

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Vid Oblak

Simulator elektrostatične razelektritve

Poročilo o delu

Visokošolski strokovni študijski program
prve stopnje Aplikativna elektrotehnika

Mentor: Izr. Prof. Dr. Peter Zajec

Ljubljana, 2021

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju dr. Petru Zajcu in mentorju v podjetju Blažu Prahu, katera sta mi pomagala z nasveti, izračuni in realizacijo projekta. Zahvaljujem se tudi sodelavcu Janu Pogačarju, ki je vskočil na pomoč pri uporabi Python in LaTeX. Prav tako se zahvaljujem vsem ostalim sodelavcem in prijateljem, kateri so tudi v najmanjši meri pomagali pri razvoju ali realizaciji projekta.

Povzetek

V tem zaključnem poročilu je opisan razvoj simulatorja elektrostatične razelektritve za integrirana vezja in problemov, ki sem jih imel pri razvoju.

Simulator je sestavljen iz treh glavnih modulov in sicer kontrolne ploščice, nastavljivega visokonapetostnega napajalnika in visokonapetostnega stikala. Zaradi trenutne gospodarske situacije smo se tekom razvoja projekta odločili, da bomo pri razvoju simulatorja poskušali čimbolj zmanjšati stroške. Ta odločitev je pomenila dodaten razvoj in izdelavo 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, le-ta poteka čim bolj nemoteno.

Tekom projekta sem prišel do spoznanja, da bi izdelava simulatorja, ki bi ustrezal vsem standardom, zahtevala precej več časa in bistveno večji proračun.

Ključne besede: ESD, Elektrostatika, Simulator elektrostatične razelektritve, mikroelektronika

Abstract

In this final report is description of development of ESD simulator for microelectronics and problems experienced during development.

Simulator has been composed of three main modules: main control board, adjustable high-voltage power supply and high-voltage switch. Due to current economy situation we have decided to focus on low cost simulator production. This meant development and manufacturing of our own adjustable high-voltage power supply and high-voltage switch, instead of purchasing. All modules of the simulator were designed to be modular and swappable, that way upgrades or replacements can be made without major disruption.

During development I have come to conclusion that ESD simulator which would comply with requirements can not be made in specified time frame and defined budget.

Key words: ESD, Electrostatic, ESD Simulator, microelectronics

Vsebina

1	Uvod	1
2	Simulator elektrostatične razelektritve	5
2.1	Praktično usposabljanje	5
2.2	Zasnova simulatorja elektrostatične razelektritve	6
2.2.1	Moduli simulatorja	7
2.2.2	Nastavljivi visokonapetostni napajalnik	8
2.2.2.1	Regulacija napetosti	10
2.2.2.2	LM5155	10
2.2.2.3	UCC28740-Q1	10
2.2.2.4	LT3748	11
2.2.2.5	LT3757	12
2.2.2.6	LT8304	13
2.2.2.7	Ugotovitve	13
2.2.2.8	Krmilnik z mikrokrmilnikom	14
2.2.3	Visokonapetostno stikalo	16

2.2.3.1	Komercialno dobavljivi releji	16
2.2.3.2	Komercialna tranzistorska rešitev	20
2.2.3.3	Samogradnja tranzistorskega visokonapetostnega stikala	20
2.2.3.4	Mehanska rešitev	21
3	Sklep	27

Seznam slik

1.1	Osnovna shema ESD simulatorja.	2
2.1	Osnovna shema ESD simulatorja.	6
2.2	Shema blok diagrama.	7
2.3	Shema vezja v LTSpice.	12
2.4	Shema visokonapetostnega krmilnika z mikrokrmilnikom.	14
2.5	Shema programske kode visokonapetostnega krmilnika z mikrokrmilnikom.	15
2.6	Slika releja G61A proizvajalca Gigavac.	17
2.7	Slika releja serije H proizvajalca Meder.	18
2.8	Shema vezja za merjenje relejev.	18
2.9	Skakanje kontaktov pri releju proizvajalca Medler electronics.	19
2.10	Shema idejne zasnove krmiljenja tranzistorja preko "Switched Cap".	21
2.11	Shema stikala s solenoidom verzija 1.	22
2.12	Shema stikala s solenoidom verzija 2.	22
2.13	Shema stikala s servo motorjem verzija 1.	23

2.14 Shema stikala s servo motorjem verzija 2.	24
2.15 Potek napetosti po sklenitvi kontaktov pri servo stikalu verzija 1.	25
2.16 Potek napetosti po sklenitvi kontaktov pri servo stikalu verzija 1 povečano.	26

Seznam tabel

2.1	Ožji izbor transformatorjev	9
2.2	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
napetost	U	Volt	V
tok	I	Amper	A
upornost	R	Ohm	Ω

Natančnejši pomen simbolov ter njihovih indeksov je razviden iz ustreznih slik ali pa je pojasnjen v spremljajočem besedilu, kjer je simbol uporabljen.

1 Uvod

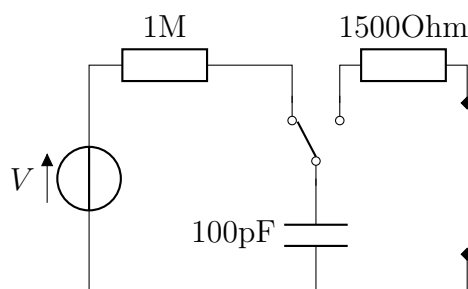
Praktično usposabljanje sem opravljal v podjetju Renishaw d.o.o., ki je hčerinsko podjetje Britanskega inžinerskega podjetja Renishaw p.l.c. Podjetje razvija integrirana vezja za specifično uporabo (ASIC).

Inžinerji v podjetju so razdeljeni na tri skupine:

- Načrtovalci: načrtujejo posamezne sklope integriranega vezja in karakterizirajo vezje s pomočjo simulacij.
- Oblikovalci sestavnice mask: postavijo posamezne komponente na površino integriranega vezja (podobno kot risanje tiskanih vezij).
- Testni inženirji: karakterizirajo narejena integrirana vezja, načrtujejo testna vezja in skrbijo za testiranje vezij za proizvodnjo.

Sam sem izvajal praktično usposabljanje v skupini testnih inženirjev. Tej skupini sem se sam pridružil že pred tremi leti. V tem času sem dobro spoznal vse postopke, zato sem lahko takoj začel z izvajanjem zasnove in izdelave projekta. Zadana mi je bila naloga zasnove in izdelave simulatorja elektrostatične razelektritve, ki se uporablja pri verifikaciji integriranih vezij. Zahteve so bile naslednje:

- Maksimalna izhodna napetost vsaj 15 kV DC,
- Nastavljanje izhodne napetosti med 250 V in 15 kV,
- Natančnost izhodne napetosti vsaj 3%,
- Zagotavljanje skladnosti z vsemi ustreznimi zahtevami na nivoju EU (pripaditev oznake CE).



Slika 1.1: Osnovna shema ESD simulatorja.

Za potrebe testiranja integriranih vezij so v podjetju potrebovali simulator elektrostatične razelektritve. Na začetku snovanja so bile zastavljene specifikacije maksimalne napetosti 15 kV in uporaba že narejenih modulov za nastavljeni visokonapetostni napajalnik ter visokonapetostno stikalo. Tekom projekta se je to spremenilo in prišlo do odločitve o lastnem načrtovanju nastavljivega visokonapetostnega napajalnika. Pri tem modulu sem moral premostiti kar nekaj tehničnih ovir. Največji sta bili zagotovitev skladnosti z vsemi ustreznimi zahtevami na nivoju EU ter zagotavljanje 15 kV izolacije med primarno in sekundarno stranjo.

