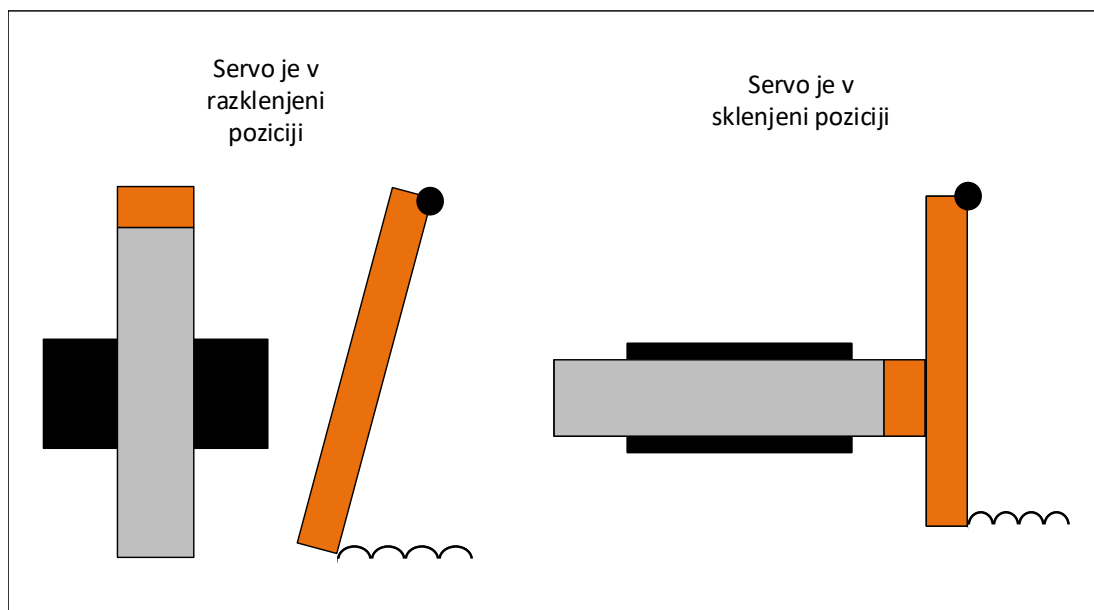
Slika 5.5: Shema stikala s solenoidom verzija 2.

3. Servo motor se zasuče in z drsnim stikalom sklene kontakt.



Slika 5.6: Shema stikala s servo motorjem verzija 1.

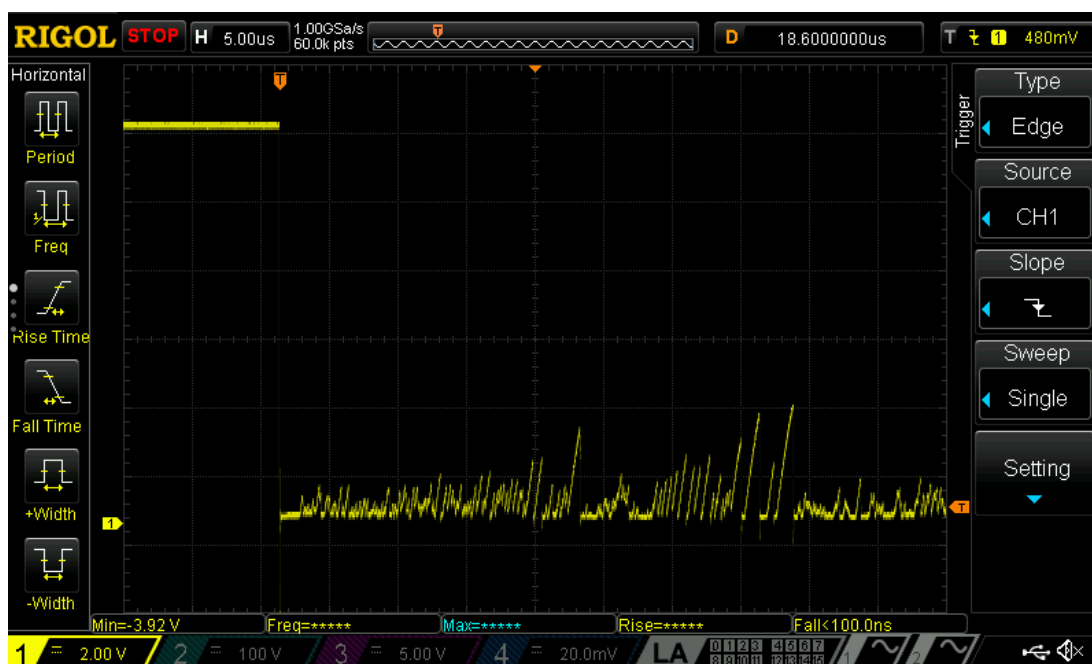
4. Servo motor se zasuče in pritisne na kontakt kateri je na vzmeti.



