

Raspodjela struje atmosferskog pražnjenja u sustavima zaštite od djelovanja munje

Horvat, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:292280>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-27**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

Sveučilišni studij

**RASPODJELA STRUJE ATMOSFERSKOG
PRAŽNENJA U SUSTAVIMA ZAŠTITE OD
DJELOVANJA MUNJE**

Diplomski rad

Domagoj Horvat

Osijek, 2021.

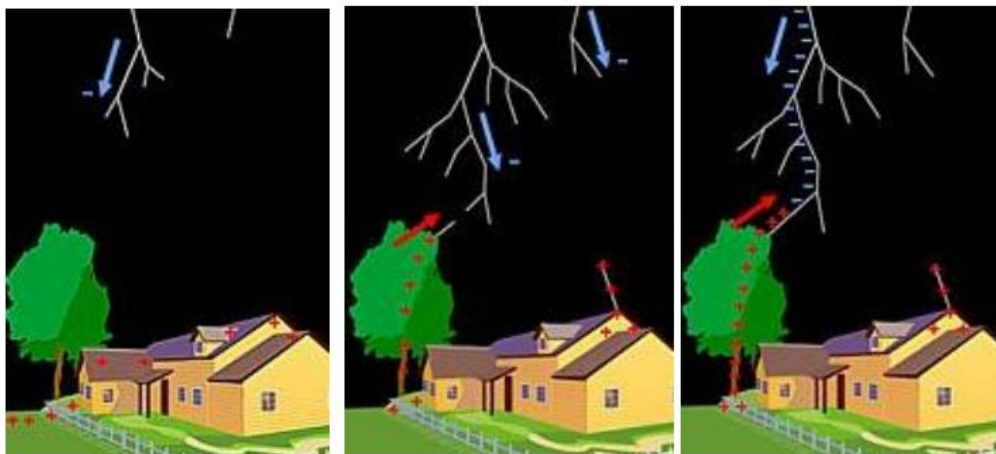
SADRŽAJ:

1. UVOD	1
1.1. Zadatak diplomskog rada	2
2. PREGLED LITERATURE	3
3. TEHNIČKA SVOJSTVA SUSTAVA ZA ZAŠTITU OD MUNJE	4
3.1 Odjeljci tehničkog propisa	4
3.1.1 Opće odredbe.....	5
3.1.2 Tehnička svojstva sustava.....	5
3.1.3 Građevni proizvodi za ugradnju u sustav zaštite od munje	6
3.1.4 Projektiranje sustava zaštite od munje.....	6
3.1.5 Izvođenje i uporabljivost sustava zaštite	7
3.1.6 Održavanje sustava zaštite.....	8
3.1.7 Prijelazne i završne odredbe	9
3.2. Prilozi Tehničkog propisa	9
3.2.1 Prilog A: Proizvodi za sustave.....	9
3.2.2 Prilog B: Projektiranje sustava	10
3.2.3 Prilog C: Izvođenje i održavanje sustava.....	10
3.3 Sustav za zaštitu od udara munje	12
3.3.1 Vanjski sustav za zaštitu	12
3.3.1.1 Sustav hvataljki.....	13
3.3.1.2 Sustav odvoda	14
3.3.1.3 Sustav uzemljivača.....	15
3.3.2 Unutarnji sustav za zaštitu.....	17
4. ZNAČAJKE DJELOVANJA MUNJE	19
4.1 Karakteristike i parametri munje	19
4.1.1 Tjemena vrijednost struje munje	21
4.1.2 Strmina struje munje.....	21
4.1.3 Naboj struje munje.....	21
4.1.4 Kvadratni impuls struje munje i specifična energija.....	22
4.1.5 Vremenski parametri struje munje.....	22
4.2 Nadomjesna shema struje udara munje	24
4.3 Vrste djelovanja munje	25
4.3.1 Električno i magnetsko djelovanje.....	25
4.3.2 Mehaničko djelovanje.....	26

4.3.3 Termičko djelovanje	26
4.3.4 Optičko djelovanje.....	27
4.3.5 Akustično djelovanje	27
4.3.6 Djelovanje na čovjeka	27
4.4 Procjena rizika udara munje	28
5. SIMULACIJA I REZULTATI	31
5.1 Udar munje u vrh konstrukcije sa štapnim uzemljivačima	32
5.1.1 Prvi pozitivni impuls	32
5.1.2 Prvi negativni impuls	35
5.1.3 Naknadni negativni impuls	37
5.2 Udar munje središnji dio konstrukcije sa štapnim uzemljivačima.....	38
5.2.1 Prvi pozitivni impuls	39
5.2.2 Prvi negativni impuls	41
5.2.3 Naknadni negativni impuls	43
5.3 Udar munje u rub konstrukcije bez štapnih uzemljivača	44
5.3.1 Prvi pozitivni impuls	45
5.3.2 Prvi negativni impuls	47
5.3.3 Naknadni negativni impuls	49
6. ZAKLJUČAK.....	51
7. SAŽETAK	54
8. ABSTRACT	55
9. LITERATURA	56
10. ŽIVOTOPIS.....	58

1. UVOD

Munje predstavljaju snažna pražnjenja atmosferskog elektriciteta koja se očituju vidljivim bljeskom i zvučnim valom, odnosno gromom. Nastaju uslijed razdvajanja naboja u oblacima te stvaranja i pojačavanja električnog polja, pri čemu se javlja razlika potencijala dovoljna za svladavanje otpora zraka. Može se očitovati kao munja u oblaku, munja između oblaka i zraka te munja između oblaka i zemlje. Munja oblak-zemlja predstavlja najčešći oblik munje, kojeg karakterizira lavina elektrona (predvodnik) koja se silaznim kanalom stepeničasto spušta prema zemlji. Točka udara munje se određuje s obzirom na udarnu udaljenost, koja ovisi o količini elektriciteta predvodnika. Na njoj dolazi do glavnog pražnjenja te elektroni počnu teći prema tlu. Na zemlji se inducira suprotan, pozitivan naboj te dolazi do povratnog udara prema oblaku, čime se stvara ionizirani kanal, odnosno vodljiva staza munje. [1]



Slika 1.1: Atmosfersko pražnjenje oblak-zemlja [2]

Munje karakteriziraju temperature od 30000 K te struje do 30 kA. Njihov udar u loše štćene građevinske objekte ili elektroenergetska postrojenja može uzrokovati veliku materijalnu štetu i predstavljati opasnost za čovjeka. Od prirodnih katastrofa koje su rezultat atmosferskih pojava jedino poplave uzrokuju veću materijalnu štetu i ljudske žrtve od udara munje. S obzirom da ne postoje metode i uređaji koji mogu utjecati na prirodne vremenske pojave u tolikoj mjeri da bi se uspješno spriječilo izbijanje munja, potrebno je projektirati sustav zaštite objekata kako bi se u potpunosti uklonile ili minimizirale moguće opasnosti po ljude, objekte i opremu. [1]

Zbog toga je, na temelju Zakona o prostornom uređenju i gradnji, Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva donijelo „Tehnički propis za sustave zaštite od djelovanja munje na građevinama“. Njime se, prema literaturi [3]: „propisuju tehnička svojstva sustava za

zaštitu od djelovanja munje na građevinama, zahtjevi za projektiranje, izvođenje radova, uporabljivost, održavanje i drugi zahtjevi za sustav, te tehnička svojstva i drugi zahtjevi za proizvode namijenjene za ugradnju u sustav“. Simulacijom u programu XGSLab primijeniti će se tehnička svojstva određena propisom za konstrukciju vanjskog sustava za zaštitu kako bi se proučilo djelovanje atmosferskog pražnjenja.

1.1. Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu će se navesti i objasniti propisana tehnička svojstva sustava za zaštitu od djelovanja munje, njihova primjena te na računalnom modelu u programu XGSLab simulirati djelovanje sustava za zaštitu prilikom udara atmosferskog pražnjenja na različitim mjestima na projektiranom građevinskom objektu. Analizirat će se raspodjela struje u sustavu za zaštitu od djelovanja munje za različite frekvencije struje atmosferskog pražnjenja te uspoređivati dobiveni rezultati različitih simulacija.

2. PREGLED LITERATURE

U radu [1] je opisana funkcija i dijelovi sustava za zaštitu od munje i proveden postupak ispitivanja ispravnosti sustava. U literaturi [2] objašnjen je nastanak ioniziranog kanala munje oblak-zemlja. U literaturi [3]-[5] su propisuju i objašnjavaju tehnička svojstva, zahtjevi za korištenje, projektiranje i održavanje sustava za zaštitu od munje i njegovih sastavnica, norme na kojima su oni temeljeni te zakonska regulativa vezana uz zaštitu od djelovanja munje. U literaturi [6] provodi se analiza Tehničkog propisa, ekonomske opravdanosti, rizika i tijeka ugradnje sustava za zaštitu. Literatura [7]-[8] predstavlja važeće norme u kojima se propisuju zaštitne mjere, postupci i kriteriji za zaštitu građevina, dimenzije i uvjeti za sustav zaštite i njegove dijelove. U literaturi [9] je prikazan princip korištenja sabirnice za izjednačavanje potencijala u kućanstvu. Norma iz literature [10] objašnjava djelovanje munje, njezine parametre, moguće opasnosti te predstavlja metodu simulacije djelovanja munje pomoću ispitnog generatora. U literaturi [11]-[12] objašnjavaju se parametri struje munje i korištenje nadomjesne sheme za proučavanje struje munje u umjetno stvorenim uvjetima. U radu [13] se korištenjem simulacijskog programa zasnovanog na hibridnoj metodi proučava djelovanje struje munje u frekvencijskoj domeni. Literatura [14] objašnjava nadomjesnu shemu ispitnog strujnog generatora. Mogući izravni i neizravni načini udara munje u čovjeka su objašnjeni u literaturi [15]. U radu [16] izvršena je usporedba proračuna procjene rizika sa rezultatima sustava za lociranje atmosferskih pražnjenja u svrhu kvalitetnijeg odabira sustava za zaštitu od munje.

3. TEHNIČKA SVOJSTVA SUSTAVA ZA ZAŠTITU OD MUNJE

Sigurnost, ispravnost i pouzdan rad instalacije su važne stavke koje mora imati sustav za zaštitu od munje kako bi se omogućilo sigurno korištenje građevine koju štiti. Zbog toga se u Republici Hrvatskoj primjenjuju propisi i zakoni koji su vezani za gradnju, sigurnost proizvoda, normizaciju, ocjenjivanje sukladnosti i akreditaciju. Među njima je za projektante, izvođače radova te nadzorne inženjere najvažniji „Tehnički propis za sustave zaštite od djelovanja munje na građevinama“, objavljen u Narodnim Novinama koji je službeno stupio na snagu 30. rujna 2008. godine. [3]

Tehnički propis je dokument kojim se propisuju zahtjevi za projektiranjem, građenjem, korištenjem i održavanjem građevine na način da se zahtjevi daju izravno ili pozivanjem na normu, uputstvo za uporabu, tehničku specifikaciju ili uključivanjem sadržaja dokumenata. Tehnički propis međutim ne određuje izravno tehničke veličine dijelova sustava za zaštitu već definira procedure rada, od zahtjeva za proizvode, projektiranja, izvedbe projekta do održavanja građevine i sustava u skladu sa drugim propisima i zakonima Republike Hrvatske. Oslanja se na hrvatske norme pa je stoga važno njihovo temeljito poznavanje. Ukoliko se norme promijene, Tehnički propis se ne će morati mijenjati već će se mijenjati samo prilog sa popisom normi u upotrebi. Propis dopušta i uporabu drugih normi ukoliko osiguravaju veću ili jednaku sigurnost i zaštitu ljudi i materijalnih dobara. [4]

3.1 Odjeljci tehničkog propisa

Tehnički propis dijeli se na sedam glavnih odjeljaka i to: „

- Opće odredbe
- Tehnička svojstva sustava
- Proizvodi za ugradnju u sustav zaštite od munje
- Projektiranje sustava zaštite od munje
- Izvođenje i uporabljivost sustava zaštite od munje
- Održavanje sustava zaštite od munje
- Prijelazne i završne odredbe“ [3]

3.1.1 Opće odredbe

U općim odredbama Tehničkog propisa određeno je na koje se objekte i građevine propis primjenjuje te za koje nije važeći. U općim odredbama se navodi da vrsta sustava zaštite od munje i njegovo postavljanje ovise o procjeni rizika te se navode granične prihvatljive vrijednosti te procjene ispod kojih sustav za zaštitu neće biti potreban (1:100 000 za rizik gubitka ljudskog života, 1:1000 za ostale gubitke). [3]

Također se navodi da sustav za zaštitu i procjena rizika nisu potrebni za jednostavne građevine koje su određene posebnim propisom. Sustav za zaštitu od djelovanja munje je sastavni dio građevnog sklopa te se propisom, u ovisnosti o potrebnoj razini zaštite, ustanovljuju 4 razine zaštite, koje se moraju uskladiti s procjenom rizika: „

- Sustav s razinom zaštite I, s vjerojatnošću nastanka štete od najviše 0,02
- Sustav s razinom zaštite II, s vjerojatnošću nastanka štete od najviše 0,05
- Sustav s razinom zaštite III, s vjerojatnošću nastanka štete od najviše 0,1
- Sustav s razinom zaštite IV, s vjerojatnošću nastanka štete od najviše 0,2“ [3]

Sustav za zaštitu se može izvesti kao sustav unutarnje zaštite, sustav vanjske zaštite ili kao kombinacija dvaju sustava.

3.1.2 Tehnička svojstva sustava

Tehnička svojstva sustava moraju tijekom životnog vijeka građevine, uz propisno održavanje, osigurati da građevina podnese sve uobičajene vanjske utjecaje i utjecaje uporabe tako da ti utjecaji ne prouzrokuju:

- velika materijalna oštećenja građevine i sustava zbog djelovanja udara munje
- smetnje, opasnosti, oštećenja ili štetu prilikom uporabe građevine
- eksploziju ili požar na građevini ili njezinim dijelovima
- električni udar i druge ozlijede ljudi odnosno korisnika građevine [3]

Tehnička se svojstva sustava postižu projektiranjem i izvođenjem sustava prema zahtjevima Tehničkog propisa, a očuvanje sustava pravilnim održavanjem u skladu s odredbama Tehničkog propisa. Tehnička svojstva sustava osim zahtjeva Tehničkog propisa moraju ispunjavati i zahtjeve drugih, posebnih propisa čije su stavke također važne za građevinu. Ukoliko dođe do

rekonstrukcije ili adaptacije građevine čiji je sastavni dio sustav za zaštitu od munje, zahtjeva se očuvanje tehničkih svojstava sustava. [4]

3.1.3 Građevni proizvodi za ugradnju u sustav zaštite od munje

Građevni se proizvodi sustava za zaštitu proizvode izvan gradilišta te se ugrađuju u sustav samo ako ispunjavaju odredbe iz priloga „A“ Tehničkog propisa. Moraju biti međusobno usklađeni tako da nakon izvedbe sustava budu ispunjeni svi zahtjevi navedeni u Tehničkom propisu te imati ispravu o sukladnosti s odredbama posebnih propisa. U suprotnom se proizvod mora povući s tržišta kako bi proizvođač utvrdio i uklonio greške koje su uzrok nesukladnosti. Potvrdu o sukladnosti daje o proizvođaču neovisan laboratorij ili potvrdno tijelo te u novije vrijeme sam proizvođač koji jamči da proizvod odgovara specifikacijama i važećim normama. Ukoliko dođe do isporuke neispravnih odnosno nesukladnih proizvoda, proizvođač mora obavijestiti Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva, sve distributere i kupce o nesukladnosti proizvoda. [3],[4]

Građevni proizvodi koji su sastavni dijelovi sustava za zaštitu te na koje se ovaj propis odnosi su: ,,

- hvataljke, odvodi i uzemljivači,
- spojni elementi, potpornji, kućišta,
- odvodnici struje munje i odvodnici prenapona,
- iskrišta za odvajanje.“ [3]

Proizvođači, odnosno distributeri moraju osigurati održavanje svojstava proizvoda tijekom njihovog skladištenja, prijevoza, rukovanja i ugradnje. [3]

3.1.4 Projektiranje sustava zaštite od munje

Projektiranjem sustava zaštite moraju se za gradnju, izvođenje te predviđeni vijek trajanja građevine i sustava predvidjeti svi mogući utjecaji na građevinu i sustav za zaštitu. Oni su rezultat načina gradnje građevine, uobičajene uporabe građevine te predvidivih utjecaja okoliša na građevinu i sustav. Stoga se projektiranjem građevine, čiji je sastavni dio tehničko rješenje sustava za zaštitu, mora dokazati sigurnost i ispunjavanje zahtjeva toplinske i mehaničke stabilnosti i otpornosti, zaštite od djelovanja munje te požara prilikom gradnje i uporabnog vijeka građevine, koji iznosi najmanje 50 godina. [4]

Sigurnost se dokazuje primjenom prikladnih proračuna sastavnih dijelova sustava, odnosno građevinskih proizvoda koji su dijelovi sustava za zaštitu, pri čemu se kao mjerodavan u obzir uzima najnepovoljniji slučaj parametara munje. Na projektiranje sustava se primjenjuju pravila hrvatskih normi iz priloga „B“ Tehničkog propisa ili druge pravila ako se dokaže da mogu zadovoljiti zahtjeve Tehničkog propisa. Dio glavnog projekta građevine koji se odnosi na zahtjeve za izvedbu i održavanje te tehničko rješenje sustava za zaštitu sadržan je u elektrotehničkom projektu. Prema normi HRN EN 62305 sustav za zaštitu se planira od početka projektiranja građevinskog projekta uz sudjelovanje projektanata iz ostalih područja (građevinari, arhitekti strojari i dr.) kako bi se na najbolji način postigli i zadovoljili tehnički i estetski kriteriji. [3]

Elektrotehnički projekt čini 5 sastavnih dijelova: „

- Tehnički opis, koji sadržava zahtjeve projekta za sustav zaštite od munje, opise sustava projektirane građevine, njegovog izvođenja te rješenja i načina pričvršćenja i ugradnje građevinskih proizvoda, uvjete održavanja sustava zaštite, opise građevine i njezine okoline, podjelu građevine na zaštitne zone, zaštitne mjere i raspodjelu zaštitnih mjera po zonama te podatke o broju grmljavinskih dana ili gustoći udara munje
- Proračuni, u kojima se vrši procjena rizika od djelovanja munje i proračun sastavnih dijelova sustava za zaštitu prema odredbama Tehničkog propisa
- Program kontrole i osiguranja kvalitete, u kojemu se navode potrebna svojstva građevinskih proizvoda za ugradnju u sustav zaštite, postupci i ispitivanja kojima se dokazuju svojstva i uporabljivost proizvoda te uvjeti gradnje i drugi uvjeti čijim se ispunjavanjem postižu željena tehnička svojstva sustava i građevine
- Crteži, koji sadrže situaciju građevine s okolinom i opskrbnim vodovima u mjerilu 1:1000, situaciju građevine s položajem podzemnih i nadzemnih instalacija i bliskih objekata, tlocrt građevine s položajem i rasporedom građevinskih elemenata u mjerilu 1:100, nacрте pročelja s prikazom odvoda, spojeva i mjernih mjesta u mjerilu 1:100 te tlocrte i nacрте zona zaštite sa rasporedom zaštitnih mjera u mjerilu 1:100
- Troškovnik sa specifikacijom sastavnica radova i sustava za zaštitu“ [3]

3.1.5 Izvođenje i uporabljivost sustava zaštite

Izvođač se pri izvođenju sustava za zaštitu mora držati onog dijela građevinskog projekta koji opisuje sustav, odnosno elektrotehničkog dijela projekta te tehničkih uputa za upotrebu i

ugradnju građevinskih proizvoda koji su sastavni dio zaštite. Tako kod preuzimanja građevinskih proizvoda od proizvođača ili dobavljača, izvođač mora utvrditi:

- jesu li svojstva, podaci za uporabu, ugradnju i trajnost te rok uporabe građevinskih proizvoda u skladu sa podacima projekta
- je li oznaka isporučenog proizvoda u skladu sa propisanim zahtjevom za označavanje te podudara li se dokumentacija proizvoda s propisanom oznakom
- postojanje tehničkih uputa za uporabu i ugradnju proizvoda [3]

Nastavak radova, odnosno ugrađivanje građevinskih proizvoda u skladu s propisom o vođenju građevinskog dnevnika odobrava nadzorni inženjer, ukoliko su ispunjeni uvjeti za izvođenje sustava. Oni su određeni pomoću programa osiguranja kvalitete i kontrole koji prema prilogu „C“ Tehničkog propisa čini sastavni dio glavnog građevinskog projekta. Sustav za zaštitu ima zadovoljavajuća tehnička svojstva određena projektom te se smatra uporabljivim ako su:

- Proizvodi koji imaju ispravu o sukladnosti na propisan način su ugrađeni u sustav zaštite
- Uvjeti i okolnosti građenja sukladni sa zahtjevima glavnog projekta
- Obavljena ispitivanja i pregledi sustava tijekom građenja i nakon završetka radova te su rezultati u skladu s propisanim vrijednostima
- Zapisani i dokumentirani izvođenje i rezultati radova [3]

Ukoliko sustav za zaštitu ne zadovoljava tehnička svojstva propisana projektom, ispituje se zadovoljava li zahtjeve Tehničkog Propisa. U slučaju da ne zadovoljava zahtjeve Tehničkog Propisa i projekta izgradnje, izvršava se sanacija sustava. [3]

3.1.6 Održavanje sustava zaštite

Održavanje sustava mora tijekom životnog vijeka građevine osigurati očuvanje tehničkih svojstava sustava za zaštitu te ispunjavanje zahtjeva zadanih projektom građevine, Tehničkim propisom i posebnim propisima. Ukoliko je sustav izveden s prethodno važećim propisima održavanje mora biti u skladu s propisima prema kojima je sustav izveden. [4]

Održavanje sustava obuhvaća:

- Redovite preglede sustava u skladu s odredbama Tehničkog propisa i projekta građevine
- Izvanredne preglede po zahtjevu inspekcije ili kao posljedica izvanrednog događaja

- Radove kojim se sustav održava u ispravnom stanju propisanom Tehničkim priručnikom i projektom građevine [3]

Održavanje sustava se dokumentira u prema naputcima u projektu građevine, izvješćima o pregledavanju i ispitivanju sustava i zapisnicima o radovima održavanja. Za održavanje sustava smiju se koristiti samo proizvodi koji ispunjavaju propisane uvjete te imaju ispravu o sukladnosti ili dokazanu uporabljivost prema Tehničkom propisu i projektu građevine. [3]

3.1.7 Prijelazne i završne odredbe

U završnim odredbama navodi se da „Tehnički propis za sustave zaštite od djelovanja munje na građevinama“ (NN 87/2008) stupa na snagu 30. rujna 2008. godine. Tehnička pravila i specifikacije na koje se pravila odnose iz prethodnog „Pravilnik o tehničkim propisima o gromobranima“ (SL 13/68) prestaju biti u uporabi od 30. rujna 2009. godine. [3]

Nakon potpisivanja ugovora za uređivanje odnosa između Europske unije i Republike Hrvatske na području građevnih proizvoda, za sustav zaštite mogu se koristiti i proizvodi sukladni harmoniziranim tehničkim specifikacijama na koje Tehnički propis ne upućuje ukoliko su te specifikacije dopuštene putem službenog glasila Europske unije te ukoliko su proizvodi primjenjivi s obzirom na klimatsko-geografske faktore u Republici Hrvatskoj. Završne odredbe također zahtijevaju da se u roku 2 godine od donošenja propisa izvedu radnje održavanja sustava prethodno održavanih prema starom Pravilniku. [3]

3.2. Prilozi Tehničkog propisa

Sastavni dio Tehničkog propisa su i 3 priloga koja propisuju tehnička svojstva, zahtjeve i pravila sustava za zaštitu od munje koja su temeljena i specificirana normama navedenim u prilogima. U ožujku 2010. godine Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva donosi „Tehnički propis o izmjeni i dopuni tehničkog propisa za sustave zaštite od djelovanja munje na građevinama“ (NN 33/2010) u kojemu se ažuriraju i zamjenjuju određene odredbe i norme priloga Tehničkog propisa iz 2008. godine. Izmijenjena verzija priloga Tehničkog propisa je aktualna i danas.