Princip delovanja simulatorja elektrostatične razelektritve je dokaj enostaven. Nastavljeni visokonapetostni vir polni kondenzator, katerega se nato preko upora prazni skozi testiranec. Prvotni načrt je bil lastno navijanje primerne visokonapetostnega transformatorja. Po kar nekaj meritvah in izračunih se je to pokazalo za neizvedljivo, saj nismo uspeli zagotoviti želene napetosti in izolacije. Rezervni načrt je bil razdreti televizor s katodno cevjo in od tam vzeti transformator. Vendar pa smo se temu želeli izogniti zaradi nedostopnosti takih televizorjev, ki jih bo z letu vedno manj. Motilo me je pa tudi razlikovanje transformatorjev tako v podnožju kot tudi v karakteristikah, vgrajene diode v sekundarnem navitju še dodatno otežijo karakterizacijo transformatorja. Težave je povzročala tudi regulacija napetosti zaradi zagotavljanja potrebne galvanske izolacije. S pomočjo simulacij sem preizkusil kateri tipi napetostnih krmilnikov bi ustrezali. Tako so bili izločeni vsi neizolirani krmilniki. Krmilnik s povratno vezavo preko optičnega spojnika namreč ni zmožen pokrivati celotne izhodne napetosti od 250 V do 15 kV zaradi nelinearnosti, krmilnik s povratno vezavo preko pomožnega navitja pa se je v simulacijah zdel obetavno, vendar se je na koncu izkazal za neprimerne. Primeren je bil samo regulator, ki ima povratno vezavo preko primarnega navitja

in sicer s merjenjem zrcaljene napetosti z sekundarnega navitja na primarno. Po obsežnejših meritvah pa se je tudi ta izkazal za neprimerne. Na koncu je bilo potrebno izdelati regulator z mikrokrmilnikom, kateri prejema povratno vezavo preko galvansko ločenega analogno-digitalnega pretvornika. Po standardih MIL-STD-883K [15] in JS-001-2007 [14] mora biti visokonapetostno stikalo, katero prazni kondenzator skozi testiranec t.i. "bounce-less", se pravi ko sklence kontakt ga mora zadržati, namesto, da ga na kratko večkrat razklene in sklence. Standarda pa tudi predpisujeta obliko signala toka skozi testiranec, zato razbremenilno vezje t.i. "snubber" čez kontakte stikala ni primerna rešitev. Za nižje napetosti obstajajo releji, kateri vsebujejo živo srebro, čigar naloga je zadržati kontakt, ko se kontakta odbijeta. Vendar cena takšnega releja za 15 kV znaša okoli €2000. Kompromis je bil izdelava lastnega stikala, ki bo ustrezalo zahtevam.

2 Simulator elektrostatične razelektritve

2.1 Praktično usposabljanje

Načrtovalski del projekta sem izvajal 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 svoji delovni mizi sem imel nameščeno antistatično podlogo, toda to delovno mesto ni bilo primerno za izvajanje meritev (potencialno za izvajanje hitrih meritev) s katerimi je bil potrjen koncept. Za obsežnejše meritve sem imel na voljo merilno mesto, kjer je bilo na voljo več merilnih inštrumentov.

Pri svojem delu sem največ uporabljal:

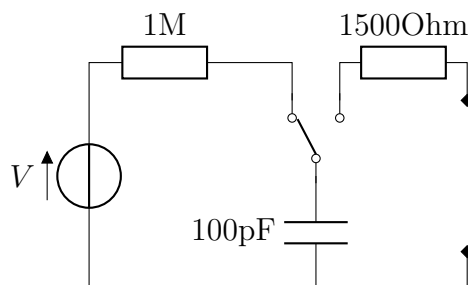
- Rigol DS1054Z: digitalni osciloskop.
- Acute ADP2100 : visokonapetostna diferencialna sonda.

- 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 z visoko napetostjo. Po posvetu z mentorjem sva sklenila razdeliti nalogo na posamezne module. Za vsak modul sem naprej pripravil blokovno shemo ter opis možnih rešitev, po pregledu le teh je sledilo nadaljnje simuliranje v LTSpice in po potrditvi rezultatov 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:



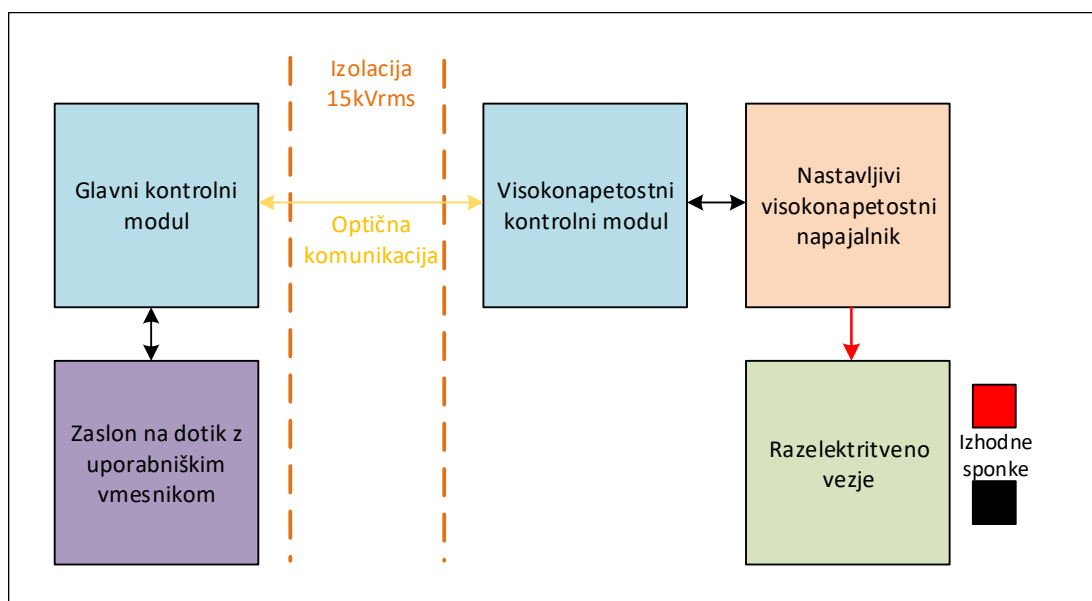
Slika 2.1: Osnovna shema ESD simulatorja.

Sestavljajo ga nastavljivi visokonapetostni izvir, polnilni upor, praznilni kondenzator, praznilni upor ter ne-preskakovalno (t.i. bounce-less) stikalo. Praznilni kondenzator se preko polnilnega upora napolni na želeno napetost, preko praznilnega upora pa se sprazni skozi testiranec. Izhodni tok mora ustrezati limitam, katere so podane v standardih: dvizni čas mora biti manjši kot 10 ns ter nominalni čas praznjenja kondenzatorja skozi kratek stik mora biti 150 ns, z maksimalnim odstopanjem ± 20 ns. Slednja zahteva pomeni, da smemo s stikalom, povezovalnimi žicami in konektorji smemo dodati maksimalno 20 pF parazitne kapacitivnosti, ker bo sicer izpraznitve skozi kratek stik odstopal od zahtevanega.

Pri načrtovanju visokonapetostnega izvira je prav tako potrebno biti previden, saj mora le-ta zagotavljati 15 kV izolacije med primarno in sekundarno stranjo.

2.2.1 Moduli simulatorja

Simulator je sestavljen iz 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 glede na ukaze glavnega kontrolnega modula, varnostno odklaplja napajanje nastavljivega napajalnika, ko le-ta ni v uporabi.
- Nastavljivi visokonapetostni napajalnik: glede na zahteve regulira enosmerno napetost od 250 V do 15 kV.