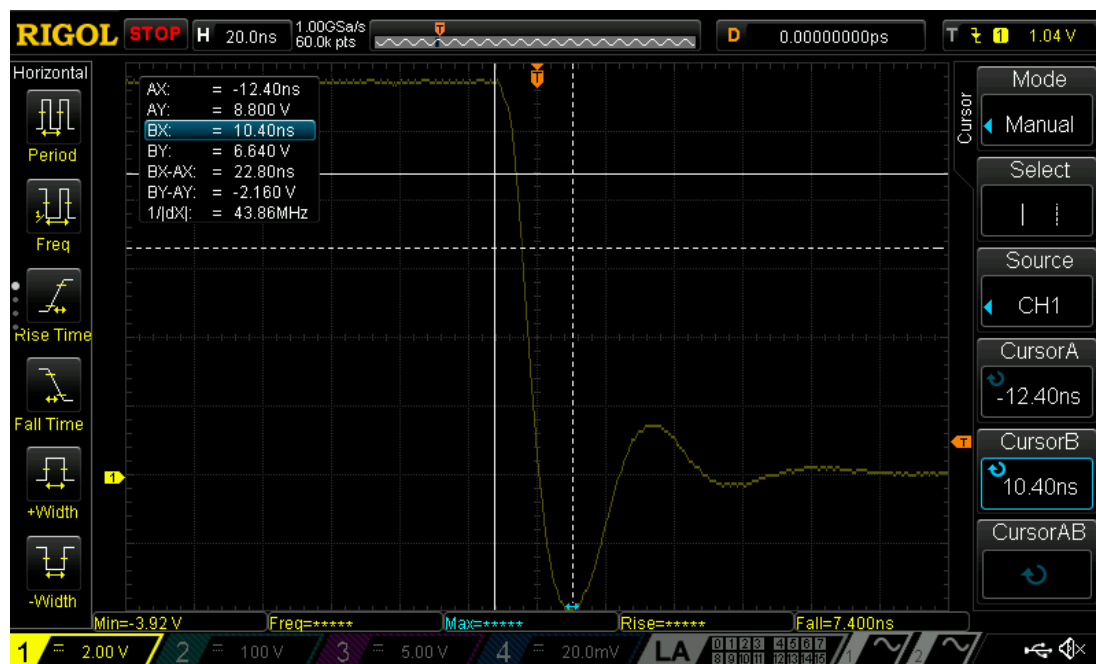
Slika 5.7: Shema stikala s servo motorjem verzija 2.

Za solenoid smo na začetku uporabili manjši model, kateri je bil namenjen konstantnemu delovanju pri 12 V, za hitrejšo delovanje in večjo slilo se ga lahko prenapaja z 40 V za čas 1 s z delovnim ciklom 5%. Izkazal se je za neuporabnega, saj čim se na njega namesti kontakt nima več zastostne moči za premikanje, posebno če bi se moral še upirati sili vzmeti. Za hitri preiskus mojih tez sem naredil solenoid na tuljanviku od transformatorja.

S stikalo s servo motorjem smo imeli dokaj dobre uspehe vendar smo še vedno bili daleč od končne rešitve. Hitre meritve prototipa stikala z servo motorjem verzija 1 so pokazale rise time 10 ns vendar se vseeno pojavljajo manjše prekinitve po sklenitvi kontaktov. Skrbi me pa tudi obraba in oksidacija kontaktov. Rešitev bi bila zaprtje celotnega stikala v vakumsko komoro ali še bolje SF_6 .



Slika 5.8: Potek napetosti po sklenitvi kontaktov pri servo stikalu verzija 1.



Slika 5.9: Potek napetosti po sklenitvi kontaktov pri servo stikalu verzija 1 povecano.

Stikalo s servo motorjem verzija 2 pa je problem počasnega rise tima. Verjetno je kriva vsa parazitna kapacitivnost. Potrebno bi bilo narediti revizijo in skrajšati vse segmente žice in narediti kontakte bolj kompaktne.