3.2.1 Prilog A: Proizvodi za sustave

U „Prilogu A“ Tehničkog priručnika propisuju se tehnička svojstva građevinskih proizvoda za sustave zaštite, način na koji se potvrđuje sukladnost te označavanje, ispitivanje i kontrola

građevinskih proizvoda prema odgovarajućim normama koje su navedene u ovom prilogu, u skladu s mogućim odredbama posebnih propisa. [4]

Tehnički zahtjevi, potvrđivanje sukladnosti, označavanje i ispitivanje hvataljki, odvoda, uzemljivača, spojnih elemenata, potpornja, kućišta i iskrišta za odvajanje zadaju se prema odredbama HRN EN 50164 norme te normama na koje ona upućuje. [3]

Tehnički zahtjevi, potvrđivanje sukladnosti, označavanje i ispitivanje odvodnika struje munje i odvodnika prenapona vrši se prema odredbama zadaju se prema odredbama HRN EN 61643 norme te normama na koje ona upućuje. [3]

Popis normi prema kojima se ispunjavaju zahtjevi iz „Priloga A“ Tehničkog propisa je zamijenjen popisom normi u Tehničkom propisu iz 2010. godine. Popis trenutno važećih normi na koje se odnosi „Prilog A“ se može vidjeti u literaturi [5],

3.2.2 Prilog B: Projektiranje sustava

U „Prilogu B“ Tehničkog propisa propisuju se pravila za projektiranje i proračun sustava za zaštitu. Odredba „Priloga B“ je da se tehnička svojstva građevinskih elemenata sustava za zaštitu specificiraju u elektrotehničkom dijelu glavnog projekta. U nadopuni Tehničkog propisa iz 2010. godine objavljena je karta godišnjeg broja grmljavinskih dana iz koje se očitava broj grmljavinskih dana za proračun i projektiranje sustava za zaštitu. [5]

Popis normi prema kojima se ispunjavaju zahtjevi iz „Priloga B“ Tehničkog propisa je zamijenjen popisom normi u Tehničkom propisu iz 2010. godine. Popis trenutno važećih normi na koje se odnosi „Prilog B“ je naveden u literaturi [5].

3.2.3 Prilog C: Izvođenje i održavanje sustava

„Prilogom C“ Tehničkog propisa propisuju se uvjeti te tehnički i drugi zahtjevi za izvođenje sustava za zaštitu, održavanje sustava, kontrolni postupci i nadzorne radnje prema normama i odredbama ovog priloga te normama na koje norme iz priloga upućuju. Sustavi se izvode na temelju tehničkog rješenja iz građevinskog projekta te se ugradnja građevinskih proizvoda mora vršiti prema normama iz „Priloga C“ Tehničkog propisa, normama na koje norme iz priloga upućuju i zahtjevima posebnog propisa. [3]

Izvođač sustava za zaštitu mora prije izvođenja provjeriti odgovaraju li građevinski proizvodi zahtjevima elektrotehničkog projekta te je li tokom skladištenja, prijevoza i rukovanja došlo do

negativnih utjecaja na tehnička svojstva sustava. Nadzorni inženjer vodi dokumentaciju ispitivanja dijelova sustava i provedenih provjera pomoću građevinskog dnevnika te provjerava postoje li isprave o sukladnosti građevinskih elemenata i jesu li građevinski elementi ugrađeni u skladu s elektrotehničkim projektom i uputstvima. [6]

Za dokaz o uporabljivosti sustava u obzir se uzimaju:

- Zapisi u dnevniku gradnje o tehničkim i drugim svojstvima proizvoda ugrađenih u sustav
- Kontrolni postupci i nadzorne radnje koji moraju biti provedeni prije, za vrijeme i nakon ugradnje proizvoda u sustav te njihovi rezultati moraju biti dostupni
- Dokazi uporabljivosti koje izvođač mora tokom izvođenja sustava osigurati
- Rezultati ispitivanja određenih elektrotehničkim projektom i ispitivanja provedenih u slučaju sumnje
- Uvjeti građenja i druge okolnosti koje mogu utjecati na tehnička svojstva sustava
- Rezultati završnih ispitivanja sustava zaštite kojim se utvrđuje je li sustav ispunio zahtjeve određene elektrotehničkim projektom [4]

Kontrolna ispitivanja, pregled tijekom gradnje, završni pregled i završno ispitivanje sustava se provode na temelju normi određenih ovim prilogom, normi na koje te norme upućuju te prema programu ispitivanja koji određuje „Zapisnik o vizualnom pregledu sustava zaštite od munje“ iz stavka „C.5“ ovog Priloga i „Zapisnik o ispitivanju i mjerenju sustava“ iz stavka „C.6“ ovog Priloga Tehničkog propisa. Održavanje sustava se vrši prema normama određenim ovim Prilogom te prema odredbama ostalih Priloga Tehničkog propisa. [3]

Način pregleda je određen projektom građevine te uključuje pregled ispravnosti sastavnih dijelova sustava zaštite te mjerenje i ispitivanje sustava na temelju normi i odredbi „Priloga C“ kako bi se utvrdilo jesu li ispunjeni zahtjevi određeni građevinskim projektom. Učestalost pregleda i ispitivanja je određena projektom građevine, ali ne smije biti rjeđa od zahtjeva iz „Priloga C“ Tehničkog propisa, prema tablici 3.1. [4]

Tablica 3.1: Tablica rokova ispitivanja sustava i redovitih pregleda [4]

Razina zaštite	Razdoblje između pregleda	Razdoblje između ispitivanja i mjerenja	Razdoblje između pregleda kritičnih dijelova
I	1 godina	2 godine	1 godina
II	1 godina	4 godine	2 godine
III, IV	2 godine	6 godina	3 godine

Izvanredni pregledi se vrše nakon svakog izvanrednog događaja i svake promjene u sustavu koje mogu utjecati na uporabljivost sustava i tehnička svojstva sustava te po zahtjevu inspekcije. [4]

Rezultati pregleda, mjerenja i zapažanja te upotrijebljene norme i metode se na propisani način upisuju u Zapisnike u nekoliko preslika koje se prilažu u dokumentaciju za tehnički pregled građevine. [3]

Popis normi prema kojima se ispunjavaju zahtjevi iz „Priloga „C“ Tehničkog propisa je zamijenjen popisom normi u Tehničkom propisu iz 2010. godine. Popis trenutno važećih normi na koje se odnosi „Prilog C“ je naveden u literaturi [5].

3.3 Sustav za zaštitu od udara munje

Sustav za zaštitu od udara munje (LPS) obuhvaća skup sredstava i mjera usmjerenih na otklanjanje opasnosti izravnog udara munje u štíćeni objekt te njegovih posljedica. Sastavni je dio građevinskog sklopa te se izvodi na objektima za koje je proračunom rizika utvrđena potreba za njegovom ugradnjom. Normom HRN EN 62305-3:2008 su određene 4 razine sustava za zaštitu (od LPS I do LPS IV) na temelju vjerojatnosti štete te svaka razina ima svoja pravila izvođenja. Sustav za zaštitu od munje se sastoji od vanjskih i unutarnjih elemenata. [1]

3.3.1 Vanjski sustav za zaštitu

Vanjski sustav za zaštitu od munje se sastoji od sustava hvataljki, odvodnika, uzemljivača i dodatnog pribora. Služi za primanje izravnih udara munje preko sustava hvataljki te odvođenje struje munje od mjesta udara pomoću sustava odvodnika do zemlje. Pomoću sustava uzemljivača vrši se raspršivanje struje munje u zemlji radi uklanjanja mogućih rizika od eksplozija i požara putem iskrenja te mehaničke ili toplinske štete. [1]

3.3.1.1 Sustav hvataljki

Hvataljke predstavljaju dijelove krova, vodove na krovu te metalne štapove za prihvat struje munje. Postavljaju se na dijelove objekta na kojima postoji najveći rizik od udara munje, odnosno na rubove, kutove i izložena mjesta građevine, prema jednoj od metoda:

- Metoda kotrljajuće kugle, prikladna za sve oblike građevina, koja u obzir uzima mogućnost bočnog udara u građevinu
- Metoda zaštitnog kuta, prikladna za jednostavne građevine, u kojoj područje zaštite predstavlja kut između vrha vertikalnog štapa i površine na kojoj se štap nalazi
- Metoda mreže, prikladna za zaštitu ravnih površina sa sustavom hvataljki duž rubova i u kutovima građevine [7]

S obzirom na 4 razreda zaštite prema normi, postoje i 4 propisane vrijednosti za primjenu u svakoj od metoda, što je vidljivo prema tablici 3.2. [1]

Tablica 3.2: Normirane maksimalne vrijednosti metoda za hvataljke [1]

Razina zaštite	Polumjer kugle (m)	Širina oka mreže (mm)
I	20	5x5
II	30	10x10
III	45	15x15
IV	60	20x20

Hvataljke se mogu postaviti na površini krova ukoliko je on načinjen od nezapaljivih materijala. U suprotnom ne smije doći do izravnog kontakta između lako zapaljivih dijelova krova i dijelova vanjskog sustava za zaštitu, već se mora poštovati obvezni razmak veći od 10 centimetara. Prema normi HRN EN 62305-3 prirodne sastavnice sustava hvataljki mogu biti neprekidni i neizolirani metalni limovi koji oblažu građevinu, metalne cijevi, spremnici na krovu i drugi metalni dijelovi ukoliko zadovoljavaju propisanu debljinu, prema tablici 3.3. [1]

Tablica 3.3: Propisana debljina prirodnih sastavnica sustava hvataljki [1]

Vrsta LPS	Gradivo	Debljina ^a t (mm)	Debljina ^b t (mm)
I do IV	Olovo	-	2
	Željezo (FeZn)	4	0.5
	Bakar	5	0.5
	Aluminij	7	0.6

^at- ako treba spriječiti probijanje lima ili stijenke

^bt- u situacijama kada nije važno sprječavanje proboja

S pravilnom izvedbom sustava hvataljki značajno se smanjuje mogućnost djelovanja struje munje prema unutrašnjosti građevine.

3.3.1.2 Sustav odvoda

Odvode čine metalni vodovi ili metalne mase građevine. Oni povezuju uzemljivački sustav sa sustavom hvataljki najkraćim mogućim putem, vertikalno i bez promjene pravca (ili promjenu do 90°), kako bi se osigurao izravan put do zemlje. [1]

Što je više odvodnika, to je bolja raspodjela struje munje između njih. Razmještaju se što bliže izloženim rubovima građevine te što dalje od prozora, vrata i metalnih masa koje nisu u sastavu sustava za zaštitu. Ukoliko je moguće, postavljaju se kao direktni nastavci sustava hvataljki. Sustav zaštite svake građevine treba sadržavati barem dva odvoda raspoređena oko oboda građevine. Međusobni razmak između odvoda prema normi HRN EN 62305 ovisi o razini sustava za zaštitu, prema tablici 3.4. [1]

Tablica 3.4: Razmaci između vodiča odvoda ovisno o razini sustava za zaštitu [10]

Vrsta LPS	Tipični razmaci u metrima
I	10
II	10
III	15
IV	20

S obzirom na dimenzije i materijal, dijele se na pomoćne i glavne. Odvodi se polažu u zid ili na površinu zida građevine ukoliko je on izgrađen od nezapaljivog materijala. Odvodi se polažu na površinu zida i ako je on izveden od zapaljivog materijala ali rast temperature odvoda nije opasan za zid a ukoliko je rast temperature predstavlja opasnost odvodi se polažu na razmak od

zida veći od 0,1 m. U slučaju da se ne može osigurati dovoljan razmak od zida moraju se odabrati odvodi presjeka većeg od 100 mm^2 . [8]

Na svaki odvod se na spojnom mjestu s uzemljivačem postavlja mjerni spoj, osim kod spoja temeljnog uzemljivača i prirodne vrste odvoda. Spoj se mora moći otvarati i zatvarati radi mjerenja. Električni neprekidne metalne instalacije, ograde, armatura u betonskoj konstrukciji građevine i metalni dijelovi konstrukcije pročelja predstavljaju moguće oblike prirodnih odvoda. [1]

3.3.1.3 Sustav uzemljivača

Uzemljivači su metalni dijelovi u provodnoj vezi sa zemljom u koju su ukopani. Ključni su za sigurno i učinkovito raspršivanje struje munje. Za što efikasnije raspršivanje struje važni su dimenzije i oblik uzemljivača kako bi se postigao što manji otpor uzemljenja (ispod 10 ohma). Kvalitetan uzemljivački sustav mora imati i dobru otpornost prema koroziji i vanjskim utjecajima s obzirom na dugogodišnju izloženost. [1]

Prema HRN EN 62305 normi preporuča se izvedba integriranog sustava uzemljivača višestruke namjene koji će istovremeno pružati zaštitu od munje te uzemljenje sustava za telekomunikaciju i elektroenergetskog sustava. [8]

Uzemljivači se najčešće izvode kao:

- Trakasti kao metalne trake za ukapanje u zemlju, najčešće izrađene od pocinčanog čelika (FeZn traka)
- Štapni u obliku metalnih cijevi ili šipki okomito ukopanih u zemlju
- Temeljni koji se izvode kao metalni vodiči za polaganje u betonsko temelje objekta preko kojih dolaze u kontakt sa zemljom. [1]

Dva su osnovna tipa sustava uzemljivača:

- Tip A sustava uzemljivača, kojeg čine vertikalni i horizontalni uzemljivači spojeni na pojedinačne odvode. Njihov broj ovisi o broju odvoda te ih kao i odvoda mora biti minimalno dva. Duljina uzemljivača ovog tipa ovisi o otporu tla.
- Tip B sustava uzemljivača su izvedeni kao temeljni uzemljivači ili imaju prstenastu strukturu postavljenu izvan i oko građevine te su sa barem 80% svoje duljine u izravnom dodiru s tlom. Takvi uzemljivači mogu imati i mrežastu strukturu. Ponekad se zbog premalog srednjeg polumjera ekvivalentnog kruga r_e koji je obuhvaćen uzemljivačem na

mjestu spajanja odvoda s prstenastim ili temeljnim uzemljivačem ugrađuju dodatni horizontalni i vertikalni uzemljivači, po mogućnosti na jednakim razmacima. [7],[8]

A i B tip uzemljivača se radi smanjenja električnog međudjelovanja jednoliko raspoređuju te polažu na dubine veće od 0,5 m. Polaganje mora biti takvo da tokom izvedbe može vršiti nadzor. Pri odabiru vrste uzemljivača i dubine polaganja moraju se u obzir uzeti mogućnosti korozije i vanjskih utjecaja (smrzavanje, kiša, isušivanje tla). Otpor zemljišta je također bitan za izbor uzemljivačkog sustava. B tip uzemljivača se u praksi češće koristi za zaštitu građevina s većim rizikom od požara i s većim elektroničkim sustavima. A tip uzemljivača je prikladniji za jednostavne građevine. [1]

Prema HRN EN 62305-3 normi propisani su gradivni materijali, oblici, dimenzije i najmanji poprečni presjeci dijelova vanjskog sustava za zaštitu od munje, prema tablicama 3.5 i 3.6. [8]

Tablica 3.5: Propis za gradivo, oblik i površinu presjeka hvataljki i odvoda [8]

Gradivo	Oblik vodiča	Najmanja površina presjeka, mm ²	Napomena
Bakar	puna traka	50	2 mm – najmanje debljine
	puni okrugli ⁷⁾	50	8 mm – promjer
	sukani (od više žica)	50	1,7 mm - najm. promjer svake žice
	puni okrugli ^{3), 4)}	200	16 mm - promjer
Bakar pokositreni ¹⁾	puna traka	50	2 mm – najmanje debljine
	puni okrugli ⁷⁾	50	8 mm – promjer
	sukani	50	1,7 mm - najm. promjer svake žice
Aluminij	puna traka	70	3 mm – najmanje debljine
	puni okrugli	50	8 mm – promjer
	sukani	50	1,7 mm - najm. promjer svake žice
Aluminijeva legura	puna traka	50	2,5 mm – najmanje debljine
	puni okrugli	50	8 mm – promjer
	sukani	50	1,7 mm - najm. promjer svake žice
	puni okrugli ³⁾	200	16 mm – promjer
Željezo vruće pocinčano ²⁾	puna traka	50	2,5 mm – najmanje debljine
	puni okrugli	50	8 mm – promjer
	sukani	50	1,7 mm - najm. promjer svake žice
	puni okrugli ^{3), 4)}	200	16 mm – promjer
Nehrđajući čelik ⁵⁾	puna traka ⁶⁾	50	2 mm – najmanje debljine
	puni okrugli ⁶⁾	50	8 mm – promjer
	sukani	70	1,7 mm - najm. promjer svake žice
	puni okrugli ^{3), 4)}	200	16 mm – promjer

Tablica 3.6: Propis za gradivo, oblik i dimenzije uzemljivača [8]

Gradivo	Oblik vodiča	Najmanje dimenzije			Napomene
		Štapni uzemljivač Ø mm	Vodoravni uzemljivač	Pločasti uzemljivač mm	
Bakar	sukani ³⁾		50 mm ²		1,7 mm – najmanji promjer svake žice
	puni okrugli ³⁾		50 mm ²		8 mm - promjer
	puna traka ³⁾		50 mm ²		2 mm – najmanje debljine
	puni okrugli	15 ⁸⁾			
	cijev	20			2 mm – najmanja debljina stijenke
	puna ploča			500 x 500	2 mm – najmanja debljina
	rešetkasta ploča			600 x 600	presjek 25 mm x 2 mm; najmanja duljina rešetke: 4,8 m.
Željezo	pocinčano puno okruglo ^{1), 2)}	16 ⁹⁾	10 mm Ø		
	pocinčana cijev ^{1), 2)}	25			2 mm – najmanja debljina stijenke
	pocinčana puna traka ¹⁾		90 mm ²		3 mm – najmanja debljina
	pocinčana puna ploča ¹⁾			500 x 500	3 mm – najmanja debljina
	pocinčana rešetkasta ploča ¹⁾			600 x 600	30 mm x 3 mm – presjek
	puni okrugli presvučen bakrom ⁴⁾	14			250 µm - najmanja radijalna debljina bakrene presvlače od 99,9 % bakra
	goli puni okrugli ⁵⁾		10 mm Ø		
	gola ili pocinčana puna traka ^{5), 8)}		75 mm ²		3 mm najm. debljina
	pocinčano sukano ^{5), 8)}		70 mm ²		1,7 mm – najm. debljina svake žice
	pocinč. križni profil ¹⁾	50 x 50 x 3			
nehrđajući čelik ⁷⁾	puni okrugli	15 ⁹⁾	10 mm Ø		
	puna traka		100 mm ²		2 mm – najmanja debljina

3.3.2 Unutarnji sustav za zaštitu

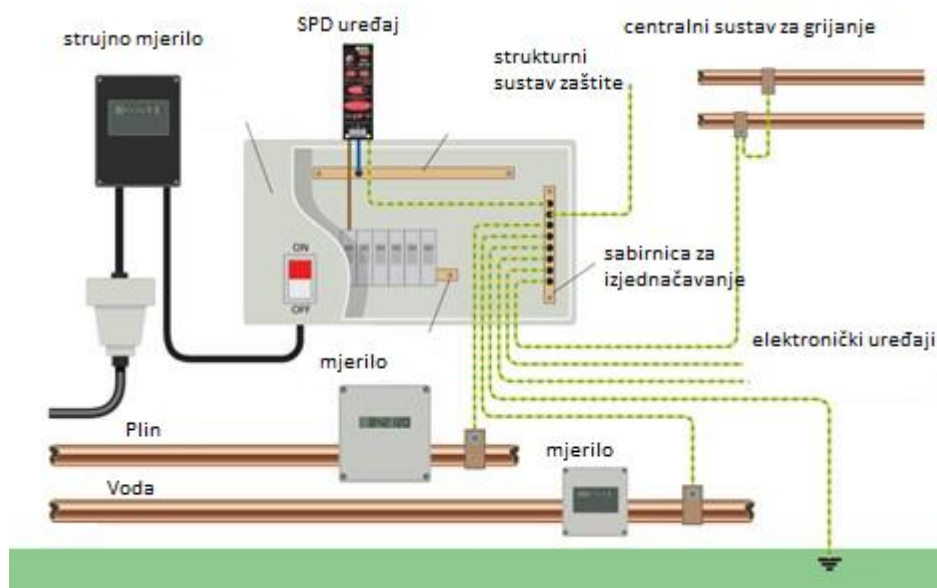
Unutarnji sustav za zaštitu sprječava nastanak opasnih iskrenja u unutrašnjosti građevine koju štiti, a do kojih dolazi zbog protjecanja struje munje kroz vanjski sustav za zaštitu i kroz vodljive metalne dijelove građevine. [1]

Iskrenje se javlja između vanjskog sustava za zaštitu i drugih sastavnica građevine kao što su vodovi spojeni s građevinom, metalni vodljivi dijelovi i instalacije te unutarnji sustavi. Iskrenje se izbjegava ugradnjom izolacije između dijelova kod kojih dolazi do preskoka te izjednačavanjem potencijala. [1]

Izjednačavanjem potencijala sustav za zaštitu se povezuje sa unutarnjim sustavima te svim prikladnim metalnim instalacijama, metalnim dijelovima i vanjskim vodljivim dijelovima građevine kako bi u slučaju protjecanja struje munje svi bili na jednakom potencijalu čime bi se poništio rizik od iskrenja te dio struje mogao sigurno proteći tim sustavima. [7]

Postiže se pomoću spajanja vodiča čije dimenzije ovise o razini sustava za zaštitu i određene su HRN EN 62305-3 normom ili tamo gdje izravno spajanje vodičima nije moguće pomoću odvodnika prenapona i struje munje (SPD), preciznije određenih HRN IEC 61643-12 normom.