- Razelektritveno vezje: izprazni naboj iz praznilnega kondenzatorja preko testiranca.

2.2.2 Nastavljivi visokonapetostni napajalnik

Začel sem z nastavljivim visokonapetostnim napajalnikom, saj sem pričakoval, da se bom z njim največ zamudil in na koncu so se moja predvidevanja izkazala za pravilna. Z visokimi napetostmi nisem imel izkušenj, imel pa sem izkušnje z Cockcroft-Walton-ovim množilnikom napetosti. Zamislil sem si stikalni napajalnik, ki 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. Prvotna ideja je bila dodati samo nekaj stopenj, vendar sem hitro ugotovil, da kljub dodatku 60 stopenj ne bom mogel doseči 15 kV iz 250 V. V članku avtorja Hanington, G [13] je opisan podoben problem. Za napajanje nevtronskih generatorjev so potrebovali 100 kV DC, njihova rešitev za kapacitivne izgube je uporaba paralelnega napetostnega množilnika.

Po računih in simulacijah je rešitev izgledala obetavno. Navdušen nad rezultati sem se lotil risanja sheme in tiskanega vezja v Altium Designerju, kjer pa se je lahko hitro opazila kritična napaka. Za povratno zanko regulacije je bil uporabljen analogno-digitalni pretvornik s primerno dimenzioniranim pred-uporom in s tem je bila prekinjena galvanska izolacija med primarnim in sekundarnim navitjem. Na srečo je bila moja napaka diagnosticirana, preden smo dali tiskano vezje v izdelavo. Po pogovoru s sodelavci sem ugotovil, da bo transformator verjetno najboljša opcija za dvigovanje napetosti. Po izvedbi povpraševanj pri večjih ponudnikih elektronskih komponent sem prišel do zaključka, da primernega transformatorja ne bo možno kupiti, pač pa ga bo potrebno narediti. V preteklosti sem že navijal omrežne transformatorje, z načrtovanjem transformatorjev za navzgor (t.i. "flyback") pa nisem imel še nobenih izkušenj. Za začetek sem uporabil jedra RM10 iz materiala N87, ki so bila na zalogi. Predhodno sem izračunal, koliko ovojjev potrebujem na primarni strani, preden preide jedro v nasičenje pri 3 A. Navil sem transformator z razmerjem 1:10 in enega z razmerjem 1:20. Za meritve sem potreboval še napetostni delilnik za visokonapetostno sondo, saj je le ta narejena samo za 1.8 kV. Po specifikacijah ima vhodno upornost $2\text{ M}\Omega$, kar pomeni da z

pred-uporom $18\text{ M}\Omega$ dosežemo razmerje 1:10 in posledično maksimalno napetost 18 kV . Pri tem nisem dodal kapacitivne kompenzacije, zato je sonda bolj uporabna za indikacijo, kot pa za meritve. Tuljavo sem krmilil s pomočjo MOSFETA in namenskega krmilnika vrat UCC27517 [3] proizvajalca Texas Instruments. Leta zaradi izredno kratkega časa vzpona in padca, omogoča opravljanje meritve tudi pri višjih frekvencah. Maksimalni izhodni tok 4 A omogoča hitro odpiranje/-zapiranje MOSFETov z višjim U_{DS} . S signalnim generatorjem se lahko natančno kontrolira krmilnik. Meritve so opravljene pri napetostih 5 V , 10 V in 15 V ter spremenjenemu delovnem ciklu od 0.1% do 10% delovnega cikla. Ugotovil sem, da se pri delovnih ciklih nad 10% izhodna napetost ne spreminja več, oziroma transformator preide v nasičenje in posledično se zelo segreje. Omejitev toka je bila nastavljena 3 A , pa ni bilo tako pomembno zaradi paralelno vezanega elektrolitskega kondenzatorja s kapacitivnostjo $4700\text{ }\mu\text{F}$ in izhodnih sponk. Meritve so pokazale, da napetost U_{pp} lahko brez problema doseže zahtevanih 15 kV , vendar prihaja do preboja napetosti med navitji transformatorja. Odločil sem se narediti še dodatne meritve s tremi različnimi jedri. Pri iskanju jedra, sem si pomagal s skripto napisano v Matlabu, kateri mi glede na A_L in l_e parametre izračuna potrebno razmerje navojev ter maksimalni magnetilni tok. Izbrana so bila naslednja jedra: EFD 30/15/9, PM 50/39 in E 70/33/32 z 1.5 mm režo. Večja transformatorja sta bila precej obetavna, saj bi na tuljavniku lažje zagotavljali primerno izolacijo. Visoka A_L vrednost pomeni manjše število ovojjev. Iz radovednosti sem pomeril tudi dva transformatorja navzgor, katera sem sta prispela kot vzorca proizvajalca CoilCraft in sicer GA3459 [8] in GA3460, sta pa namenjena za 500 V . Po meritvah se je izkazalo, da transformatorja z velikim jedrom delujeta pod pričakovanji, transformatorja proizvajalca CoilCraft pa delujeta izredno dobro in skoraj dosejata zelene napetosti, najbolje pa se je izkazal mali transformator z EFD jedrom.

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

Tabela 2.1: Ožji izbor transformatorjev

Z rezultati meritev še nisem bil popolnoma zadovoljen, vendar sem se vseeno

odločil, vendar sem se odločil najprej ugotoviti način regulacije izhodne napetosti in si kasneje po potrebi prilagoditi parametre transformatorja.

2.2.2.1 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 številnih krmilnikov namenjenih za navzgor topologijo, sem med njimi začel iskanje najprimernejšega začel iskanje primernih. V ožji izbor sem uvrstil:

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

Tabela 2.2: Ožji izbor regulatorjev

2.2.2.2 LM5155

Krmilnik LM5155 [10] ima avtomatsko regulacijo frekvence v območju od 170 Hz do 100 kHz. Povratna vezava je izolirana preko optičnega spojnika, ki je prožen na izhodni strani preko napetostnega delilnika in Zenner diode. S spreminjanjem vrednosti upora povratne vezave se spreminja točka, pri kateri se proži optični spojnik. Kljub ponovnim izračunom in dvojnemu preverjanju sheme ta krmilnik ni deloval v simulacijskem okolju, dolg čas dobave pa je onemogočil prototipni test.

2.2.2.3 UCC28740-Q1

UCC28740-Q1 [9] deluje po enakem principu kot že omenjeni LM5155. Ta krmilnik je namenjen delovanju usmerjeni omrežni napetosti, saj od tam dobi podatek

o referenčni frekvenci. Takšen krmilnik ni uporaben, saj se nastavljeni visokonapetostni regulator napaja iz 24 V DC.

2.2.2.4 LT3748

Krmilnik elegantno rešuje moj problem, saj ne potrebuje dodatne povratne ve-zave, 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 $V_{FLBK} = (V_{OUT} + V_F + I_{SEC} * ESR) * N_{PS}$. Pri tem je V_{FLBK} zrcaljena napetost, V_F pragovna napetost iz-hodne diode, I_{SEC} tok na sekundarnem navitju, ESR skupna impedanca vezja na sekundarni strani in N_{PS} razmerje navojev med primarnim in sekundarnim navitjem. Ta napetost steče proti masi preko upora za nastavitev napetosti R_{FB} in interno zaporedno vezanim R_{REF} , točka med uporoma je vezana na inverti-rajochi vhod ojačevalnika napake z referenco V_{BG} 1.223 V [4]. 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:

$$L_{PRI} \geq \frac{(V_{OUT} + V_{F(DIODE)}) * R_{SENSE} * t_{Settle(MIN)} * N_{PS}}{V_{Sense(MIN)}}$$

$$V_{SENSE(MIN)} = 15 \text{ mV}$$

$$t_{SETTLE(MIN)} = 400 \text{ ns}$$

$$N_{PS} = \text{razmerje ovojev med primarnim in sekundarnim navitjem}$$

Oziroma (uporabi se tisto vrednost, katera je večja):

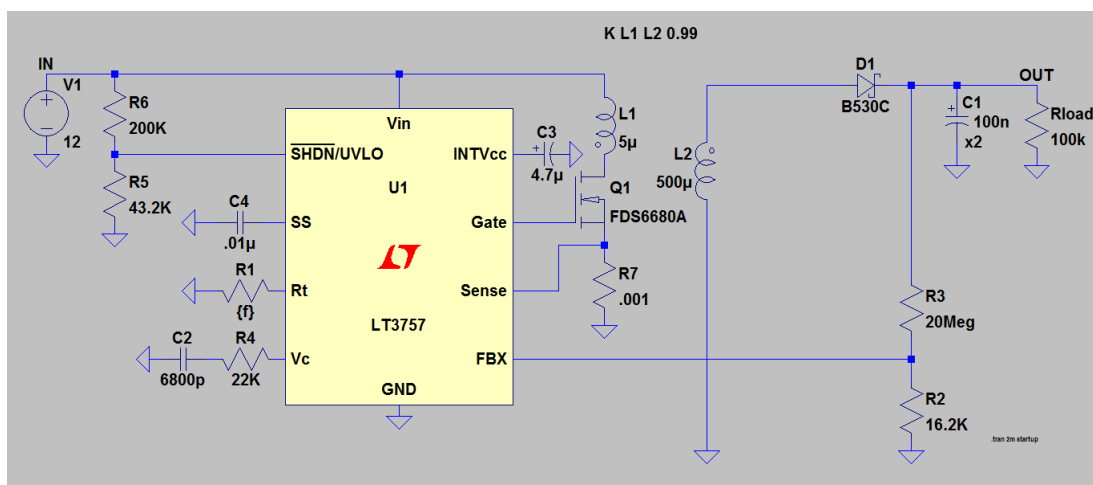
$$L_{PRI} \geq \frac{V_{IN(MAX)} * R_{SENSE} * t_{ON(MIN)}}{V_{SENSE(MIN)}}$$

$$t_{ON(MIN)} = 250 \text{ ns}$$

Pri uporabljenih transformatorjih za katodne cevi je vrednost primarnega na-vitja okoli desetkrat manjša, kar pojasni nepravilno delovanje regulatorja. Ta je namreč na vrata N kanalnega MOSFETA pošiljal impulze širine 55 μ s, kolikor je najdaljši čas odprtega kanala. Kljub spremembam vrednosti R_{FB} se ta čas ni spreminjal.

2.2.2.5 LT3757

Krmilnik LT3757 proizvajalca Linear Technology [11], je krmilnik pri kateremu se nastavlja obratovalno frekvenco z enim uporom, ki ustreza vrednostim med $140\text{ k}\Omega$ in $10.5\text{ k}\Omega$ v razponu med 100 kHz in 1 MHz . Napetost se nastavlja z napetostnim delilnikom na sekundarni strani, da je pri želeni izhodni napetosti izhod napetostnega delilnika enak 1.6 V . Na spletni strani proizvajalca je bilo možno dobiti shemo vezja regulatorja, kateremu sem spremenil vrednosti določenih elementov po lastnih zahtevah. Po nekaj simulacijah se je izkazalo, da je omenjeni krmilnik primeren za projekt, saj sem uspel nastaviti izhodno napetost med 300 V in 15 kV .



Slika 2.3: Shema vezja v LTSpice.

Problem tega krmilnika pa je varnost, ker je sekundarno navitje visokonapetostnega transformatorja električno povezano z nizkonapetostno stranjo. Za zagotavljanje primerne izolacije bi moral napajalnik modula zdržati 15 kV , kar ponovno pomeni načrtovanje takega napajalnika. Napajalniki z najvišjo prebojno trdnostjo so namreč s certifikatom IEC 60601-1, ki zagotavlja najvišjo prebojno trdnost 4000 VAC .

2.2.2.6 LT8304

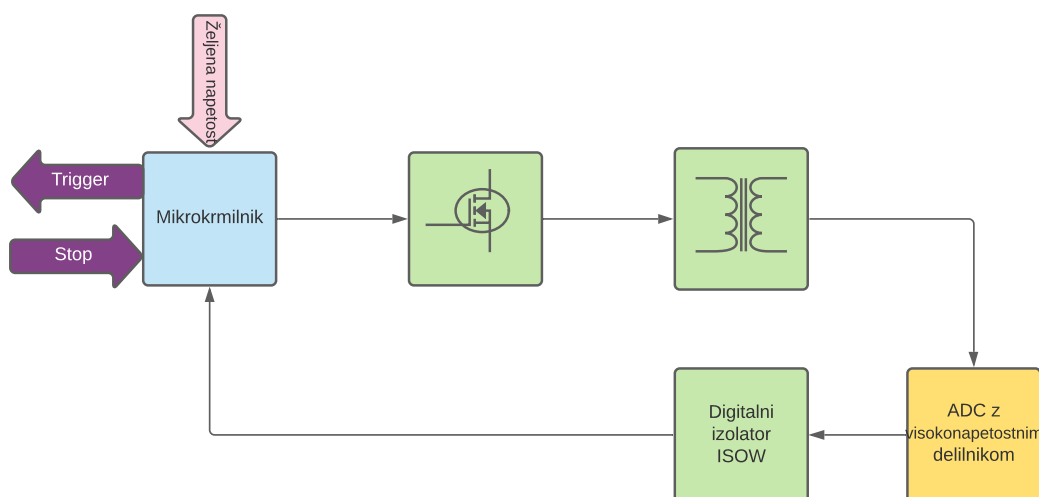
LT8304 proizvajalca Linear Technology [6] deluje po podobnem principu kot LM3748 z razliko, da ima vgrajen MOSFET in posledično manjšo izhodno moč. Simulacije so bile obetavne vendar sem jih vzel z rezervo, zaradi netočnosti modela transformatorja. Vseeno sem se odločil narediti prototipno ploščo s krmilnikom in pripadajočimi komponentami. Vezje je delovalo po pričakovanjih, vendar se je po približno 20 sekundah pokadilo iz krmilnika. Mislil sem, da je to bil samo problem z dotičnim krmilnikom in sem uporabil novega. Tudi pri temu se je pokadilo. Omenjen 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 s 4700 μF , zaradi katerega napajalnik ni pokazal napetostnih špic, zaradi katerih je bila presežena izhodna moč. Drugi del, kjer bi lahko prihajalo do napake je na pinu SW, kateri je ponor internega MOSFETA. Lahko, da inducirana napetost na primarnem navitju je višja od U_{DSMAX} in posledično poškoduje čip. Podatkovni list narekuje uporabo Schottky in Zenner diode s pragovno napetostjo $V_{Zenner(MAX)} \leq 145V - V_{IN(MAX)}$ proti napajalni liniji za odvajanje prenapetostnih špic. V mojem primeru sem uporabil Zenner diodo s 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.