Izjednačavanje potencijala se obavlja u podrumu ili na razini tla te na mjestima gdje nisu ispunjeni uvjeti izoliranosti. Izvodi se pomoću jedne ili više povezanih sabirnica za izjednačavanje postavljene na pristupačnoj i vidljivoj lokaciji, koja je spojena na sustav uzemljivača i na koju se spajaju vodiči za izjednačavanje, vidljivo prema slici 3.1. [1]



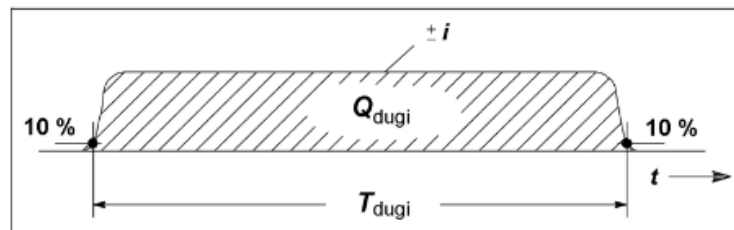
Slika 3.1: Izjednačavanje potencijala pomoću sabirnice za izjednačavanje potencijala [9]

U slučaju da su izolirani dijelovi uključeni u cijevi za centralno grijanje, plinovod i vodovod uz suglasnost isporučitelja se premošćuju pomoću odvodnika prenapona i odvodnika struje munje koji su u skladu s normom, ispitani te imaju razinu zaštite U_p nižu od otpornosti izolacije među dijelovima na udarni napon. Ukoliko vodiči unutarnjih sustava nisu položeni u metalnim kanalima i ne posjeduju električni zaslon spajaju se pomoću sustava odvodnika. Izjednačavanje potencijala s vanjskim vodičima se izvodi vodičima za izjednačavanje ili SPD odvodnicima što bliže mjestima ulaska tih vanjskih dijelova u građevinu. [1]

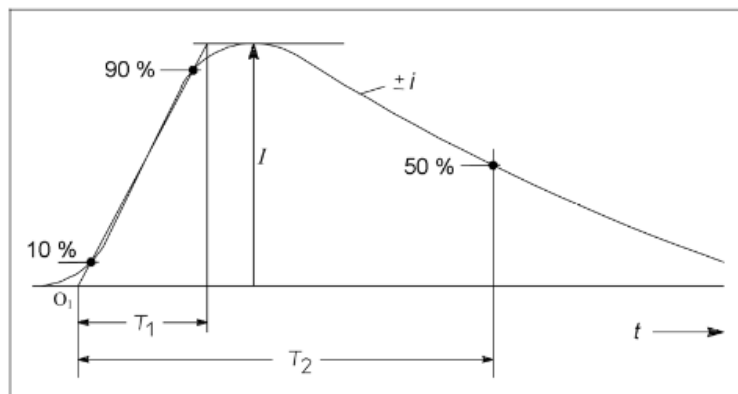
4. ZNAČAJKE DJELOVANJA MUNJE

4.1 Karakteristike i parametri munje

Prema normi IEC 62305-1 (HRN EN 62305-1) udari munje se prema vremenu trajanja dijele na duge udare s trajanjem između 2 ms i 1 s, čiji je valni oblik vidljiv na slici 4.1 te kratke udare u trajanju od manje od 2 ms, prema slici 4.2. [10]

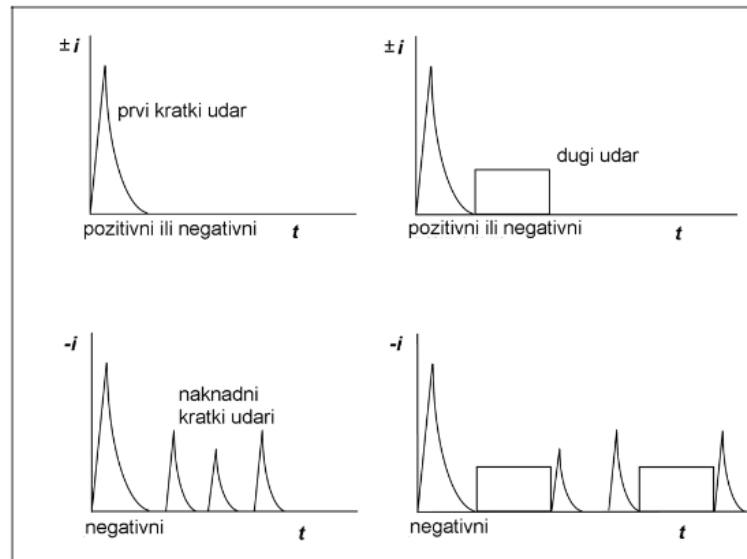


Slika 4.1: Valni oblik dugog udara munje [10]



Slika 4.2 : Valni oblik kratkog udara munje [10]

Nadalje se razlikuju po pozitivnom polaritetu (uzlazni udari) sa otprilike 10% i negativnom polaritetu (silazni udari) sa oko 90% od ukupnog broja udara. Razlikuju se i po redoslijedu u cjelokupnom izbijanju, prema kojem mogu biti prvi, naknadni ili superponirani. Mogući sastavni dijelovi silaznih udara munja, tipične za ravne površine i niske građevine su prikazani na slici 4.3 [10]



Slika 4.3: Sastavni dijelovi silaznih munja [10]

S obzirom da je struja udara munje njezina najvažnija veličina iz perspektive sustava zaštite od udara munje, poznavanjem njezinih karakteristika odnosno parametara može se učinkovitije pristupiti projektiranju zaštitnog sustava. [10]

Za potrebe IEC 62305-1 norme određuju se četiri razine zaštite (LPL) od munje te svaka razina zahtjeva:

- Maksimalne (najveće) parametre struje munje koje predstavljaju kriterij za dimenzioniranje sastavnica sustava zaštite (građevinskih proizvoda) na način da zadovolje zahtijevane uvjete te razine zaštite
- Minimalne (najmanje) parametre struje munje za određivanje prostora adekvatno zaštićenog od direktnih udara munje [10]

Najveći, odnosno maksimalni parametri struje munje prema ovoj normi su vršna (tjemena) vrijednost struje (I_g), specifična energija (W/R) i naboj (Q), na temelju kojih se proračunavaju toplinski i mehanički učinci udara te strmina čela struje munje (di/dt) i vremenski parametri, povezani s pojavom opasnih iskrenja i prenapona. Najmanji odnosno minimalni parametar je polumjer kotrljajuće kugle (r) koji se računa pomoću vršne vrijednosti struje. Parametri kratkih udara silaznih munja su u pravilu veći nego kod kratkih udara uzlaznih munja. [10]

4.1.1 Tjemena vrijednost struje munje

Tjemena vrijednost predstavlja najveću trenutnu vrijednost struje I_g . Tjemenu vrijednost struje je teško predvidjeti s obzirom da svaki udar munje ima drugačiju vrijednost struje I_g pa se stoga podvrgava zakonu vjerojatnosti. Za svaku tjemenu vrijednost pridodaje se određena vjerojatnost da će ta vrijednost biti premašena. Ta je vjerojatnost temeljena na kvantitativnom promatranju i prikupljanju podataka te je prikazana u dijagramu raspodjele tjemene vrijednosti struje. Tako se iz može zaključiti da je kod pozitivnih struja udara groma vjerojatnost pojave amplituda većih od 200 kA u manje od 5% slučajeva, dok je kod negativnih struja udara vjerojatnost pojave amplituda većih od 100 kA u 1% slučajeva. [11]

Također, vjerojatnost da će neka vrijednost amplitude struje udara munje bez obzira na polaritet (globalna raspodjela) biti premašena, može se odrediti i iz izraza:

$$\log y = 2 - \frac{I_g}{60} \quad (4-1)$$

pri čemu I_g predstavlja amplitudu struje a y globalnu vjerojatnost. [12]

4.1.2 Strmina struje munje

Struja udara munje ima impulsni oblik te vrlo brzo dosegne svoju tjemenu vrijednost, nakon čega se postepeno smanjuje. Takve nagle promjene u kratkom vremenu kod udara munje stvaraju jaka promjenjiva magnetska polja te dolazi do nastanka opasnih samoindukcijskih napona. Negativne struje u pravilu imaju veće strmine te manje amplitude od pozitivnih struja udara munje iako su istraživanja pokazala da između strmine i amplitude vala nema čvrstog odnosa. Strmina se računa operacijom derivacije pomoću izraza (4-2) te se koristi za izračunavanje induktivnog pada napona pri prolasku struje dijelovima LPS-a: [11]

$$s = \frac{di}{dt} \quad (4-2)$$

gdje je s oznaka strmine [kA/μs]. [12]

4.1.3 Naboj struje munje

Kako bi se sustav za zaštitu mogao ispravno dimenzionirati, važno je poznavati i naboj, odnosno energiju struje munje oslobođenu kod atmosferskog pražnjenja. Prosječno se količina naboja kreće od nekoliko desetaka do više stotina kulona te o njegovoj vrijednosti ovisi količina energije pretvorene na mjestima stvaranja električnog luka i na mjestu udara. Pretvorena energija

na mjestu udara munje u obliku topline može utjecati na topljenje vrhova dijelova LPS-a te se računa prema formuli:

$$W = Q \cdot U_{AK} \quad (4-3)$$

gdje W predstavlja pretvorenu energiju, Q naboj te U_{ak} pad katodnog napona. [12]

Kod dimenzioniranja zaštite vrijednost naboja ovisi o razini zaštite definirane IEC normama a s obzirom da je udar munje vremenski kratkotrajan pretvorena energija ima vrlo male vrijednosti.

4.1.4 Kvadratni impuls struje munje i specifična energija

S obzirom da struja munje prolazi kroz metalne vodiče LPS-a dolazi do njihovog zagrijavanja. Kod projektiranja sustava zaštite za računanje presjeka vodiča LPS-a definira se veličina koja se naziva kvadratni impuls struje munje. Energija koja se troši na zagrijavanje vodiča može se izračunati kao umnožak omskog otpora vodiča i kvadratnog impulsa struje munje prema formuli (4-4):

$$W = R \cdot \int I_g^2 dt \quad (4-4)$$

gdje je W energija koja se troši na zagrijavanje vodiča, R otpor vodiča a I_g tjemena vrijednost struje. [11]

Dijeljenjem energije s otporom vodiča dobije se specifična energija važna za zahtjeve sustava zaštite od munje.

4.1.5 Vremenski parametri struje munje

Prethodno objašnjeni parametri su prema ovoj normi temeljeni na podacima Međunarodne konferencije za velike elektroenergetske mreže (CIGRÉ) te se statistički vladaju prema logaritamsko-normalnoj razdiobi. Vrijednosti najvećih parametara struje munje za moguće sastavnice silaznih munja za razinu zaštite od munje LPL I prema podacima CIGRÉ je prikazana u tablici 4.1. [10]

Tablica 4.1: CIGRE podaci o vrijednosti parametara sastavnica silazne munje [10]

Parametar	Stalne vrijednosti LPL I	Vrijednosti			Vrsta udara	Krivulja sa slike A.5
		95 %	50 %	5 %		
I, kA	50 200	4(98%)	20(80%)	90	*prvi negativni kratki	1A+1B
		4,9	11,8	28,6	*slijedeći negativni kratki	2
		4,6	35	250	prvi pozitivni kratki (pojedini)	3
Q _{munje} , C	300	1,3	7,5	40	negativna munja	4
		20	80	350	pozitivna munja	5
Q _{kratki} , C	100	1,1	4,5	20	prvi negativni kratki	6
		0,22	0,95	4	slijedeći negativni kratki	7
		2	16	150	prvi pozitivni kratki (pojedini)	8
WR, kJ/Ω	10 000	6	55	550	prvi negativni kratki	9
		0,55	6	52	slijedeći negativni kratki	10
		25	650	15.00	prvi pozitivni kratki	11
di/dt _{max} , kA/μs	20	9,1	24,3	65	* prvi negativni kratki	12
		9,9	39,9	161,5	* slijedeći negativni kratki	13
		0,2	2,4	32	prvi pozitivni kratki	14
di/dt _{base} , kA/μs	200	4,1	20,1	98,5	* slijedeći negativni kratki	15
Q _{dugi} , C	200				dugi	
T _{dugi} , s	0,5				dugi	
Trajanje čela vala, μs		1,8	5,5	18	prvi negativni kratki	
		0,22	1,1	4,5	slijedeći negativni kratki	
		3,5	22	200	prvi pozitivni kratki (pojedini)	
Trajanje udara, μs		30	75	200	prvi negativni kratki	
		6,5	32	140	slijedeći negativni kratki	
		25	230	2 000	prvi pozitivni kratki (pojedini)	
Vremenski interval, ms		7	33	150	višestruki negativni udari	
Ukupno trajanje munje, ms		0,15	13	1100	negativna munja (svi udari)	
		31	180	900	negativna munja (bez pojedinačnih udara)	
		14	85	500	pozitivna munja	

Na temelju navedenih vrijednosti u tablici izračunavaju se T_1 odnosno trajanje čela vala i T_2 , odnosno poluvrijeme trajanja kratkog udara prema formulama (4-5) i (4-6)

$$T_1 = \frac{I}{\frac{di}{dt}} \quad (4-5)$$

gdje je T_1 trajanje čela vala, I vršna vrijednost struje te di/dt strmina struje munje, [10]

$$T_2 = \frac{Q_{KRATKI}}{\left(\frac{1}{0,7}\right) \cdot I} \quad (4-6)$$

gdje je T_2 poluvrijeme trajanja kratkog udara, Q_{KRATKI} naboj kratkog impulsa, I vršna struja. [10]

T_2 se za prvi negativni i naknadni negativni impuls ne računa prema (4-6) već se procjenjuje iz trajanja prvih negativnih kratkih, odnosno naknadnih negativnih kratkih udara.

Vrijednost trajanja čela vala T_l je važna za proračun ekvivalentne frekvencije svakog udara kako bi se on mogao prikazati u frekvencijskoj domeni, prema formuli (4-7)

$$f_{eq} = \frac{1}{4T_1} \quad (4-7)$$

Izračunate vrijednosti i vrijednosti iz tablice CIGRE su prikazane u tablici 4.2 i koriste za prikazivanje valnih oblika za prvi pozitivni, prvi negativni i naknadni negativni impuls. [10]

Tablica 4.2: Parametri najvećih vrijednosti dopuštenih za svaku razinu zaštite (LPL)

TIP IMPULSA	IEC 62305-1 parametri						Vremenski Parametri		Ekvivalentna frekvencija
	I (kA) I	I (kA) II	I (kA) III-IV	k	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	f (kHz)
Prvi pozitivni	200	150	100	0.93	19	485	10	350	25
Prvi negativni	100	75	50	0.986	1.82	285	1	200	250
Naknadni negativni	50	37.5	25	0.993	0.454	143	0.25	100	1000

S obzirom da se impulsni udar munje prikazuje kao sinusni valni oblik, njihove maksimalne vrijednosti su jednake. S toga se za proračun (i simulaciju u idućem poglavlju) koriste efektivne vrijednosti struje dobivene dijeljenjem vršne vrijednosti struje svakog kratkog udara sa $\sqrt{2}$. [13]

4.2 Nadomjesna shema struje udara munje

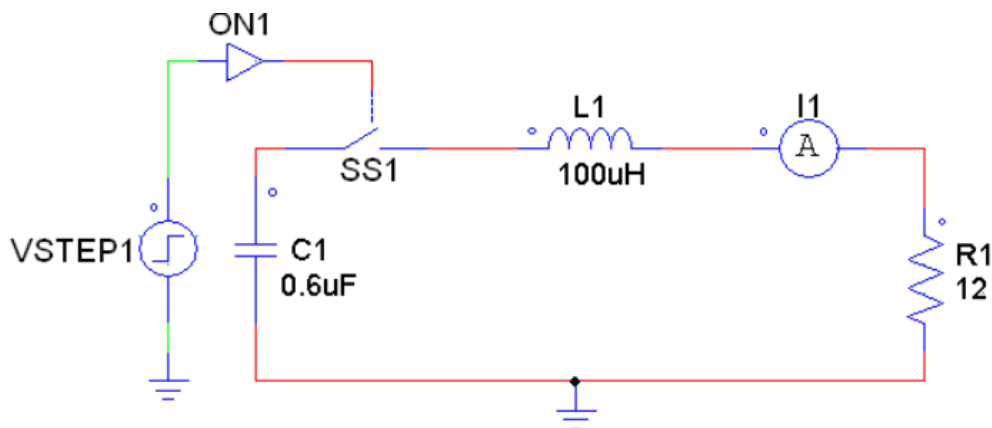
Za bolje razumijevanje struje udara munje i atmosferskog pražnjenja, formiraju se nadomjesne sheme koje omogućuju daljnje proučavanje i promatranje struje munje u umjetno stvorenim laboratorijskim uvjetima. Kao reprezentativni model kretanja struje munje koristi se shema C.F. Wagnera, u kojoj L i C elementi formiraju četveropol te tvore vodilicu sa velikim unutarnjim otporom pomoću kojeg se nadomješta otpor izvora struje udara munje. Za valni otpor izvora struje munje, koji se označava sa Z_0 prihvaća se vrijednost od 1500Ω . Ukoliko struja pri udaru munje naiđe na puno manje otpore od valnog otpora izvora struje, njezin iznos se neće značajno promijeniti nego će ostvariti utiskivanje u potpunom iznosu. Takav slučaj je čest u praksi s obzirom da su otpori uzemljenja R_z mnogo manji od valnog otpora izvora. Valni otpor Z_0 prilikom izboja struje na uzemljivač može se promatrati kao paralelni spoj s tim uzemljivačem jer se zbog malog gubitka napona na krajevima otpora javlja efekt jednakog napona. [12]

Pomoću poznatih podataka o struji udara groma, otporu uzemljenja i otporu izvora struje munje moguće je odrediti struju koja protječe kroz uzemljenje pomoću formule (4-8):

$$I = I_g \cdot \frac{Z_0}{Z_0 + R_z} \quad (4-8)$$

gdje je I struja kroz uzemljenje, I_g tjemena vrijednost struje, Z_0 otpor izvora struje, R_z otpor uzemljenja. [10]

Otpor uzemljenja se kod jako malih vrijednosti može zanemariti u proračunu, no kod većih vrijednosti se treba uzeti u obzir prilikom računanja i kasnije dimenzioniranja sustava za uzemljenje, jer u suprotnom bi se veći dio struje munje kretao drugim putevima kroz zgradu umjesto kroz sustav za uzemljenje. U dobro uzemljenim građevinama struja munje bi trebala ostati praktički nepromijenjena. U laboratoriju se pravi način stvaranja struje groma imitira pomoću udarnog strujnog generatora koji nadomješta udarnu struju, vidljiv na slici 4.4. [12]



Slika 4.4: Nadomjesna shema impulsnog strujnog generatora [14]

Pomoću omskog otpornika i induktiviteta, odnosno namještanjem L i R dobije se struja čiji oblik odgovara udarnoj struji munje a prethodno nabijeni kondenzator se približavanjem iskrišta izbija prema nekom objektu. [12]

4.3 Vrste djelovanja munje

4.3.1 Električno i magnetsko djelovanje

Uslijed atmosferskih pražnjenja i prolaska struje munje nastaju električna i magnetska polja. Njihova pojava ima korisne osobine kod proučavanja atmosferskih pražnjenja, ali isto tako predstavljaju opasnost. Koriste se za registraciju događaja prilikom praćenja tih pojava te omogućuju proučavanje karakteristika struje munje. S obzirom na jačinu električnog polja

moguće je odrediti način te vrijeme početka i trajanja udara, a s obzirom na jačinu magnetske indukcije moguće je odrediti tjemenu jakost struje. U fazi nastanka i kretanja munje prema zemlji nastaje i električno polje (između nabijenih oblaka i zemlje) koje traje do dodira munje odnosno kanala izboja sa zemljom, nakon čega dolazi do naglog slabljenja električnog polja koje će se ponovno uspostaviti ukoliko prema zemlji krene naknadni udar. Od dodira munje sa zemljom kratko vrijeme teče struja koja stvara magnetsko polje. Magnetsko polje će se mijenjati zbog vremenske promjenjivosti iznosa struje udara što kao rezultat ima induciranje napona na metalnim dijelovima konstrukcija i drugih predmeta koji se nalaze u blizini odvoda LPS-a. Ti naponi nastaju u zatvorenim metalnim petljama koje se nalaze pod utjecajem promjenjivog magnetskog polja. Njihova jačina u petlji ponajprije ovisi o udaljenosti kanala struje groma od petlje. S obzirom da takvu petlju mogu tvoriti vodiči dalekovoda sa zemljom, kod isključenog dalekovoda inducirani naponi mogu biti opasni za radnike na održavanju. Na metalnim šiljcima, sljemenima zgrada i vrhovima stabala se javljaju i naboji koji mogu izazvati kratkotrajno vidljivo izbijanje te preskoke na izoliranim metalnim predmetima zbog čega se oni povezuju sa odvodima sustava za zaštitu. [11],[12]