2.2.2.7 Ugotovitve

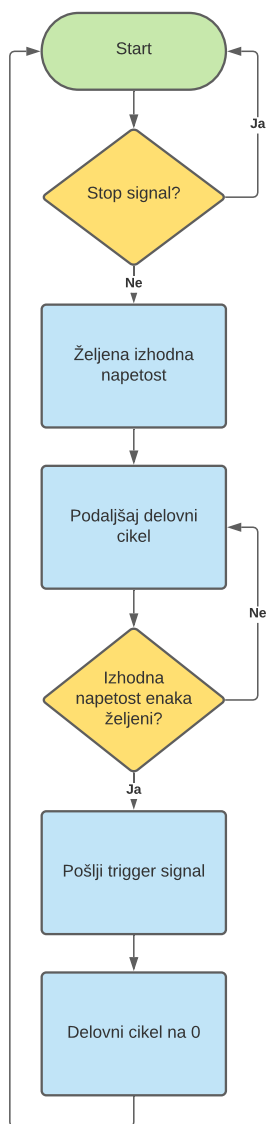
Po vseh simulacijah se je izkazalo, da ne bo mogoče uporabiti že narejenega krmilnika, vendar bo potrebno tudi krmilnik načrtovati od začetka. Možna rešitev je uporaba krmilnika LT3757, vendar namesto napajanja z omrežnim napajalnikom bi potrebno bilo uporabiti baterijsko napajanje. Baterije bi se polnile, ko je visokonapetostni napajalnik izklopljen, ob vklopu le-tega se baterije galvan-sko loči od polnilnika s pomočjo odklopnika kateri ima prebojno napetost vsaj 15 kV. Takšen odklopnik zopet pomeni nekaj zelo specifičnega in dragega ali pa samoizdelavo.

2.2.2.8 Krmilnik z mikrokrmilnikom

Edina možnost, ki nam je še ostala je bila izdelava visokonapetostnega krmilnika z mikrokrmilnikom. Krmilnik bo opravljal le vlogo krmiljenja visokonapetostnega napajalnika. Vhodni signal bo prejel preko serijske povezave, povratna vezava bo pa preko analogno-digitalnega pretvornika, kateri bo na mikrokrmilnik povezan preko optičnega izolatorja za digitalne povezave. Mikrokrmilnik je bil uporabljen STM32 iz družine F4, saj njegove operacije niso tako kritične in je lahko uporabljen praktično kateri koli mikrokrmilnik. Z STM Cube razvojnim okoljem sem imel izkušnje že od prej, razvojna ploščica STM NUCLEO F4 je bila na zalogi v podjetju. Analogno-digitalni pretvornik tudi ni bil kritičen, saj za koncept nismo rabili neke visoke natančnosti, galvansko ločitev med visokonapetostnim in nizkonapetostnim delom je zagotavljal digitalni izolator z vgrajenim izolatorjem napajanja iz družine ISOW proizvajalca Texas Instruments.



Slika 2.4: Shema visokonapetostnega krmilnika z mikrokrmilnikom.



Slika 2.5: Shema programske kode visokonapetostnega krmilnika z mikrokrmilnikom.

Programska koda preveri, če glavni krmilnik še pošilja STOP signal, če ga ne prebere željeno napetost preko serijske povezave in nastavi delovni cikel na najkrajšega. Dokler izhodna napetost ne doseže nastavljenega, počasi povečuje delovni cikel. Ko izhodna napetost doseže nastavljenega, pošlje glavnemu krmilniku TRIGGER signal, se pravi signal kateri sproži praznilni rele in postavi delovni cikel na 0. Počasno dviganje napetosti nam omogoča počasnejše polnjenje kondenzatorja in posledično potrebujemo manjši transformator. S tem krmilnikom sem uspel krmiliti izhodno napetost, bilo pa bi potrebno na fino nastaviti PID parametre.

2.2.3 Visokonapetostno stikalo

Standard zahteva "bounce-less" stikalo stikalo, katero ko sklene kontakt, ga ne razklene več. V preteklosti so se prodajali releji, kateri so imeli kontakte v kapsuli in notri malo živega srebra. Živo srebro je poskrbelo, da v času ko sta bila kontakta odbita je tok lahko še vedno tekkel preko živega srebra. Vendar je zaradi direktive RoHS je izbira takšnih relejev zelo omejena.

2.2.3.1 Komerzialno dobavljivi releji

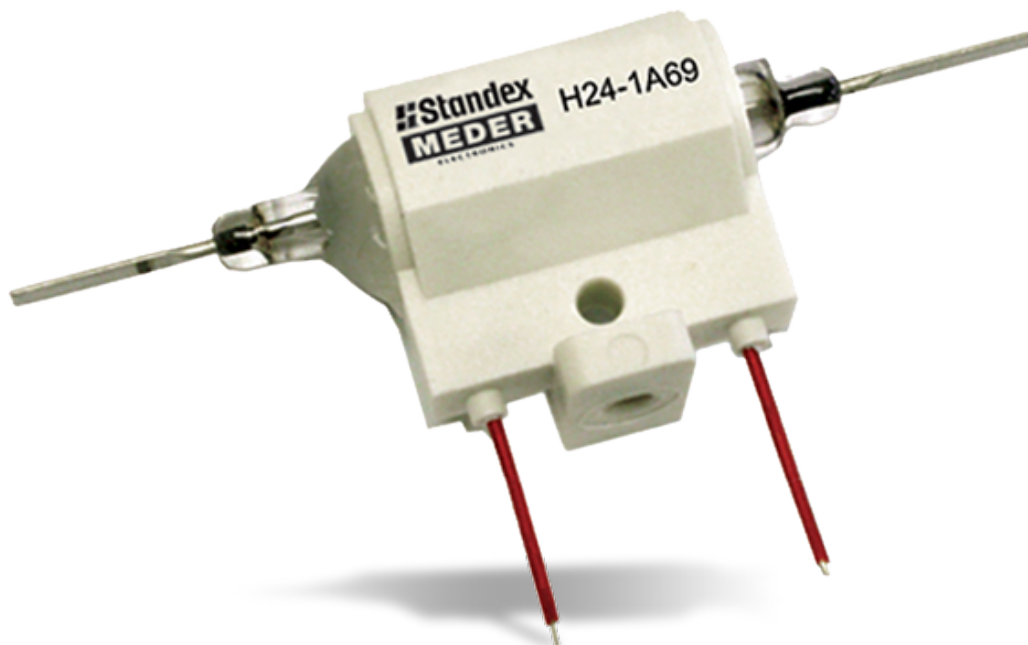
Prvotna izbira je bil model G61A proizvajalca Gigavac [7], kateri se tudi nahaja v simulatorjih elektrostatične razelektritve, saj je v specifikacijah poudarjeno: Odličen za praznjenje kondenzatorjev ter učinkovito operira brez skakanja kontaktov.



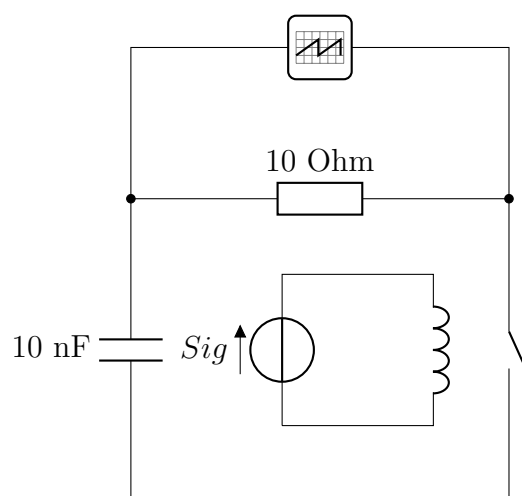
Slika 2.6: Slika releja G61A proizvajalca Gigavac.

Vendar se cena takšnega 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 [5] (sedaj Standex electronics) kateri ima v specifikacijah navedeno "Zamenjava za mokre releje z živim srebrom". Pri ceni okoli 50€ se je to zdelo predobro, da bi bilo res.