4.3.2 Mehaničko djelovanje

Mehanička djelovanja udara munje se ponajprije očituju kao oštećenja i razaranja stupova, stabala, krovova, dimnjaka te ostalih dijelova građevina, kao i oštećenja i deformacije električnih instalacija. Struja munje posjeduje razornu silu koja djeluje na objekte. Ona može biti uzrokovana prolaskom struje udara munje kroz pukotine u stupovima i zidovima pri čemu u malom zatvorenom prostoru dolazi do naglog porasta tlaka što rezultira gubitkom mehaničke čvrstoće objekta i njegovim razaranjem. Sila također može nastati kao rezultat djelovanja magnetskog polja struje munje na zamku. Ta sila će djelovati na međusobno privlačenje vodiča ukoliko struja kroz vodiče zamke teče u istom smjeru, odnosno udaljavati ih ako struja teče različitim smjerovima. Ta privlačno-odbojna odnosno elektrodinamička djelovanja sila su ujedno i glavni uzrok mehaničkih oštećenja i naprezanja električnih uređaja, aparata i instalacija. [11],[12]

4.3.3 Termičko djelovanje

Najveće termičko djelovanje munje se ostvaruje na dnu voditeljskog kanala te na mjestu dodira silaznog voditeljskog kanala sa zemljom ili objektom na zemlji. Na mjestu dodira dolazi do taljenja dijela površine, no s obzirom da se veliki dio energije utroši na izračivanje i stvaranje pretlaka samo manji dio energije rezultira termičkim djelovanjem. Zbog toga je rastaljeni dio

površine vrlo malen pa je u prirodi otežano pronalaženje točnog mjesta udara munje. Eventualne eksplozije i požari su rezultat iskrenja na mjestu ulaska ili izlaska struje iz metalnih dijelova, ili nastaju zbog velikog prijelaznog otpora zbog lošeg kontakta te lošeg kontaktnog pritiska na spojnim mjestima. Za projektiranje i termički proračun LPS-a vrlo često je potrebno izračunati temperaturu na koju će se prilikom protoka struje munje zagrijati vodič LPS-a koja se potom mora usporediti s propisanim dopuštenim vrijednostima zagrijavanja. [11]

4.3.4 Optičko djelovanje

Svjetlosni učinci munje su rezultat isijavanja vruće vodljive plazme koja doseže temperature od više tisuća stupnjeva. Širenje kanala proboja odnosno plazme izaziva svjetlosni te popratni akustični efekt munje. Linijsko izbijanje prati svjetlosni efekt u obliku svjetlosnih crta, trakasta munja ima razgranato svjetlosno djelovanje dok je „perlasta“ munja u obliku više uzastopnih svjetlosnih kuglica. [11]

4.3.5 Akustično djelovanje

Naglo širenje vodljivog kanala uzrokuje nastanak vala zračnog tlaka koji se širi od kanala munje sve do udaljenosti od 10 km. Grmljavina je popratni akustični učinak tog vala zraka te se čuje kao prasak i tutnjava na manjim udaljenostima. Što je veća udaljenost od vodljivog kanala to su zračni tlak i brzina fronte zvučnog vala manji, a time je slabiji i akustični efekt munje. [11]

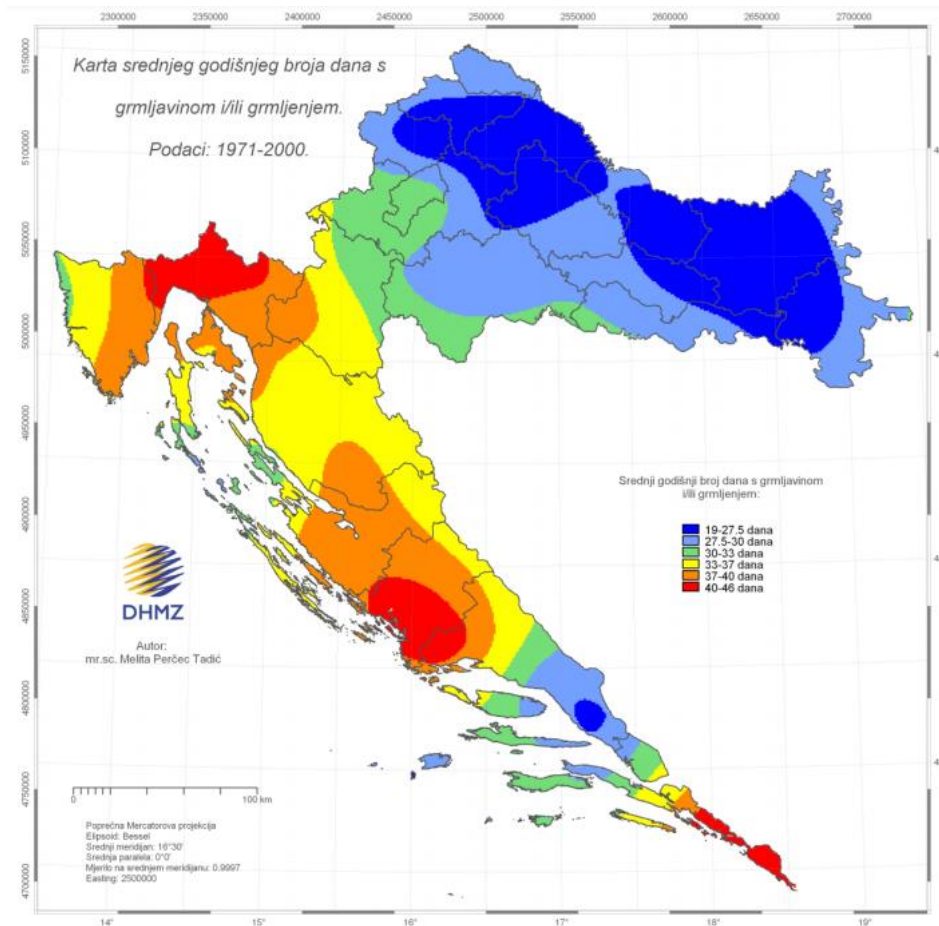
4.3.6 Djelovanje na čovjeka

Nesreće izazvane udarom munje mogu se podijeliti na izravne i posredne. Izravni se udari munje događaju na otvorenim vanjskim prostorima te u blizini objekata na zemlji izvan zone štíćenja. Premda je manji broj nesreća izazvan izravnim udarom munje, takvi slučajevi obično izazivaju najveću štetu i najčešće imaju tragične ishode. Pri izravnim udarima pogođena osoba dolazi pod napon koji postepeno raste kao i čelo strujnog vala. Kada napon prekorači vrijednost od otprilike 100 kV nastaje preskok na površini tijela u obliku električnog luka. Veći dio struje će teći površinom tijela te zbog razvoja visoke temperature po njemu izazivati opekline, no manji dio struje koji prolazi kroz tijelo predstavlja veću opasnost s obzirom da prolazi kroz čovjekov živčani i kardiovaskularni sustav te može biti smrtonosna ili izazvati trajne posljedice. Čovjekovo preživljavanje uvelike ovisi o iznosu i trajanju strujnog impulsa kroz tijelo pošto već količina od 50 mA u trajanju od 0,1 s može biti smrtonosna. [11], [15]

Do posrednih udara može doći na više načina. Najčešće nastupaju prilikom udara munje u nezaštićenu građevinu ili stablo u čijoj se neposrednoj blizini čovjek nalazi. Tako primjerice prilikom udara munje u stablo (ili neki drugi visoki, nezaštićeni objekt ispod kojeg se čovjek nalazi) dio struje munje napravi preskok sa višeg objekta na žrtvu. Drugi način posrednog udara je rezultat prolaska struje munje površinom tla od mjesta udara do mjesta na kojem se čovjek nalazi. Struja prolazi kroz tijelo od dodirne točke najbliže udaru munje, putuje kroz kardiovaskularni i živčani sustav te izlazi iz tijela na najudaljenijoj točki. Između njih se stvara napon koraka koji se povećava sa udaljenošću među točkama te ovaj oblik udara ujedno najčešće završava ljudskim žrtvama. Ukoliko se čovjek nalazi unutar nezaštićene ili loše zaštićene građevine koju je pogodila munja, impulsni val napona stvoren prolaskom struje munje kroz pogođeni objekt može izazvati proboj izolacije i iskrenje na elektroaparatima i elementima objekta. Ako se čovjek u takvom trenutku držao za neki metalni objekt kao što je slavina za vodu ili nalazio u blizini vodiča može stradati od spomenutih električnih pražnjenja. Zbog svega navedenoga važno je pravilno projektirati i izraditi sustav za zaštitu od djelovanja munje kako bi se opasnosti od materijalnih i ljudskih stradanja u potpunosti uklonile ili bile svedene na minimum. [11],[15]

4.4 Procjena rizika udara munje

Zbog utjecaja mnoštva faktora nemoguće je predvidjeti kada će točno doći do atmosferskog pražnjenja. Međutim, klimatsko-geografske značajke imaju veliki utjecaj na olujnu aktivnost, pa je u pravilu ona češća u južnim područjima i oko ekvatora (na mjestima visoke temperature i vlažnosti zraka) te opada prema sjeveru. Hrvatska se nalazi u umjerenom klimatskom pojasu, iako se i u Hrvatskoj olujne aktivnosti više manifestiraju u južnijim dijelovima. Kako bi se pravilno izabrala razina zaštite od munje, odnosno projektirao sustav LPS-a potrebno je poznavati klimatske značajke i olujni intenzitet na mjestu projektiranja, odnosno broj grmljavinskih dana tokom mjeseca ili godine. Prikupljanje podataka o grmljavinskim danima vrše meteorološke stanice čiji se izvještaji koriste kao podloga za izradu izokerauničkih karata. Te karte predstavljaju raspodjelu središnjeg broja grmljavinskih dana na nekom području tokom mjeseca ili godine te je na temelju njihovog praćenja moguće bolje predvidjeti broj grmljavinskih dana i stoga organizirati bolju sigurnost i održavanje važnih građevina i objekata. [11], [12]



Slika 4.5: Izokeraunička karta Hrvatske za razdoblje od 1971. do 2000. godine [6]

Podaci o broju grmljavinskih dana sami po sebi nisu dovoljni za projektiranje sustava za zaštitu od munje pošto prilikom grmljavinskih dana ne dolazi nužno do samog udara munje. Za točnije određivanje vjerojatnosti udara groma koriste se optički detektori i brojači munja, koji pomoću podataka o broju udara groma na nekom području i vlastitog slikanja olujnog neba omogućuju zaključivanja o odnosu izbijanja prema zemlji i svih izbijanja. Taj odnos predstavlja numerički podatak, koji za umjerenu klimu u kojoj se nalazi Hrvatska iznosi od 2 do 3 dok za tropsku, olujno aktivniju klimu iznosi 7. Na temelju tog podatka moguće je izračunati gustoća udara munja u zemlju po 1 km^2 pomoću formule (4-9):

$$N_s = N_i \cdot (0,1 + 0,35 \sin a) \cdot (0,4 \mp 0,2) \quad (4-9)$$

gdje N_s predstavlja broj gromova u toku jedne godine na 1 km^2 , N_i predstavlja izokerauničku razinu promatranog područja dok a predstavlja kut geografske širine područja. [11]

Za izračun gustoće udara munje se koristi i formula (4-10) koja zadovoljava s obzirom na zahtjeve Tehničkog propisa za zaštitu građevina od udara munje:

$$N_g = 0.04 \cdot T_d^{1.25} \quad (4-10)$$

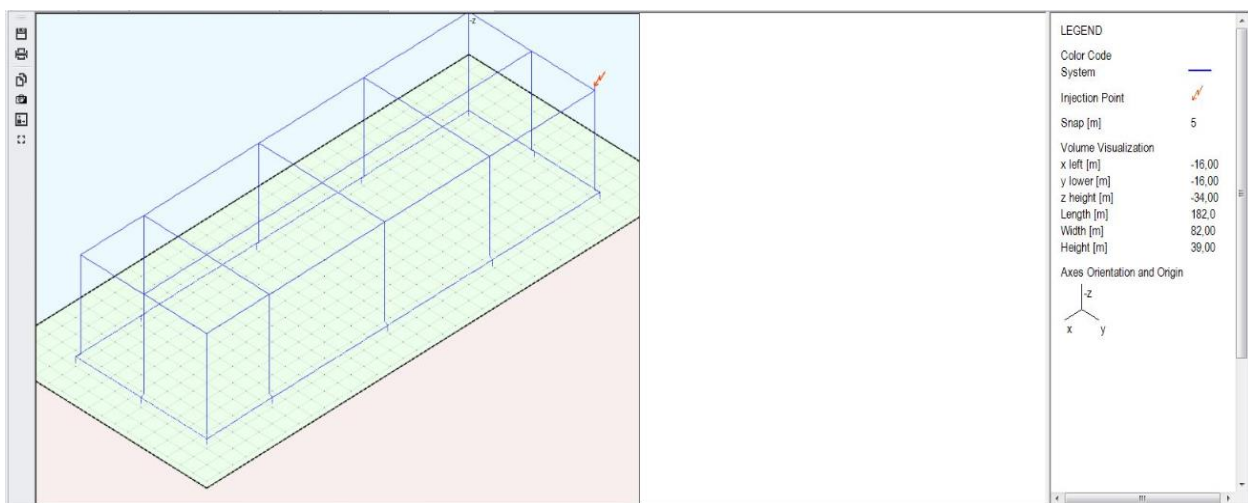
gdje je N_g gustoća udara munje, T_d broj grmljavinskih dana dobiven iz izokerauničke karte [6].

Od 2009. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva (FER) se razvija i usavršava sustav za lokaciju atmosferskih pražnjenja (SLAP) koji omogućuje efikasnije predviđanje pojave grmljavine na nekom području te preciznije određivanje mjesta i vremena udara munje. SLAP se od 2012. godine implementira u vođenju prijenosnog EES-a te njegovi podaci pružaju korisne informacije za planiranje budućih dalekovoda, održavanje i projektiranje transformatorskih stanica i vodova te za odabir odgovarajuće zaštite od atmosferskih prenapona. [16]

5. SIMULACIJA I REZULTATI

Simulacija se provodi u skladu s odredbama IEC 62305 norme, odnosno njezinih sastavnica. Normom su definirani sastavni dijelovi vanjskog sustava za zaštitu te razine zaštite tih sustava (LPL) kao i standardni parametri munje te ekvivalentna frekvencija svakog pojedinog udara.

Koristeći program XGSLab unosom x, y i z koordinata te specifikacija svakog pojedinog elementa modelirana je građevina dužine 150 m, širine 50 m te visine 30 m. Vanjski uzemljivački sustav čine sustav hvataljki, odvoda te uzemljivača od pocinčanog čelika, prema slici 5.1



Slika 5.1: Model građevine sa sustavom zaštite od djelovanja munje i mjestom udara

Na slici 5.1 je prikazan model građevine s pripadajućim vanjskim sustavom zaštite od djelovanja munje te s prikazanim mjestom udara u rubni dio konstrukcije. Simulacija će se raditi za dva slučaja različitih mjesta udara munje u konstrukciju (različiti *Injection Point*) te jedan slučaj bez štapnog uzemljivačkog sustava, stoga će se obraditi i komentirati ukupno 3 slučaja simulacije.

Pomoću modula XGSA_FD, koji omogućuje analizu uzemljivačkih sustava u frekvencijskoj domeni, prikazat će se i usporediti rezultati dobiveni simulacijom, odnosno raspodjela struje atmosferskog pražnjenja, potencijala, napona koraka, potencijala površine zemlje te sigurna područja građevine za različite frekvencije struje atmosferskog pražnjenja i za različita mjesta udara munje u građevinu. Vrijednosti i određivanje ulaznih parametara za svaki udar (vršna i efektivna vrijednost udara, trajanje čela udara i ekvivalentna frekvencija udara) su objašnjene u prethodnom poglavlju.

Korišteni su sljedeći ulazni podaci:

- Homogeno tlo
- Niskofrekventna otpornost tla: $80 \Omega\text{m}$
- Visokofrekventna relativna permitivnost tla: 6

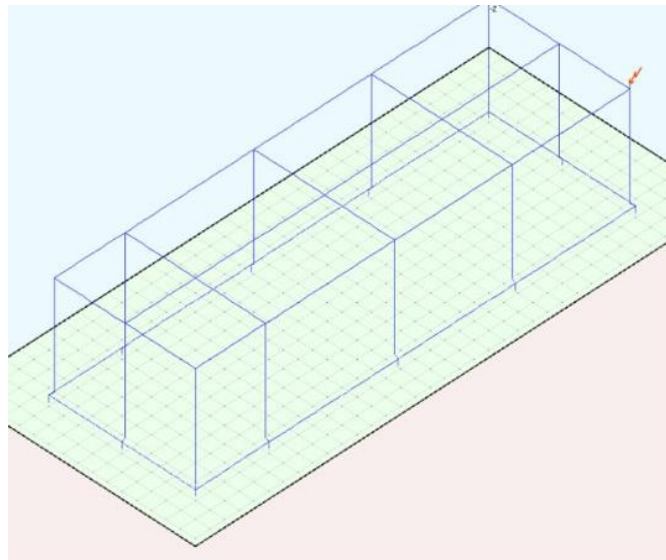
Parametri impulsnog i njegovog ekvivalentnog sinusoidalnog valnog oblika munje:

- Prvi pozitivni kratki impuls: $I=200 \text{ kA}$, $I_{\text{ef}} = \frac{200}{\sqrt{2}} = 141,4 \text{ kA}$, $f=25 \text{ kHz}$
- Prvi negativni kratki impuls: $I=100 \text{ kA}$, $I_{\text{ef}} = \frac{100}{\sqrt{2}} = 70,7 \text{ kA}$, $f=250 \text{ kHz}$
- Naknadni negativni kratki impuls: $I=50 \text{ kA}$, $I_{\text{ef}} = \frac{50}{\sqrt{2}} = 35,35 \text{ kA}$, $f=1 \text{ MHz}$

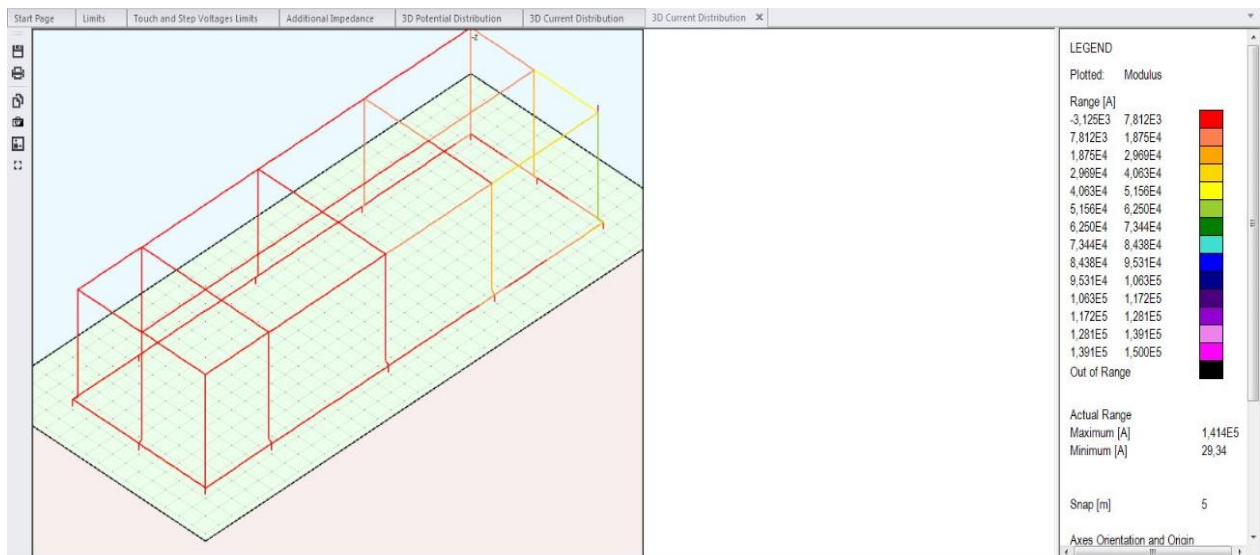
5.1 Udar munje u vrh konstrukcije sa štapnim uzemljivačima

U prvom slučaju simulacije razmatrat će se udar munje u hvataljku postavljenu u vrh građevinske konstrukcije sa štapnim uzemljivačima jednoliko raspoređenim duž građevinske konstrukcije i postavljenim na dubinu od 2 m.