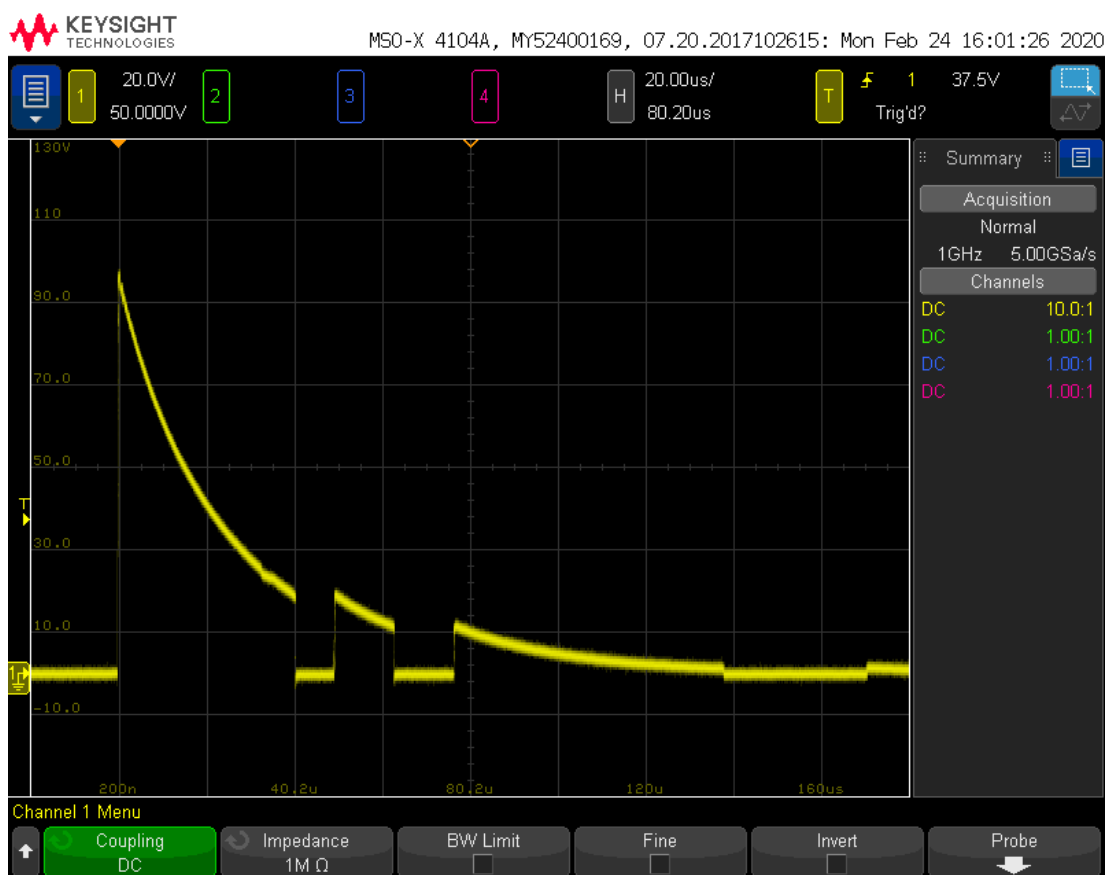
Testi so pokazali točno to, kar smo pričakovali: skakanje kontaktov.



Slika 2.7: Slika releja serije H proizvajalca Meder.



Slika 2.8: Shema vezja za merjenje relejev.



Slika 2.9: 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 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 odstopanja časovne konstante. Iz radovednosti sem naredil meritve še pri višjih napajalnih napetostih vzbujevalne tuljave, kjer sem predpostavljal, da bo magnetno polje dovolj močno, da se kontakt ne

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

2.2.3.2 Komercialna tranzistorska rešitev

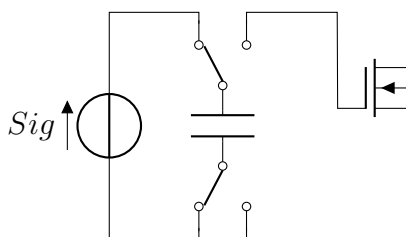
Mojo pozornost je pritegnil tudi izdelek podjetja Behlke, katero se ukvarja z visokonapetostno in močnostno elektroniko. Izdelek je bil HTS 181-02-C [1] hitro visokonapetostno tranzistorsko stikalo. Dotični model ima maksimalno napetost 18 kV ter maksimalno tokovno špico 12 A. Malo manj vzpodbudne so številke za čas naraščanja saj bi v naših primerih 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. Vendar sem našel sliko odprtega stikala, kar mi je porodilo idejo o samo-izdelavi tranzistorskega visokonapetostnega stikala.

2.2.3.3 Samogradnja tranzistorskega visokonapetostnega stikala

Pozorno opazovanje slik visokonapetostnih stikal proizvajalca Behlke je prineslo ugotovitve, da je stikalo sestavljeno iz dveh delov: krmilni del in visokonapetostni del. Krmilni del ni zanimiv, vendar visokonapetostni je zelo, saj se vidi kako je zaporedno nanizanih okoli 10 tranzistorjev. Če predpostavimo, da imajo vsi tranzistorji enake karakteristike in se v istem času začnejo odpirati, bo napetost naraščala na vseh enako in skupni dvizni čas bo enak dviznemu času tranzistorja. Prva ovira je bila izbira polprevodnikov, kateri so primerni za nalogo. IGBTji IXYL60N450 [2] proizvajalca LittleFuse so se na papirju izkazali za najboljše, saj imajo maksimalno V_{CES} 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 dviznim časom 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 dviznega časa spadajo ti tranzistorji pod "izdelke z dvojnimi namenom" in za nakup le teh potrebno podpisati pogodbo o nerazkritju informacij. Vendar mi je dalo misliti, če se uporabi najbolj idealne komercialne tranzistorje, jih odstrani iz ohišja in zbondira na tiskano vezje. S tem bi lahko dosegli najnižje vrednosti

parazitnih kapacitivnosti in induktivnosti. 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 najvišjega IGBTja proti masi 11.25 kV. S primernimi visokonapetostnimi stikali bi lahko krmilil na način s preklopi kondenzatorja t.i. "Switched Cap".



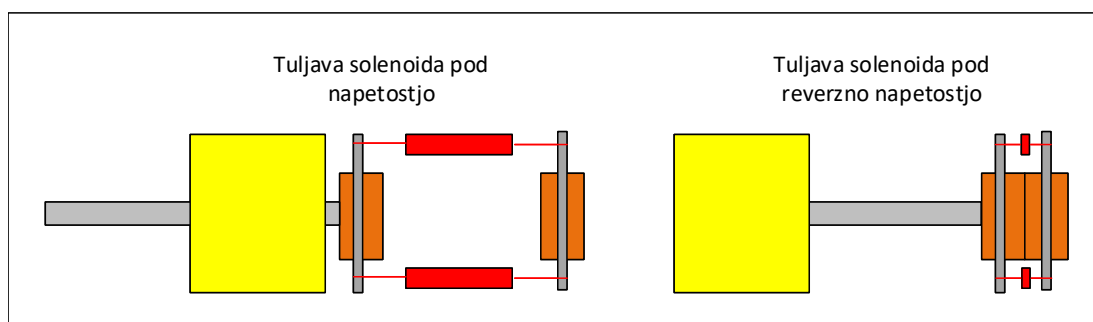
Slika 2.10: Shema idejne zasnove krmiljenja tranzistorja preko "Switched Cap".

Naletel sem pa na članek [12], 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 pristala celotna napetost na njemu, kar bi seveda pomenilo preobremenitev le tega.