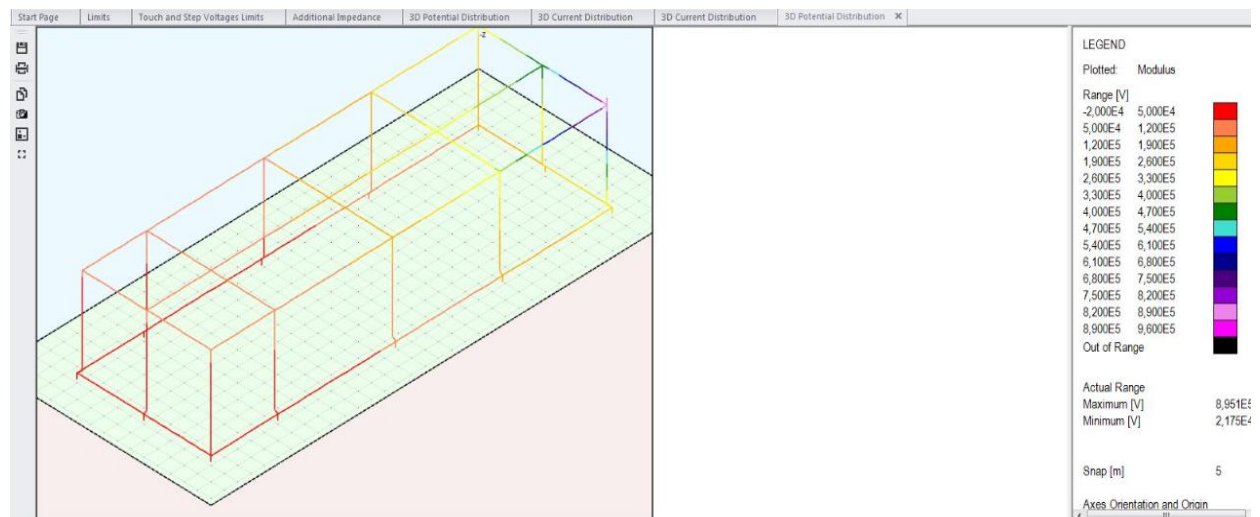
5.1.1 Prvi pozitivni impuls



Slika 5.2: Model sustava za zaštitu sa mjestom udara munje



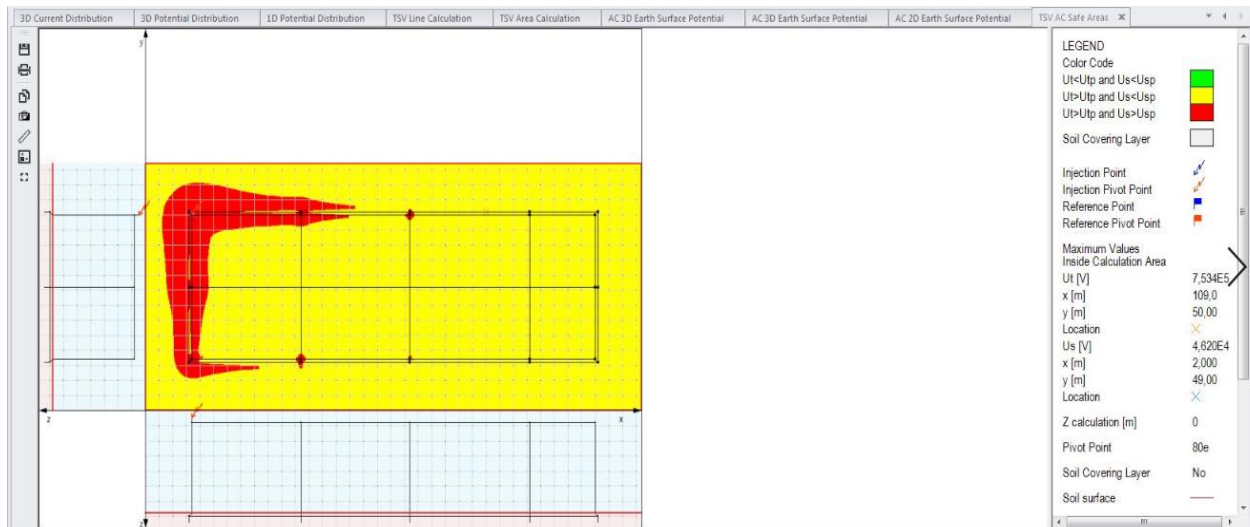
Slika 5.3: 3D prikaz raspodjele struje za 1. pozitivni impuls



Slika 5.4: 3D prikaz raspodjele potencijala za 1. pozitivni impuls

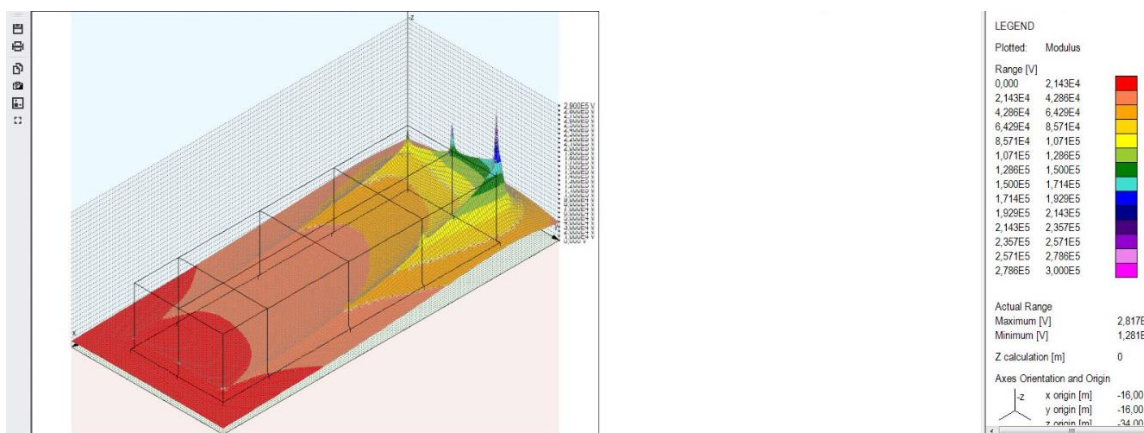
Na slikama 5.3 i 5.4 prikazana je 3D raspodjela struje odnosno potencijala po sustavu za zaštitu za 1. pozitivni impuls. Injektirana je struja efektivne vrijednosti 141,4 kA koja predstavlja i najveću vrijednost koja se javlja na hvataljci. Struja munje se raspoređuje po odvodima najbližim hvataljci te njezin najveći dio (62,5 kA) prolazi kroz vertikalni odvod direktno povezan sa hvataljkom. Pri raspodjeli potencijala najveće vrijednosti se također javljaju na hvataljci (895 kV) i odvodima direktno povezanim s hvataljkom. Iz slika je vidljivo da je raspodjela struje i potencijala u pojedinačnim odvodima asimetrična (*neuniformna*) te se njihove vrijednosti smanjuju udaljavanjem od mjesta udara. Takva raspodjela struje može izazvati veće iznose

magnetskog polja što zahtjeva dodatnu unutarnju zaštitu ili razmještaj osjetljivih instalacija unutar objekta. [13]



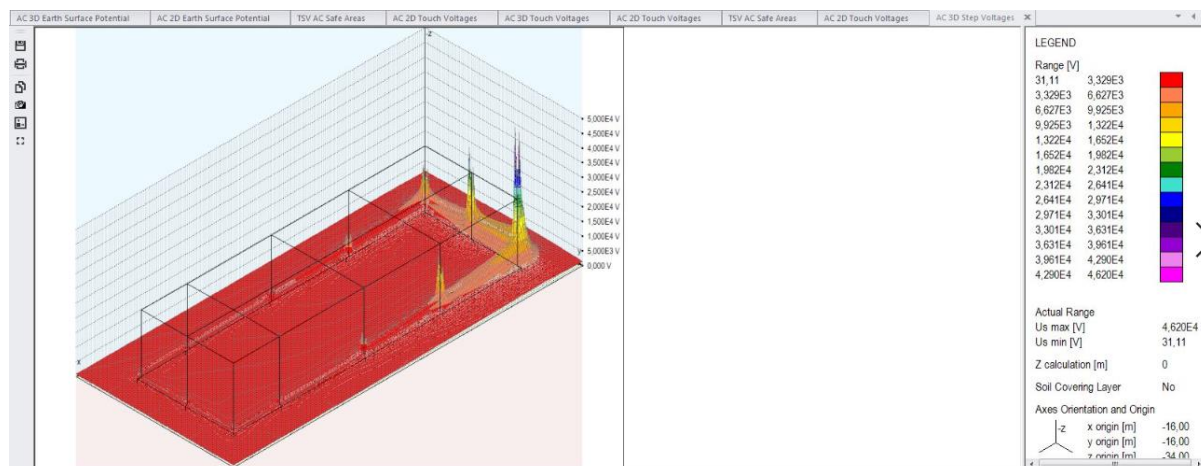
Slika 5.5: 2D Prikaz sigurnih područja za 1. pozitivni impuls udara munje

Slika 5.5 prikazuje sigurna područja povezana s raspodjelom napona koraka i napona dodira oko i iznad uzemljivačkog sustava. Kao dopuštene vrijednosti napona dodira i koraka uzimaju se podaci određeni EN 50522 normom. Napon dodira je u svakom dijelu konstrukcije veći od dopuštenog dok je napon koraka veći od dopuštenog na rubovima i oko dijelova uzemljivačkog sustava najbližima mjestu udara. S obzirom da je riječ o tlu male otpornosti, situacija se može popraviti nanošenjem površinskog sloja visoke otpornosti. Naponi koraka se mogu popraviti i uporabom boljeg uzemljivačkog sustava, a naponi dodira izolacijom i sprječavanjem dodira s odvodima sustava. [13]



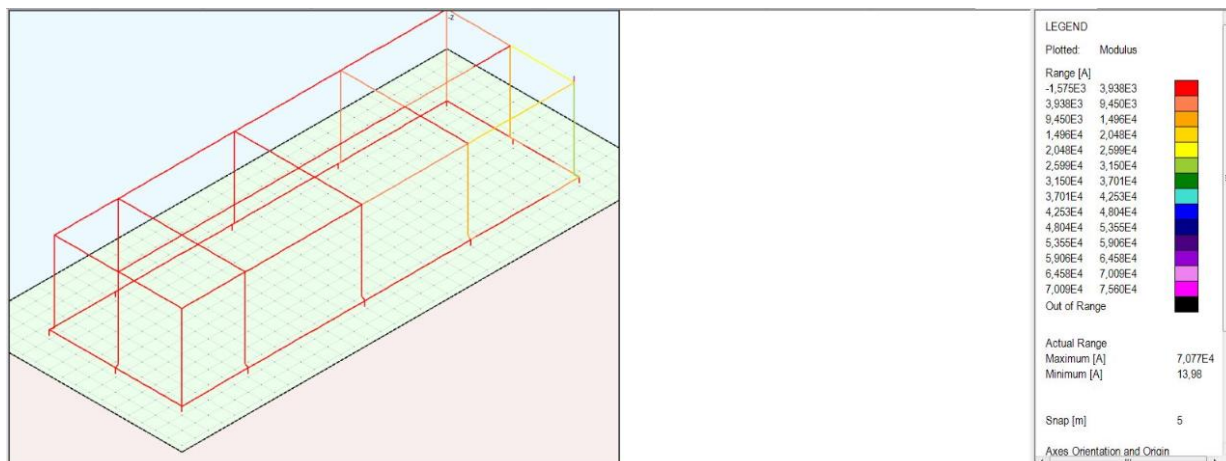
Slika 5.6: 3D prikaz potencijala zemlje za 1. pozitivni impuls

Na slici 5.6 vidljiv je porast potencijala površine zemlje s približavanjem mjestu udara munje te je u blizini mjesta udara i uzemljenja vidljiv visoki potencijal, koji je najviši izvan građevinske konstrukcije što rezultira naglim rastom napona koraka iznad dopuštenog i opasnošću za ljude, vidljivo sa slike 5.7.



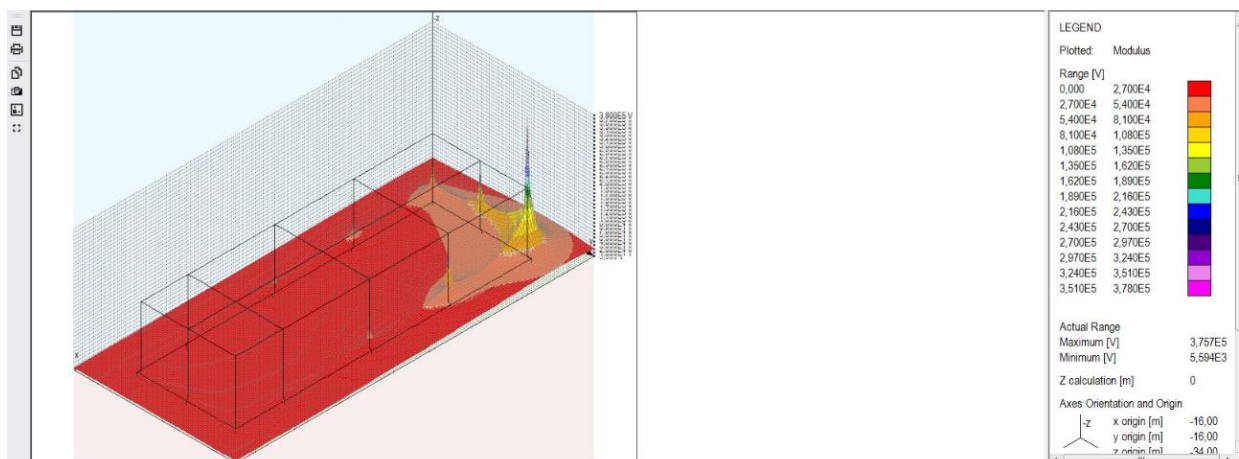
Slika 5.7: 3D prikaz napona koraka za 1. pozitivni impuls

5.1.2 Prvi negativni impuls

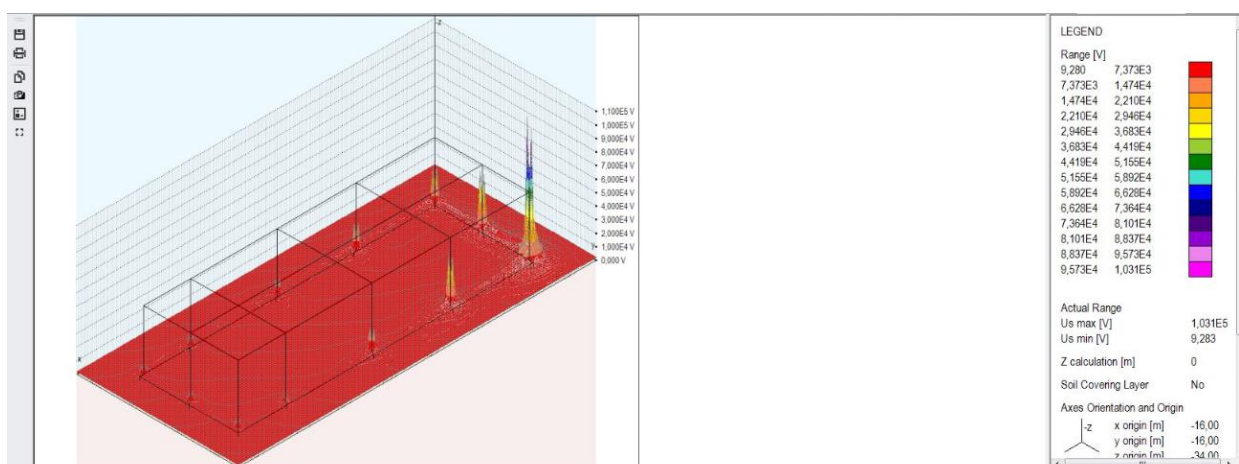


Slika 5.8: 3D prikaz raspodjele struje za 1. negativni impuls

Na slici 5.8 prikazana raspodjela struje 1. negativnog impulsa pokazuje slične značajke kao raspodjela 1. pozitivnog impulsa. S obzirom da je efektivna vrijednost utisnute struje manja nego za prvi impuls, manja je i struja na hvataljci te struja kroz odvođe.



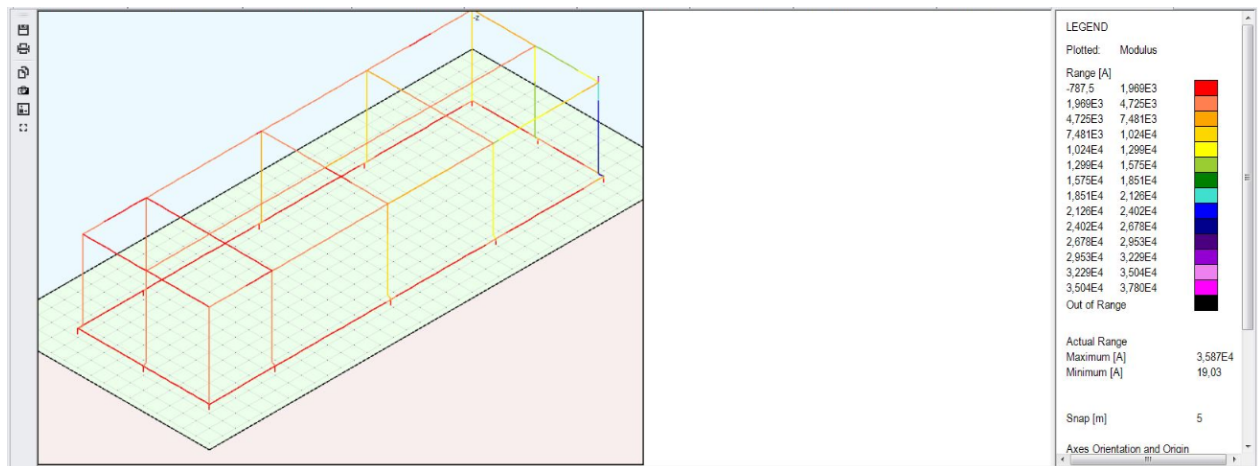
Slika 5.9: 3D prikaz potencijala zemlje za 1. negativni impuls



Slika 5.10: 3D prikaz napona koraka za 1.negativni impuls

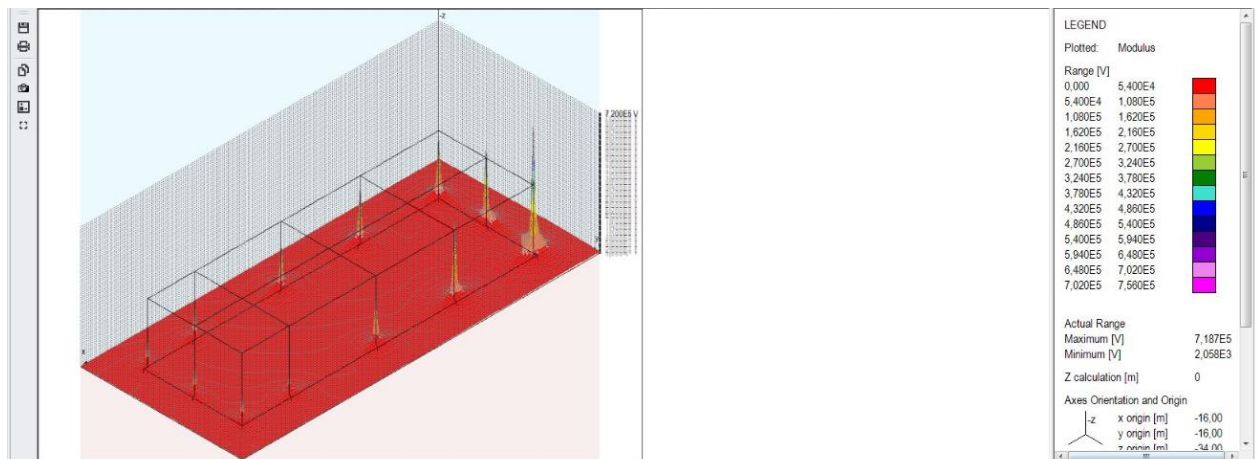
Za 1. negativni impuls na slici 5.9 također je vidljiv nagli rast potencijala zemlje na mjestu utiskivanja struje, odnosno neravnomjerna raspodjela potencijala. Maksimalna vrijednost potencijala zemlje je veća nego za 1. pozitivni impuls te ima puno oštiri gradijent porasta približavanjem mjestu udara. Stoga je i napon koraka vidljiv na slici 5.10 veće maksimalne vrijednosti u odnosu na pozitivni impuls te na mjestima postavljanja uzemljivača predstavlja opasnost za čovjeka jer premašuje dopuštene vrijednosti.

5.1.3 Naknadni negativni impuls



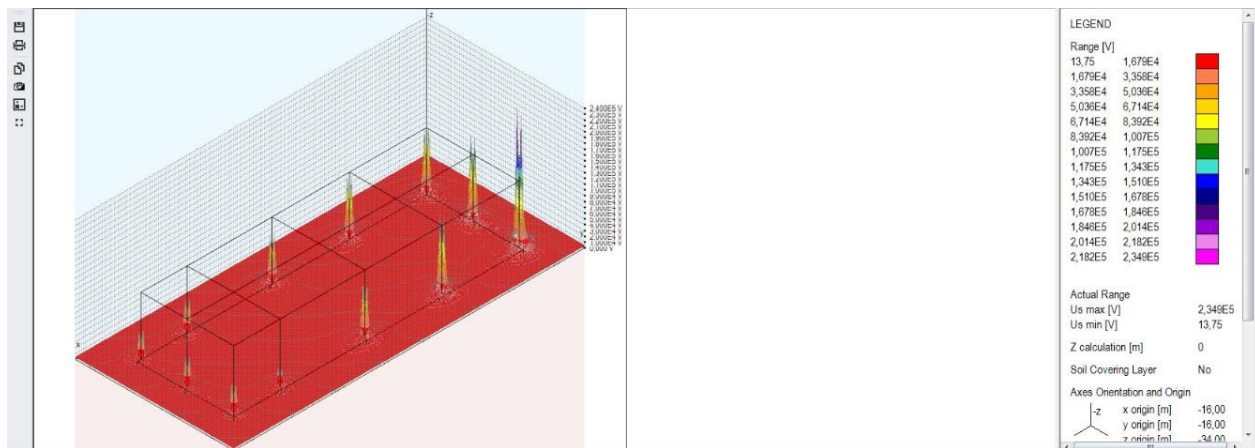
Slika 5.11: 3D prikaz raspodjele struje za naknadni negativni impuls

Struja naknadnog negativnog impulsa ima najmanju amplitudu (35,8 kA) te najveći dio struje prolazi kroz odvod direktno ispod hvataljke. Međutim za razliku od prethodna dva slučaja vidljiva je simetričnija distribucija kroz ostale odvođe. S obzirom da se radi o većoj građevini, pri ovim frekvencijama moguća je pojava efekta putujućih valova kao rezultat nagle promjene napona.