2.2.3.4 Mehanska rešitev

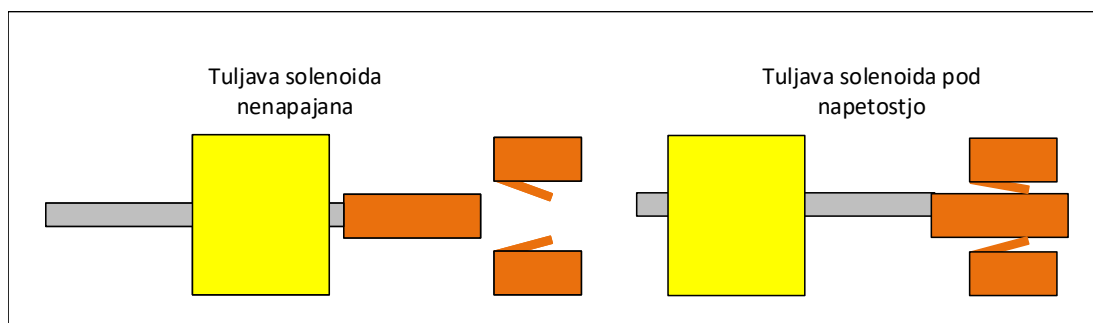
V iskanju nadaljnjih rešitev to pomeni mehanično rešitev in samo eno stikalo ne zaporedne ali vzporedne vezave stikal. Lotili smo se hitrih prototipov štirih stikal:

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



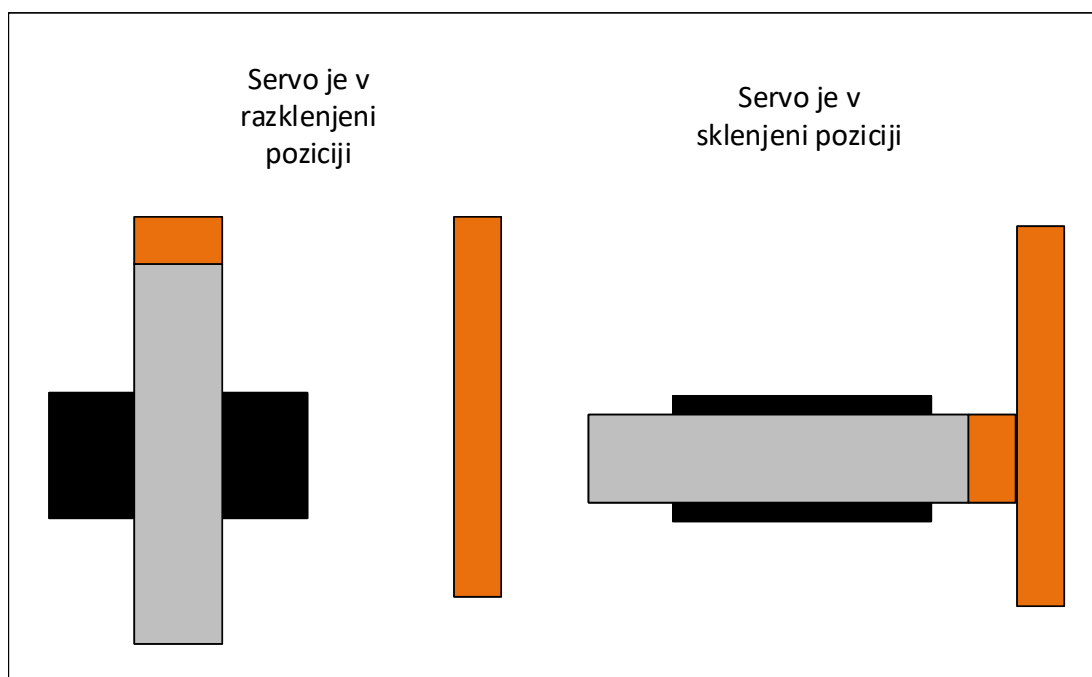
Slika 2.11: Shema stikala s solenoidom verzija 1.

2. Solenoid kateri porine kontakt in ga jezička ujameta.



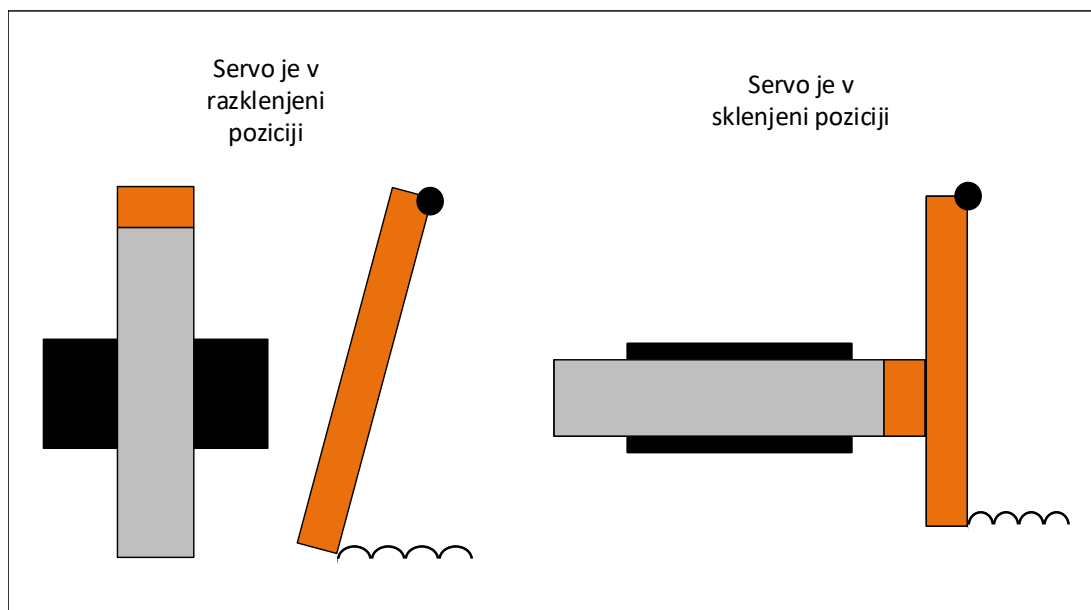
Slika 2.12: Shema stikala s solenoidom verzija 2.

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



Slika 2.13: Shema stikala s servo motorjem verzija 1.

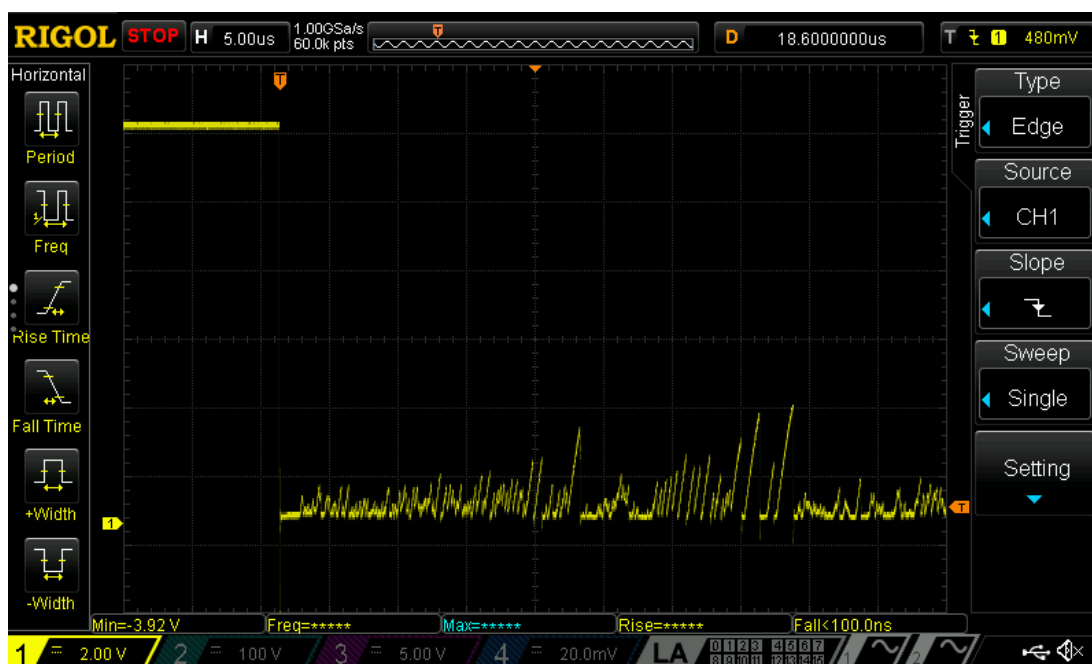
4. Servo motor se zasuče in pritisne na kontakt kateri je na vzmeti.