Slika 5.12: 3D prikaz potencijala zemlje za naknadni negativni impuls

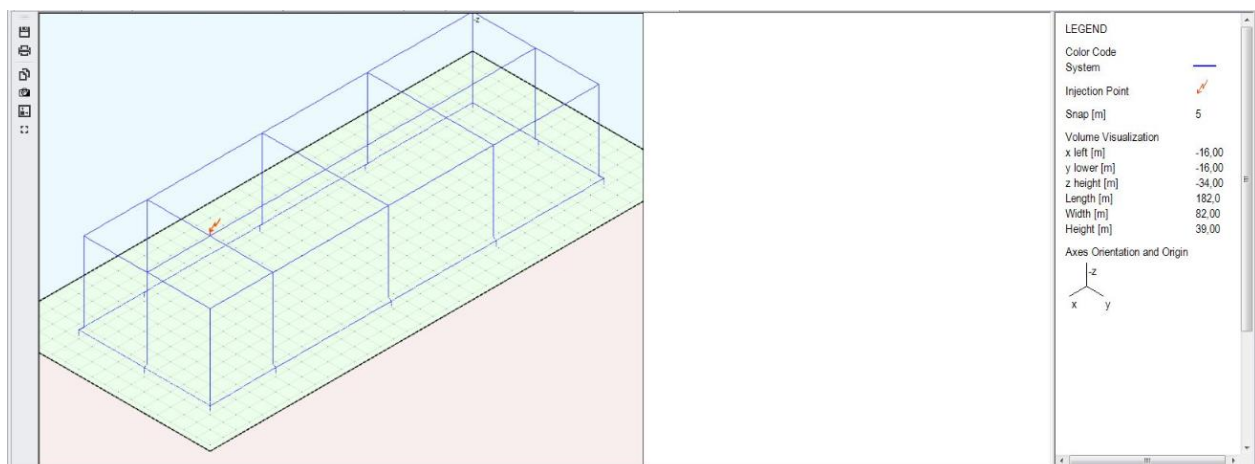
Potencijal zemlje doseže najviše vrijednosti od sva tri slučaja te posjeduje najoštriji gradijent rasta oko svih mjesta uzemljenja. To predstavlja opasna područja previsokog napona koraka, kao što je vidljivo i iz slike 5.12. Napon koraka također poprima najviše vrijednosti od sva tri slučaja.



Slika 5.13: 3D prikaz napona koraka za naknadni negativni impuls

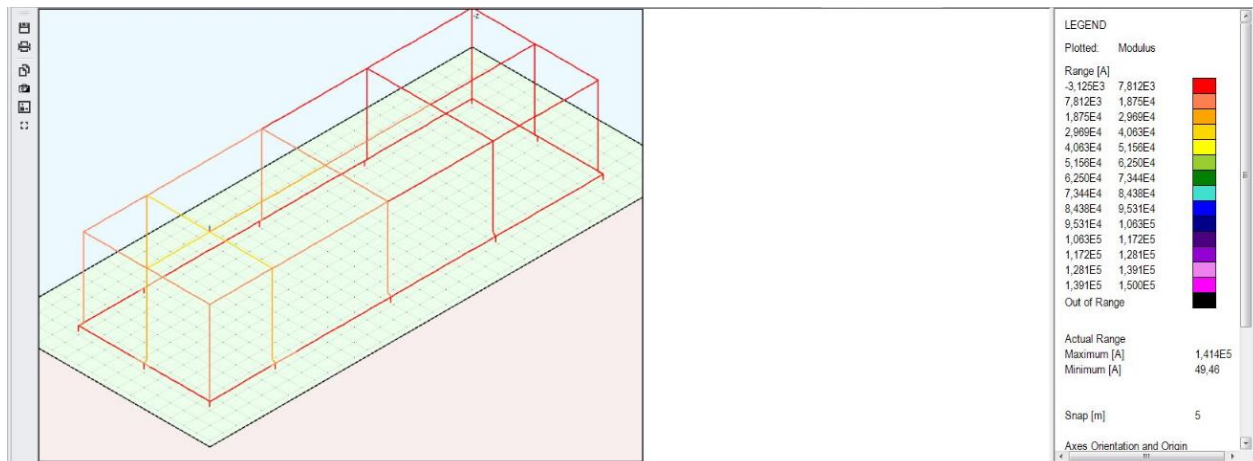
5.2 Udar munje središnji dio konstrukcije sa štapnim uzemljivačima

U drugom slučaju simulacije razmatrat će se udar munje u hvataljku postavljenu u središnji dio građevinske konstrukcije, prema slici 5.14 i njezin utjecaj na sustav vanjske zaštite sa štapnim uzemljivačima jednoliko raspoređenim duž građevinske konstrukcije i postavljenim na dubinu od 2 m.

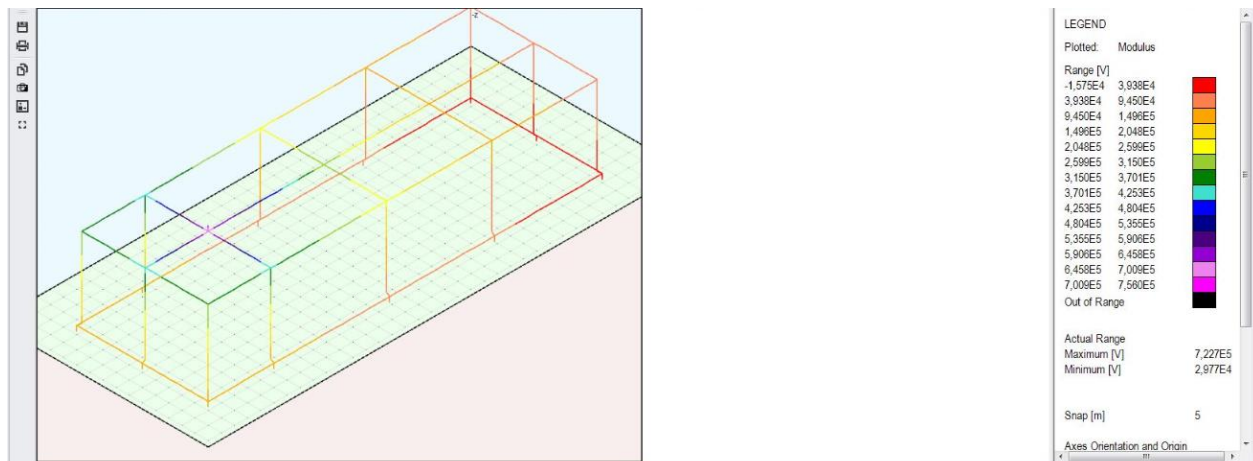


Slika 5.14: Shema uzemljivačkog sustava sa promjenom mjesta udara munje

5.2.1 Prvi pozitivni impuls

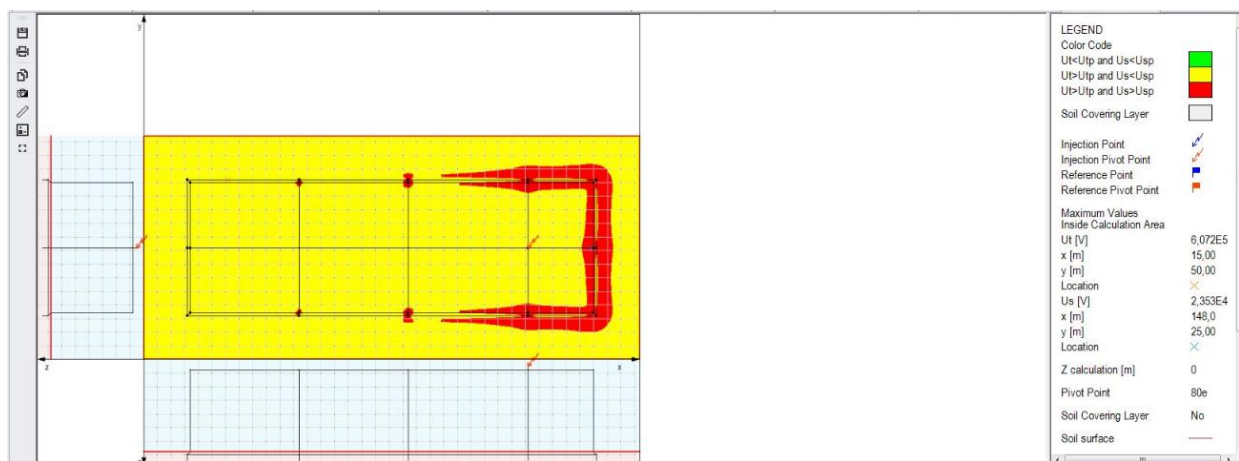


Slika 5.15: 3D prikaz raspodjele struje za 1. pozitivni impuls munje



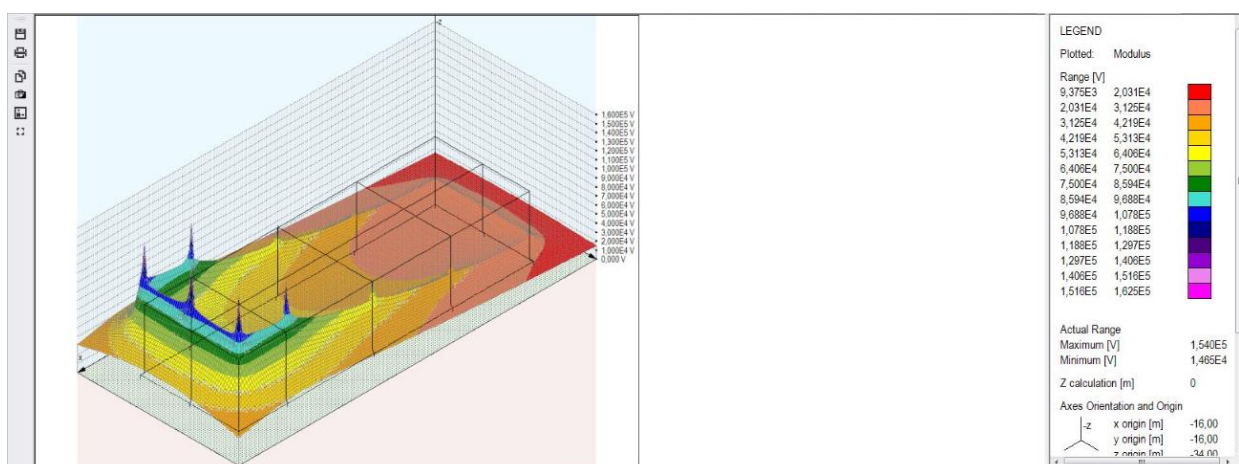
Slika 5.16: 3D prikaz raspodjele napona za 1. pozitivni impuls munje

S obzirom da se radi o injektiranju munje u središnji dio sustava, struja munje se podjednako raspodjeljuje po sastavnim dijelovima zaštite najbližim hvataljci, prema slici 5.15. Dobiva se puno simetričnija raspodjela u odnosu na slučaj udara u hvataljku na rubu građevine. Najveća vrijednost (141,4 kA) se opet očekivano pojavljuje na hvataljci. Isto vrijedi i za distribuciju napona, koji najveću vrijednost (722,7 kA) poprima na području hvataljke te se simetrično dijeli po 4 sastavnice direktno povezane sa hvataljkom te zatim po njima direktno povezanim vertikalnim odvodima i uzemljenju, prema slici 5.16. Maksimalna i minimalna vrijednost napona su manje u odnosu na 1. pozitivni impuls udara munje u rub građevine.



Slika 5.17: 2D prikaz sigurnih područja za 1. pozitivni impuls

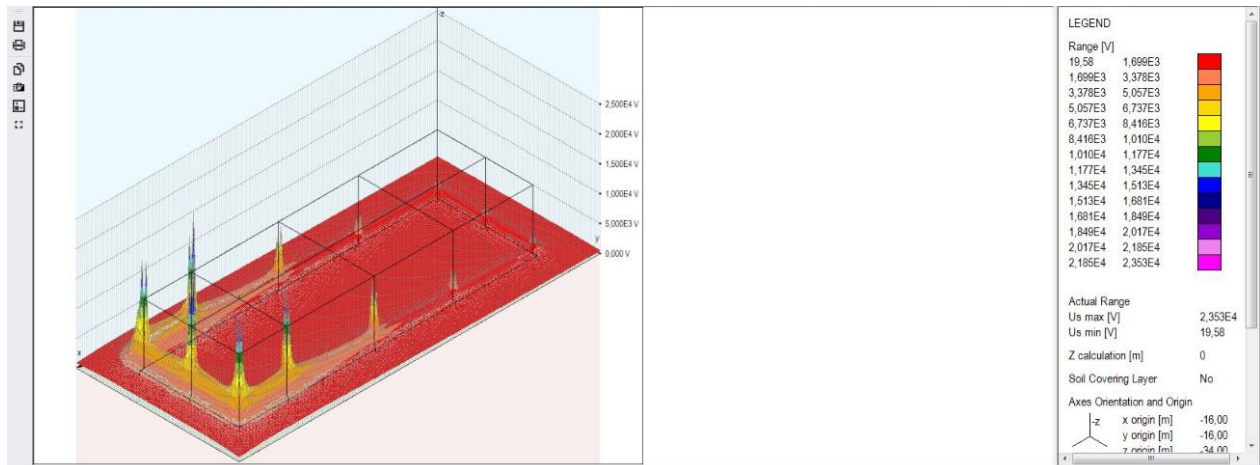
Slika 5.17 prikazuje sigurna područja za prvi pozitivni impuls udara u središnji dio građevine. Najveće vrijednosti napona dodira i koraka su manje u odnosu na slučaj udara munje u rub građevine, no napon dodira je i u ovom slučaju veći od dopuštenog na cijelom području konstrukcije dok je napon koraka veći od dopuštenog na rubovima i oko dijelova uzemljivačkog sustava najbližima mjestu udara, s obzirom da se na vertikalnim odvodima najbližim udaru pojavljuju najveće vrijednosti napona.



Slika 5.18: 3D prikaz potencijala zemlje za 1. pozitivni impuls

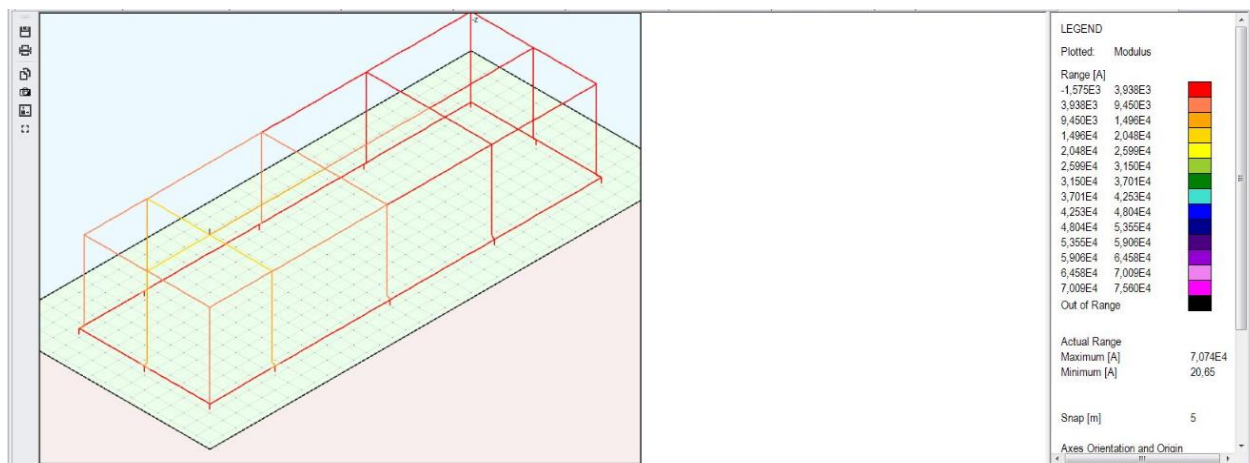
Potencijal zemlje najviše raste na rubovima uzemljivačkog sustava, odnosno na mjestu ukopanih uzemljivačkih štapova najbližih mjestu udara munje, vidljivo prema slici 5.18. Vršna vrijednost potencijala zemlje je manja u odnosu na udar munje u rub građevine s obzirom da je distribucija struje i napona po sustavu za zaštitu puno simetričnija. Slično vrijedi i za napon koraka koji je također manji nego za 1. pozitivni impuls munje u rub građevine, ali na rubnim dijelovima

uzemljivačkog sustava prekoračuje dopuštene vrijednosti i predstavlja opasnost za ljude. Prema slici 5.19 vidljiv je njegov nagli porast na mjestima ukopanih uzemljivačkih štapova najbližih hvataljci.



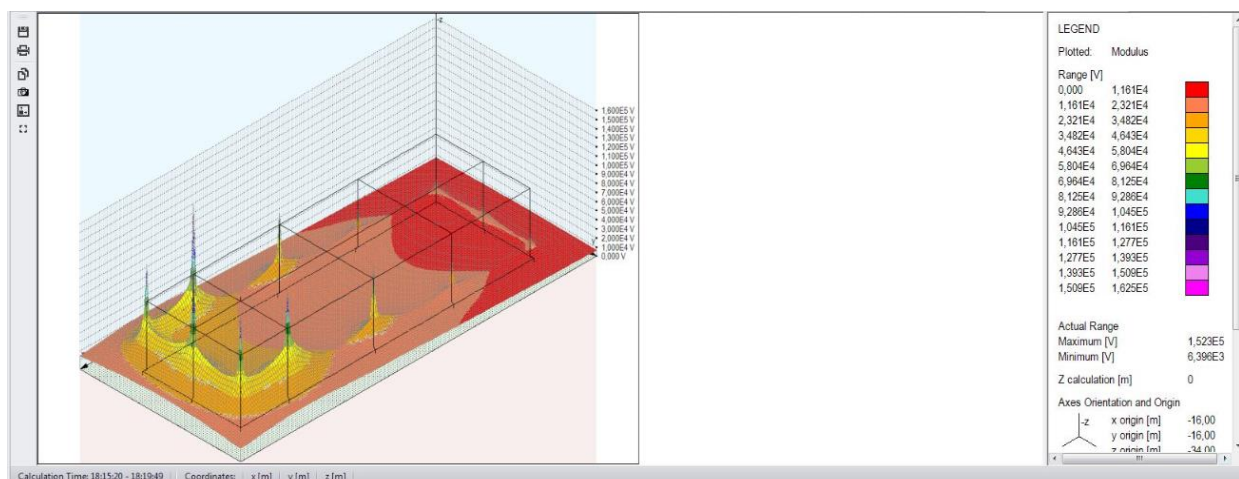
Slika 5.19: 3D prikaz napona koraka za 1. pozitivni impuls

5.2.2 Prvi negativni impuls

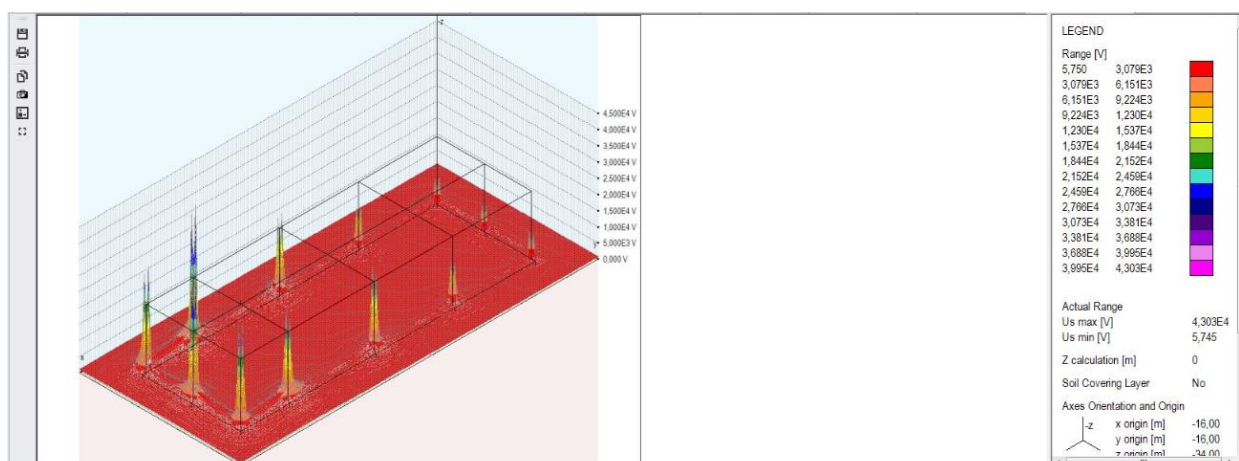


Slika 5.20: 3D prikaz raspodjele struje za 1. negativni impuls

Distribucija struje za prvi negativni impuls je slična kao i za prvi pozitivni impuls. Utisnuta struja je manja pa je manja vrijednost struje na hvataljci (70,7 kA), kao i vrijednost struje niz odvođe do uzemljivačkih štapova.



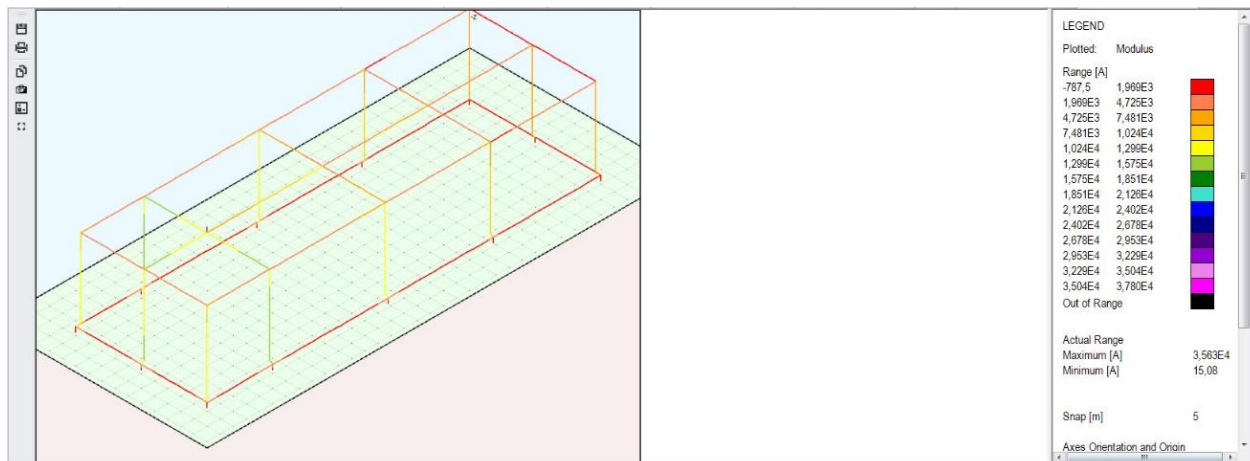
Slika 5.21: 3D prikaz potencijala zemlje za 1. negativni impuls



Slika 5.22: 3D prikaz napona koraka za 1. negativni impuls

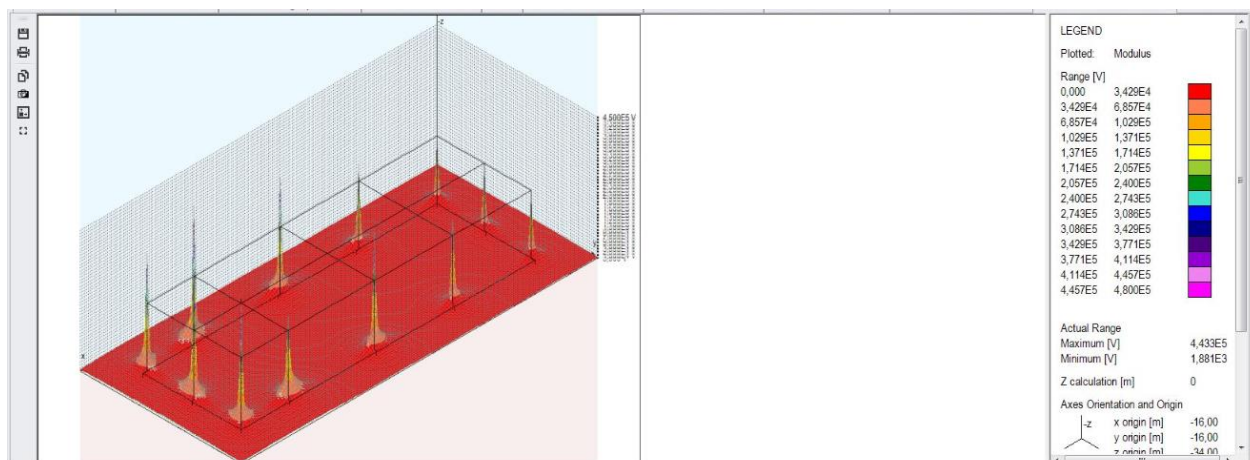
Potencijal površine zemlje ima približno jednaku maksimalnu vrijednost (152 kV) kao i prvi pozitivni impuls, ali oštiji gradijent porasta, prema slici 5.21. Potencijal naglo raste na mjestu uzemljivačkih štapova. Napon koraka poprima veću vrijednost nego za prvi pozitivni impuls, te oštro raste na mjestu svih uzemljivačkih štapova građevinskog objekta, prema slici 5.22. Mjesta njegovog naglog rasta premašuju dopuštene vrijednosti napona koraka te predstavljaju opasnost za čovjeka.

5.2.3 Naknadni negativni impuls

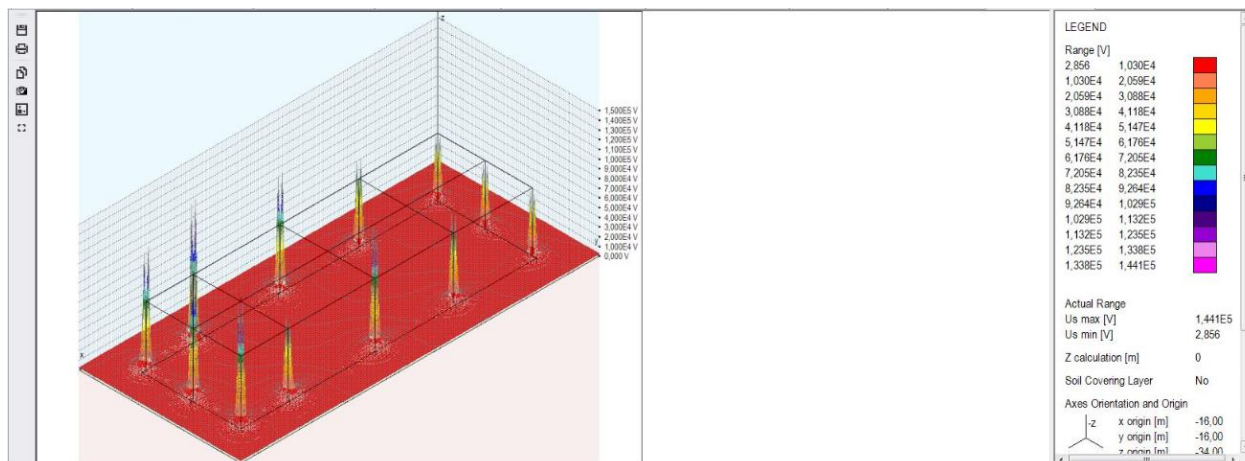


Slika 5.23: 3D prikaz raspodjele struje za nakladni negativni impuls

Distribucija struje nakladnog negativnog impulsa pokazuje odstupanje od prethodna dva slučaja. Hvataljka prima najvišu vrijednost struje (35,63 kA) te se struja raspodjeljuje po dijelovima sustava za zaštitu. U vođenju prema uzemljivačkom sustavu kod nakladnog negativnog impulsa na svim odvodima građevinske konstrukcije vidljiva je simetričnija distribucija struje.



Slika 5.24: 3D prikaz rasta potencijala zemlje za nakladni negativni impuls

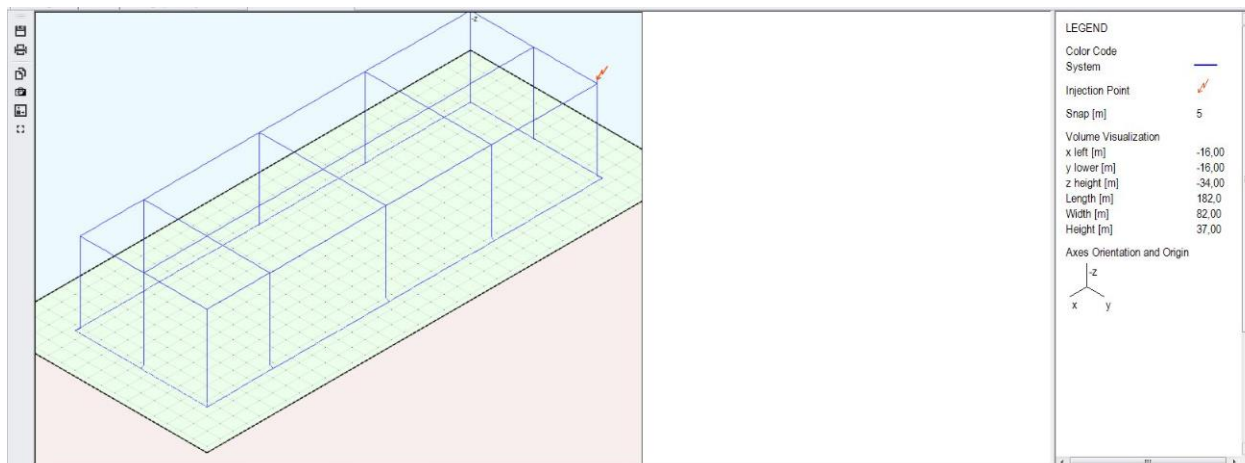


Slika 5.25: 3D prikaz napona koraka za naknadni negativni impuls

Potencijal zemlje i napon koraka postižu najveće vrijednosti od sva tri slučaja. Potencijal zemlje za naknadni negativni impuls ima najoštriji porast, u području oko svakog štapnog uzemljivača, prema slici 5.24 Napon koraka prema slici 5.25 premašuje dopuštene vrijednosti na svim mjestima uzemljenja i njihovoj neposrednoj okolini.

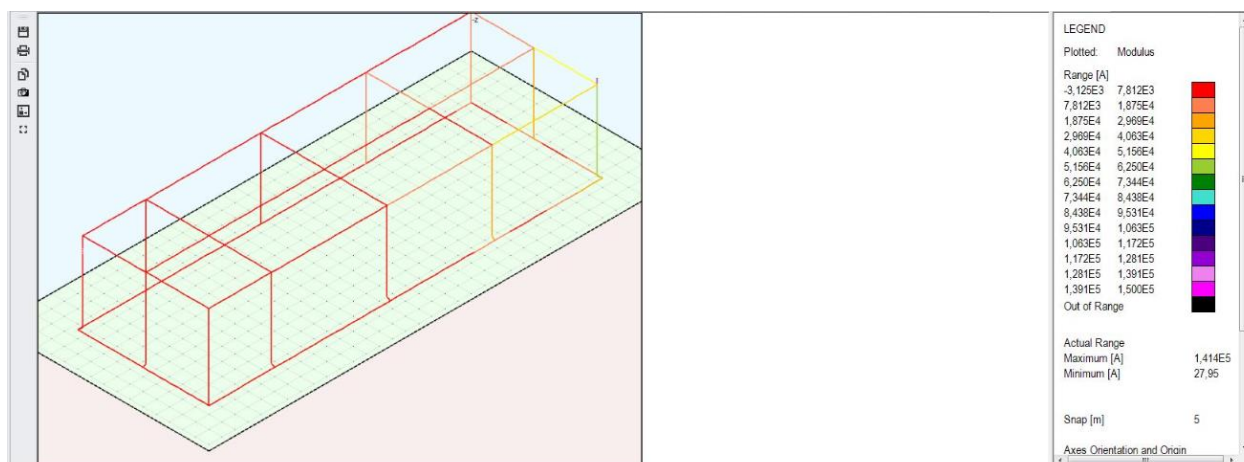
5.3 Udar munje u rub konstrukcije bez štapnih uzemljivača

U trećem slučaju razmatrat će se udar munje u hvataljku postavljenu u vrh građevinske konstrukcije bez uzemljivačkog sustava u obliku ukopanih štapnih uzemljivača.



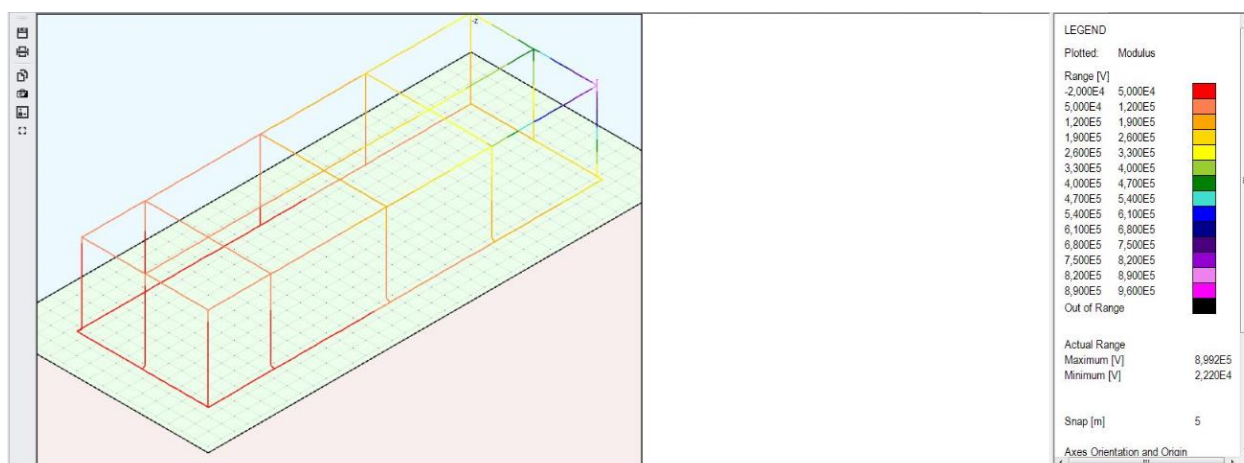
Slika 5.26: Sustav za zaštitu bez ukopanih štapnih uzemljivača

5.3.1 Prvi pozitivni impuls



Slika 5.27: 3D prikaz raspodjele struje za 1. pozitivni impuls

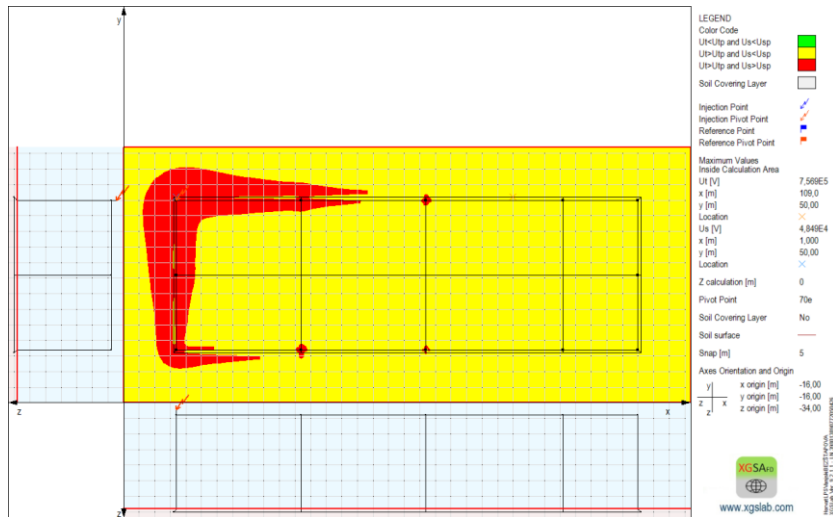
Na slici 5.27 je prikazana 3D raspodjela struje za prvi pozitivni impuls bez štapnih uzemljivača. Raspodjela struje za prvi pozitivni impuls je slična slučaju sa štapnim uzemljivačima. Injektirana je efektivna vrijednost struje (141,4 kA) koja se raspoređuje po odvodima najbližim hvataljci. Najveći iznos struje prolazi kroz odvod direktno povezan s hvataljkom te se na uzemljivačkom prstenu povezanom s tim odvodom javlja nešto veća struja nego u slučaju s uzemljenim hvataljkama. Vrijednost struje opada udaljavanjem od mjesta udara.



Slika 5.28: 3D prikaz raspodjele napona za 1. pozitivni impuls

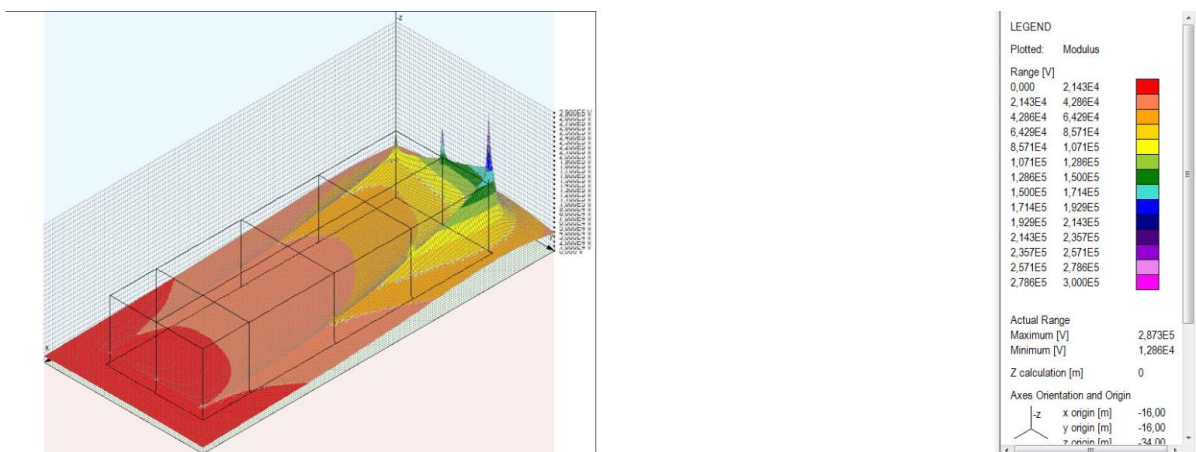
Maksimalna i minimalna vrijednost potencijala je zbog odsustva štapnih uzemljivača očekivano nešto veća (899 kV) u odnosu na slučaj sa štapnim uzemljivačima (895 kV). Raspodjela

potencijala je nesimetrična te opada s udaljavanjem od mjesta udara, a najveća je na hvataljci i dijelovima sustava direktno povezanim s hvataljkom, vidljivo na slici 5.28.

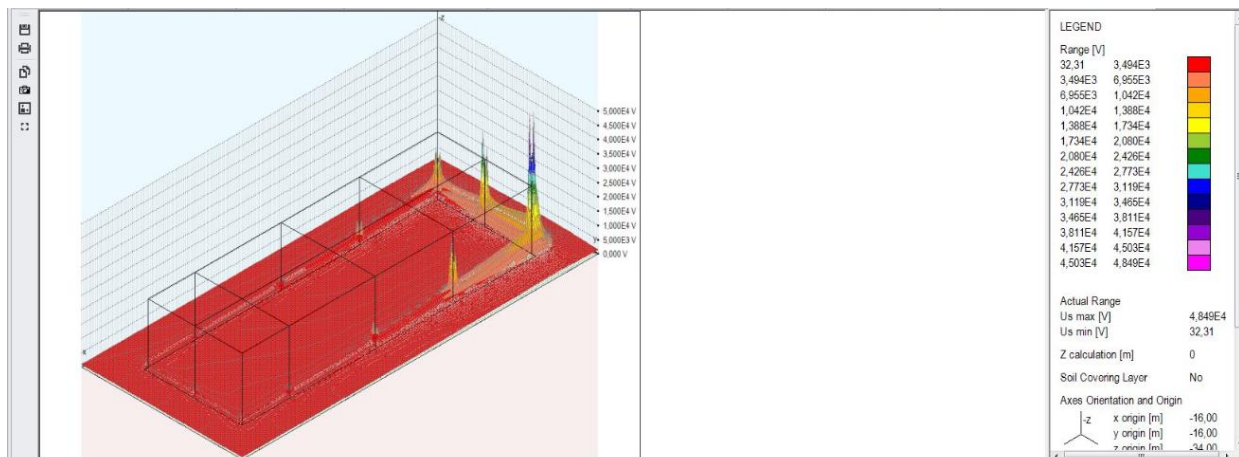


Slika 5.29: 2D prikaz sigurnih područja za 1. pozitivni impuls

U odnosu na slučaj sa štapnim uzemljivačima, napon dodira i napon koraka imaju veće maksimalne vrijednosti. Napon koraka premašuje dopuštene vrijednosti na rubovima i oko dijelova uzemljivačkog sustava najbližima mjestu udara na većem području od slučaja sa štapnim uzemljenjem dok napon dodira predstavlja opasnost na području cijele građevine, vidljivo prema slici 5.29.



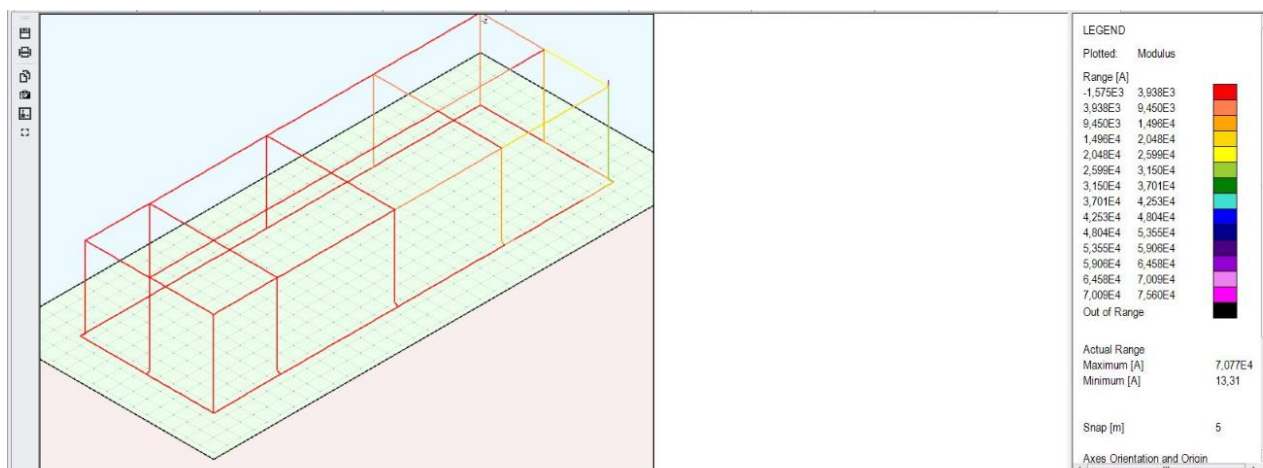
Slika 5.30: 3D prikaz potencijala zemlje za 1. pozitivni impuls



Slika 5.31: 3D prikaz napona koraka za 1. pozitivni impuls

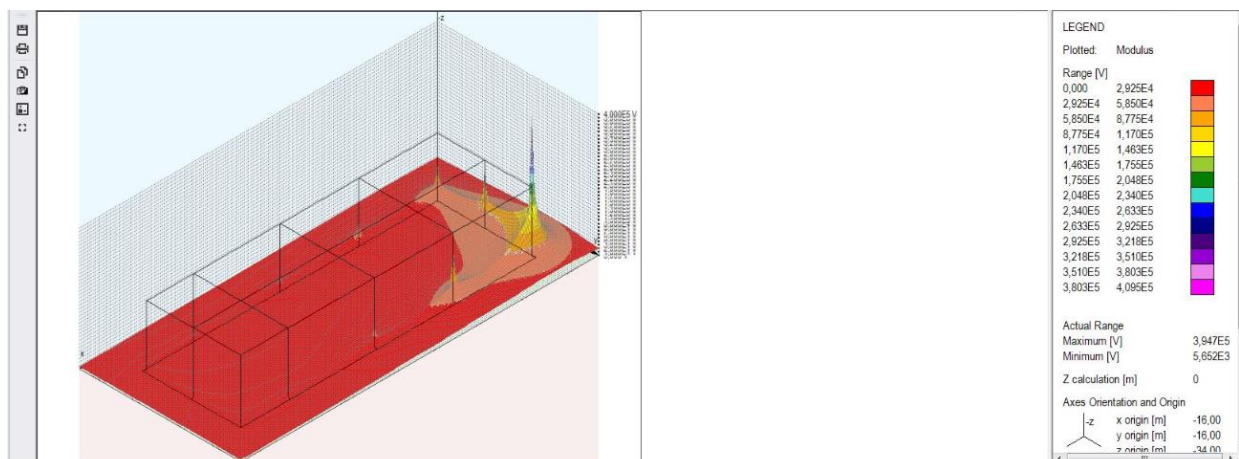
Na slikama 5.30 i 5.31 prikazani su potencijal zemlje i napon koraka za 1.pozitivni impuls bez štapnih uzemljivača. Maksimalne vrijednosti potencijala zemlje (287,3 kV) i napona koraka (48,49 kV) su očekivano veće u odnosu na slučaj sa štapnim uzemljivačima. Potencijal zemlje i napon koraka naglo rastu približavanjem mjestu udara te predstavljaju opasnost i izvan same građevinske konstrukcije.