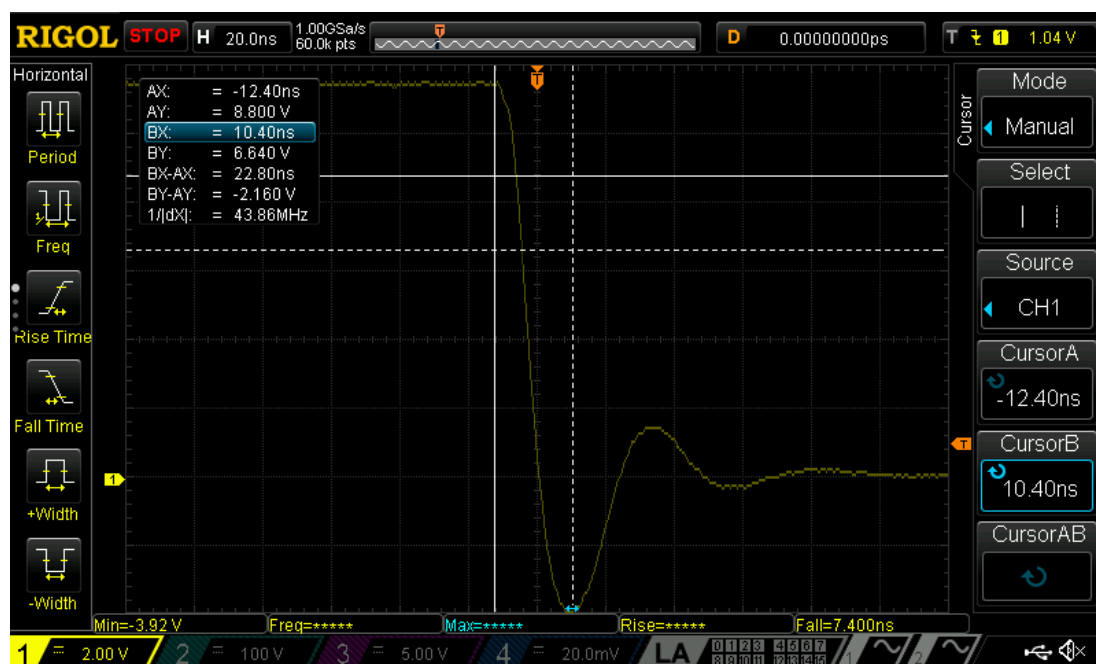
Slika 2.14: Shema stikala s servo motorjem verzija 2.

Za solenoid smo na začetku uporabili manjši model, kateri je bil namenjen konstantnemu delovanju pri 12 V, za hitrejšo delovanje in večjo silo 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 zadostne moči za premikanje, posebno če bi se moral še upirati sili vzmeti. Za hitri preizkus mojih tez sem naredil solenoid na tuljavniku od transformatorja.

S stikalom 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 dvizni čas 10 ns kjer se vseeno pojavljajo manjše prekinitve po sklenitvi kontaktov. Skrbi me pa tudi obraba in oksidacija kontaktov. Rešitev bi bila zaprtje celotnega stikala v vakuumsko komoro ali še bolje v plin SF_6 kateri ima zelo visoko prebojno trdnost.



Slika 2.15: Potek napetosti po sklenitvi kontaktov pri servo stikalu verzija 1.



Slika 2.16: Potek napetosti po sklenitvi kontaktov pri servo stikalu verzija 1 povečano.

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

3 Sklep

Kljub temu, da se je že ob zasnovi projekta vedelo, da bo celoten projekt izjemno težavno izpeljati v predlaganem časovnem okvirju in proračunu, nismo pričakovali takšnih zapletov. Večji del problemov je predstavljala zahtevana visoka napetost, saj se komercialno dobavljive komponente dobijo do okoli 3 kV, za višje napetosti pa postanejo komponente že težje dobavljive in posledično dražje. Ogromno preglavic je povzročal tudi rele brez skakanja, saj se načeloma uporabljajo za nizke napetosti. Poleg tega vsebujejo nevarne substance, kar jih naredi še bolj redke. Kljub temu sem z ugotovitvami prišel do kar nekaj uporabnih rešitev, katere bom še bolj raziskal pri izdelavi diplomske naloge. Do delujočega ESD simulatorja bi lahko prišel z uporabo komercialnega visokonapetostnega nastavljivega napajalnika proizvajalca Applied Kilovolts in visokonapetostnim relejem namenjenim praznjenju kapacitivnih zalogovnikov proizvajalca Gigavac, vendar bi taka rešitev podražila projekt za vsaj 5000€. Druga možnost je lastni razvoj visokonapetostnega nastavljivega napajalnika in visokonapetostnega releja, katera bi približno enako podražila projekt toda bi bilo potrebnih 400 delovnih ur več. V podjetju pa tudi nimamo izkušenj s tako visokimi napetostmi, saj se ukvarjamo z mikroelektroniko.

Literatura

- [1] *Fast High Voltage Transistor Switches*, 03 2013. Rev. 1.
- [2] *High Voltage XPT IGBT*, 11 2013. Rev. 1.
- [3] *4-A/4-A single-channel gate driver with 5-V UVLO and 13-ns prop delay in SOT-23 package*, 12 2014. Rev. D.
- [4] *100V Isolated Flyback Controller*, 02 2015. Rev. B.
- [5] *H Series Reed Relays*, 01 2015. Rev. 01.
- [6] *100VIN Micropower No-Opto Isolated Flyback Converter with 150V/2A Switch*, 02 2017. Rev. A.
- [7] *35kV SPST-NO HV Relay*, 06 2017. Rev. 2.
- [8] *For Linear Technology LT3751 Capacitor Charger Controller*, 01 2017. Rev. A.
- [9] *Constant-Voltage Constant-Current Flyback Controller Using Optocoupled Feedback*, 03 2018. Rev. C.
- [10] *2.2-MHz wide VIN, 1.5-A MOSFET driver, non-synchronous boost controller*, 01 2021. Rev. C.
- [11] *Boost, Flyback, SEPIC and Inverting Controller*, 01 2021. Rev. G.
- [12] CONTINETTI, R. E., CYR, D. R., AND NEUMARK, D. M. Fast 8 kv metal-oxide semiconductor field-effect transistor switch. *Review of Scientific Instruments* 63, 2 (1992), 1840–1841.

- [13] HANINGTON, G. Using parallel high voltage multipliers for 100kv downhole neutron generator power supplies. *Additional Conferences (Device Packaging, HiTEC, HiTEN, & CICMT) 2014* (01 2014), 000006–000012.
- [14] For electrostatic discharge sensitivity testing human body model (hbm) - component level. Standard, May 2017.
- [15] Microcircuits test standards. Standard, 06 2013.