5.3.2 Prvi negativni impuls



Slika 5.32: 3D prikaz raspodjele struje za 1. negativni impuls

Na slici 5.32 je prikazana 3D raspodjela struje za prvi negativni impuls. Maksimalna vrijednost struje (70,77 kA) i njezina distribucija je slična prvom pozitivnom impulsu bez štapnih uzemljivača odnosno vidljiva je nesimetrična raspodjela sa glavninom struje koja prolazi kroz odvod direktno povezan s hvataljkom.



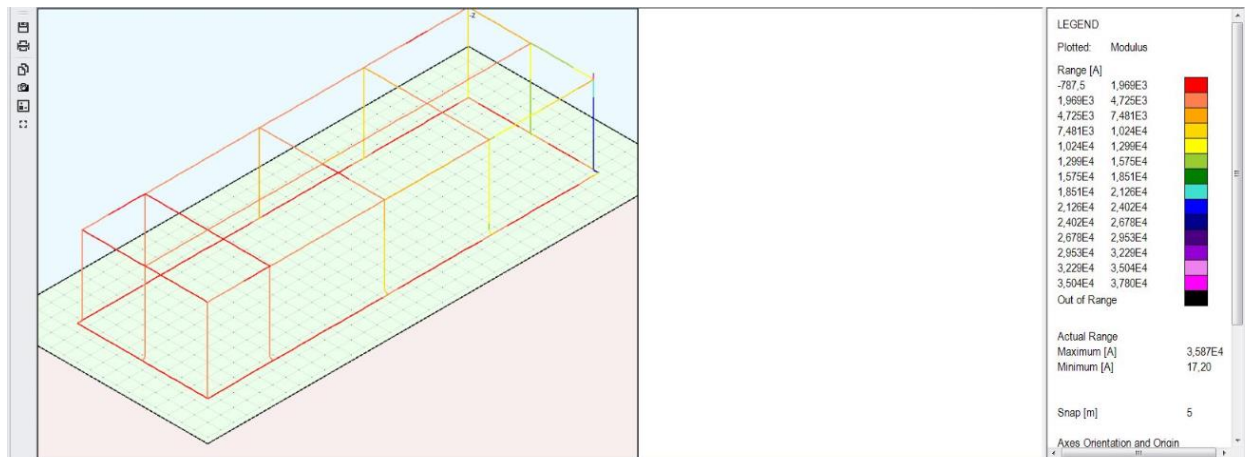
Slika 5.33: 3D prikaz potencijala zemlje za 1. negativni impuls



Slika 5.34: 2D prikaz napona koraka za 1. negativni impuls

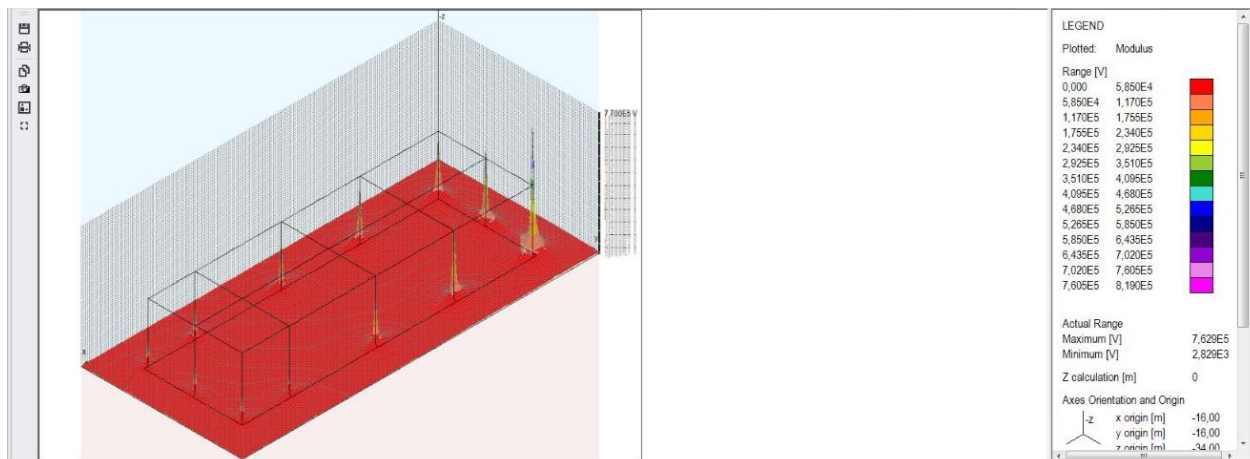
Na slikama 5.33 i 5.34 su vidljivi potencijal zemlje i napon koraka za 1. negativni impuls. Maksimalne vrijednosti potencijala zemlje i napona koraka su veće u odnosu na prvi pozitivni impuls bez štapnih uzemljivača te u odnosu na prvi negativni impuls sa štapnim uzemljivačima. U neposrednoj blizini uzemljivačkog prstena na mjestu udara munje dolazi do oštrog rasta potencijala zemlje i napona koraka iznad dopuštenih vrijednosti.

5.3.3 Naknadni negativni impuls

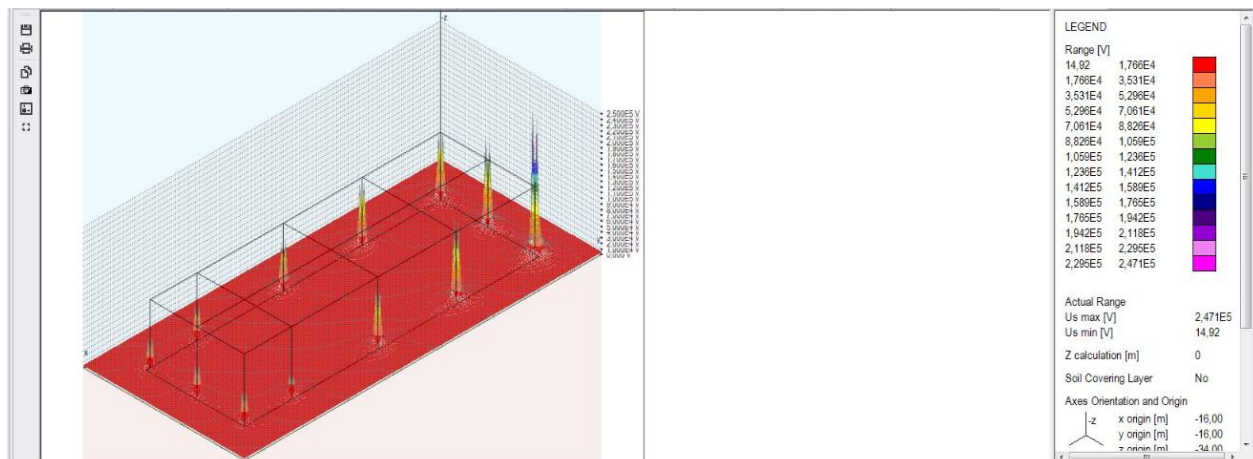


Slika 5.35: 3D prikaz raspodjele struje za naknadni negativni impuls

Prema slici 5.35 je vidljivo da je distribucija struje za naknadni negativni impuls slična u slučajevima sa i bez štapnih uzemljivača. Najveći dio struje prolazi kroz hvataljku i na nju direktno povezan odvod. Raspodjela struje po odvodima je simetričnija u odnosu na prvi pozitivni i prvi negativni impuls.



Slika 5.36: 3D prikaz potencijala zemlje za naknadni negativni impuls



Slika 5.37: 3D prikaz napona koraka za naknadni negativni impuls

Naknadni negativni impuls u slučaju bez štapnih uzemljivača predstavlja najnepovoljniju promatranu situaciju. Maksimalne vrijednosti potencijala zemlje i napona koraka su veće u odnosu na sve promatrane slučajeve. Najveće vrijednosti dosežu na mjestu udara munje te imaju najstrmiji rast u odnosu na ostale slučajeve. Napon koraka prekoračuje dopuštene vrijednosti na mjestu svih spojeva odvoda sa prstenastim uzemljenjem, vidljivo prema slici 5.37.

6. ZAKLJUČAK

Udar munje u loše štícene objekte može svojim mehaničkim, termičkim, električkim i magnetskim djelovanjem prouzročiti veliku materijalnu štetu i predstavljati opasnost za ljudski život. Zbog toga se u Republici Hrvatskoj primjenjuju propisi i zakoni koji su vezani za gradnju, sigurnost, normizaciju i rad sustava za zaštitu od djelovanja munje. Među njima je najvažniji Tehnički propis za sustave zaštite od djelovanja munje, čije su odredbe i primjena objašnjeni u diplomskom radu. Tehnički propis se poziva na hrvatske i međunarodne norme, među kojima je za projektiranje samog sustava zaštite najvažnija IEC 62305 norma. Na temelju te norme je u programu XGS Lab modelirana građevina dužine 150 m, širine 50 m i visine 30 m koja se nalazi na homogenom tlu otpornosti $80 \Omega\text{m}$, odnosno njezin vanjski sustav zaštite kako bi se simuliralo njegovo djelovanje prilikom udara munje. Analizirali su se raspodjela struje atmosferskog pražnjenja, potencijala, napona koraka, potencijala površine zemlje te sigurna područja građevine za različite frekvencije struje atmosferskog pražnjenja, odnosno za prvi pozitivni, prvi negativni i naknadni negativni impuls. Kako bi se osigurao adekvatan dizajn i naposljetku učinkovitost sustava za zaštitu, simulacija se provodila sa najnepovoljnijim vrijednostima strujnih impulsa, koje u stvarnosti čine manje od 1% svih udara munje. Simulacija se provela za 3 različita slučaja u kojima je ispitivano kako promjena mjesta udara i promjena uzemljivačkog sustava utječu na djelovanje zaštite.

U prvom slučaju simuliran je udar munje u hvataljku postavljenu u vrh građevinskog objekta, odnosno vanjskog sustava za zaštitu sa štapnim uzemljivačima postavljenim na dubinu od 2 metra. U prvom pozitivnom impulsu utisnuta je efektivna vrijednost struje od 141,4 kA dok je u prvom negativnom impulsu utisnuta efektivna vrijednost struje od 70,7 kA. Za prvi pozitivni i prvi negativni impuls vidljiva je nesimetrična raspodjela struje i napona pošto se njihov najveći dio raspoređuje po odvodima izravno povezanim s hvataljkom te uzemljenju najbližem mjestu udara. Rezultat toga je pojava velikih iznosa magnetskog polja te oštar rast potencijala zemlje i napona koraka približavanjem mjestu udara munje. Za naknadni negativni impuls raspodjela struje sa utisnutom strujom od 35,35 kA je simetričnija u odnosu na prva dva impulsa, ali je vrijednost potencijala zemlje najveća. Naponi dodira premašuju dopuštene vrijednosti na području cijelog objekta za sva tri impulsa dok naponi koraka premašuju dopuštene vrijednosti na mjestima štapnih uzemljivača i području oko mjesta udara.

U drugom slučaju promijenjeno je mjesto udara munje, hvataljka je postavljena na središnji dio konstrukcije te je u nju utisnuta struja prvog pozitivnog, prvog negativnog i naknadnog

negativnog impulsa. Raspodjela struje je simetričnija nego za slučaj udara u kut građevine s obzirom da se na hvataljku direktno povezuje 4 odvoda među kojima se struja ravnomjerno dijeli. Stoga su i najveće vrijednosti potencijala zemlje i napona koraka za sva tri impulsa manje u usporedbi s odgovarajućim impulsima struje pri udaru u rub građevine. Napon dodira je veći od dopuštenog na području cijele građevine za sva tri impulsa. Napon koraka kod 1. pozitivnog impulsa prekoračuje dopuštene vrijednosti na mjestima štapnih uzemljivača koji se nastavljaju na odvođe direktno povezane s hvataljkama, dok kod 1. negativnog i naknadnog negativnog impulsa pokazuje oštar rast na području svih štapnih uzemljivača sustava.

U trećem slučaju simuliran je udar munje u hvataljku postavljenu u vrh građevinskog objekta, odnosno vanjskog sustava za zaštitu bez štapnih uzemljivača. Raspodjela struje i napona je za sva tri impulsa bila slična prvom slučaju sa prisustvom štapnih uzemljivača. Najveći dio struje odnosno napona se raspodjeljuje na odvođe direktno povezane s hvataljkom. Maksimalne vrijednosti napona koraka i potencijala zemlje su u slučaju bez štapnih uzemljivača očekivano nešto veće u odnosu na prethodna dva slučaja. Oštro rastu približavanjem mjestu udara. Opasna područja napona dodira obuhvaćaju cijelu građevinu za sva tri impulsa. Napon koraka čak i bez štapnih uzemljivača pokazuje sličnosti sa preostala dva slučaja, odnosno raste iznad dozvoljenih vrijednosti na području spajanja odvoda i uzemljivačkog prstena, kod 1. pozitivnog impulsa na područjima najbližim mjestu udara a kod 1. negativnog i naknadnog impulsa na mjestu uzemljenja svih odvoda građevine. Naknadni negativni impuls slučaja bez štapnih uzemljivača ima najveće vrijednosti napona koraka (247 kV) i potencijala zemlje (762,9 kV) od sva tri promatrana slučaja.

Raspodjela struje po sustavu za zaštitu je od ključnog značaja za ispitivanje učinkovitosti njegovih sastavnica. S obzirom na rezultate simulacije možemo zaključiti da raspodjela struje i njezina (a)simetričnost ovise o mjestu udara, ali i o tipu uzemljivačkog sustava te dizajnu sustava odvoda. U slučaju udara u rub građevine raspodjela struje je izrazito asimetrična što može izazvati pojavu velikih električnih i magnetskih polja, koja utječu na električnu opremu i sustave unutar građevine. Javlja se i velika razlika potencijala koja može dovesti do iskrenja opasnih za unutarne sustave i vanjske metalne dijelove te shodno oštrom gradijentu rasta potencijala zemlje javljaju se preveliki iznosi napona dodira i koraka, koji predstavljaju opasnost za ljude. Problem prevelikih iznosa napona dodira i koraka je prisutan i kod udara munje u središnji dio građevine čija je raspodjela struje bila pravilnija s obzirom na topologiju sustava odvoda i uzemljivača. Pomoću ovih saznanja moguće je poduzeti prikladne mjere za poboljšanje učinkovitosti vanjskog sustava za zaštitu. Tako se problem visokih napona koraka i oštrog gradijenta potencijala zemlje

može riješiti nanošenjem površinskog sloja visoke otpornosti na zemlju te korištenjem prikladnijeg uzemljivačkog sustava kao što je uzemljivačka mreža, a napon dodira izolacijom i sprječavanjem kontakta s odvodima. Pomoću saznanja o raspodjeli struje može se učinkovito dizajnirati unutarnji sustav za zaštitu kao i raspored osjetljivih elemenata te provesti izjednačavanje potencijala.

7. SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada je analiza odredbi važećeg tehničkog propisa za sustave zaštite od djelovanja munje te njihova primjena kod ispitivanja tehničkih svojstava sustava zaštite prilikom udara munje pomoću simulacije. U uvodnom dijelu rada opisan je mehanizam nastanka munje i potreba za sustavom zaštite. Aktualna znanstvena istraživanja sustava za zaštitu i pregled literature korištene za teorijsku obradu rada su dani u drugom poglavlju. U trećem poglavlju razrađuju se i opisuju odredbe tehničkog propisa i njegovih sastavnih dijelova. Opisuju se sastavnice vanjskog i unutarnjeg sustava za zaštitu te norme za njihovu proizvodnju, ugradnju, ispitivanje i održavanje. U četvrtom poglavlju razrađuju se parametri struje munje te njezino štetno djelovanje na ljude i građevine. Primjenom softverskog alata XGS Lab u poglavlju 5 modeliran je vanjski sustav zaštite, opisani parametri sustava i način izvođenja simulacije. Provedena je simulacija i prikazani su rezultati za različite slučajeve udara munje u građevinu. U zaključku se analiziraju i uspoređuju rezultati simulacije raspodjele struje po sustavu zaštite te utvrđuju moguće opasnosti i njihova rješenja.

Ključne riječi: atmosfersko pražnjenje, raspodjela struje munje, sustav zaštite od munje, tehnički propis

8. ABSTRACT

The aim of this master's thesis is to analyse regulations of the official technical regulatory document for lightning protection systems and their application in the testing of technical properties of the lightning protection system during a lightning strike via a simulation. The lightning forming mechanism and the need for a protection system are described in the introductory part of the thesis. Relevant scientific research and overview of the literature used in the theoretical processing of the paper are given in the second chapter. The third chapter analyses and describes regulations of the technical regulatory document and its constituent parts. Components of the external and internal protection systems and the standards for their production, installation, testing and maintenance are described. The fourth chapter describes lightning current parameters and its harmful effects toward people and buildings. In chapter 5 the external lightning protection system is modeled using the XGS Lab software and a description of system parameters and the way of conducting the simulation is provided. The simulation was carried out and the results of different case studies of lightning strikes on a building are presented. In the conclusion part, the results of the current distribution on a lightning protection system are compared and analysed. Possible hazards and their solutions are determined.

Keywords: atmospheric discharge, lightning current distribution, lightning protection system, technical regulatory document

9. LITERATURA

- [1] D. Tomašić-Martinić: *Ispitivanje sustava zaštite od munje stambeno poslovne građevine*, Diplomski rad, Veleučilište u Karlovcu, Odjel Sigurnosti i zaštite, Karlovac, 2020.
- [2] Slika atmosferskog pražnjenja oblak-zemlja, dostupno na: <http://blog.meteo-info.hr/meteorologija/kako-nastaju-munje/>, [28.8.2021.]
- [3] Tehnički propis za sustave zaštite od djelovanja munje na građevinama, br. NN 87/2008, srpanj 2008.
- [4] E. Mihalek: *Projektiranje sustava zaštite od munje s primjerima proračuna*, Kigen, Zagreb, 2008. (web stranica: <http://www.fzplus.hr/download/Sadrzaji/1001752-projektiranje-sustava-za-zastitu-od-munje.pdf>) [29.8.2021]
- [5] Tehnički propis o izmjeni i dopuni Tehničkog propisa za sustav zaštite od djelovanja munje na građevinama, br. NN 33/2010, ožujak 2010.
- [6] N. Hrelja, K. Vidmar: *Analiza tehničkog propisa za sustave zaštite od djelovanja munje*, 5E, Rijeka, 2015. dostupno na: <https://www.5e-rijeka.hr/images/Analiza%20TP%20SZM.pdf> [29.8.2021.]
- [7] Guide to BSN EN/IEC 62305, Furse, dostupno na: http://www-public.tnb.com/eel/docs/furse/BS_EN_IEC_62305_standard_series.pdf [29.8.2021.]
- [8] HRN EN 62305-3:2008/A11:2009, Zaštita od munje -- 3. dio: Materijalne štete na građevinama i opasnost za život (EN 62305-3: 2006/A11:2009)
- [9] Slika: Izjednačavanje potencijala pomoću sabirnice za izjednačavanje, dostupno na: <https://www.lsp-international.com/wp-content/uploads/Figure-21-Example-of-main-equipotential-bonding.png> [29.8.2021.]
- [10] HRN EN 62305-1:2008, Zaštita od munje – 1. dio: Opća načela (IEC 62305-1: 2006; EN 62305-1: 2006)
- [11] D. Praničević, *Sustavi zaštite od munje*, Kigen, Zagreb, 2003.
- [12] N. Kosić, *Sustav za zaštitu nadzemnih vodova od atmosferskog pražnjenja*, Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2015.
- [13] J.Meppelink, R. Andolfato, D. Cuccarollo, *Calculation of Lightning Effects in the Frequency Domain with a Program based on Hybrid Methods*, International Colloquium on Lightning and Power Systems, Bologna, 2016., dostupno na:

https://www.researchgate.net/publication/304526293_Calculation_of_Lightning_Effects_in_the_Frequency_Domain_with_a_Program_based_on_Hybrid_Methods [29.8.2021.]

[14] Slika : Nadomjesna shema impulsnog strujnog generatora, dostupno na:

https://www.researchgate.net/figure/Impulse-current-generator-simulation-circuit_fig7_252024084 [29.8.2021.]

[15] *Lightning science: Five ways lightning strikes people*, Weather.gov, dostupno na:

<https://www.weather.gov/safety/lightning-struck> [29.8.2021.]

[16] I. Uglešić, J. Karneluti, B. Franc, K. Vidmar, *Procjena rizika od štetnog djelovanja munje u industrijskim elektroenergetskim postrojenjima temeljem podataka mjerenja gustoće atmosferskih pražnjenja*, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije-HO CIRED, 4.savjetovanje,Trogir, 2014. dostupno na: <https://www.ho-cired.hr/4savjetovanje/SO1/SO1-13.pdf> [29.8.2021.]

10. ŽIVOTOPIS

Domagoj Horvat rođen je 1. kolovoza 1997. godine u Osijeku. Osnovnu školu Frana Krste Frankopana pohađa od 2004. do 2012. godine. Srednjoškolsko obrazovanje započinje 2012. godine u III. gimnaziji Osijek u kojoj sve 4 godine postiže odličan uspjeh te se orijentira na STEM područje. 2016. godine završava srednju školu, polaže maturu i ostvaruje pravo na upis na Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija (FERIT). 2019. godine postiže zvanje Sveučilišnog prvostupnika inženjera elektrotehnike, smjera Elektroenergetika. Iste godine upisuje diplomski studij elektrotehnike, izborni blok DEA - Elektroenergetski sustavi.